



TENSÕES NA SEÇÃO TRANSVERSAL DE PONTES DE CONCRETO ARMADO: EFEITOS DA CORROSÃO E DA VARIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CONCRETO

STRESSES IN REINFORCED CONCRETE BRIDGES SECTIONS: CORROSION AND YOUNG'S MODULE CONCRETE VARIATION EFFECTS

Paulo de Tarso Cronemberger Mendes (1); Maria de Lourdes Teixeira Moreira (2);

Paulo de Mattos Pimenta (3)

(1) Professor Doutor, Depto. de Estruturas - Universidade Federal do Piauí,
Coordenador de Engenharia Civil - NOVAFAPÍ

paulo.tcm@uol.com.br

(2) Professor Doutor, Depto. de Estruturas - Universidade Federal do Piauí,
mtmoreira@uol.com.br

(3) Professor Doutor, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo,
ppimenta@usp.br

Centro de Tecnologia – UFPI – Campus Ininga – Teresina – PI CEP: 64049-550 – Fone (86)3215-5707

Resumo

A malha de rodovias federais brasileiras possui aproximadamente 5.600 pontes, das quais cerca de 90% de concreto armado. A maioria dessas pontes tem idade superior a 30 anos, sendo escassas as informações sobre as características mecânicas de seus materiais constituintes. Ao longo da vida útil dessas pontes ocorreram alterações de capacidade de carga e geometria dos veículos da frota circulante, alterações dos trens-tipo para o dimensionamento dessas estruturas e muitas delas apresentam sinais perceptíveis de deterioração, tanto do concreto quanto da armação. Tais fatores direcionaram para uma avaliação da distribuição das tensões na seção transversal das pontes de concreto armado que considerasse os efeitos da variação do módulo de elasticidade do concreto, da corrosão da armadura e das diferentes situações de carregamento.

Neste trabalho foi analisada uma ponte com vão e seção transversal representativos das pontes existentes nas rodovias federais brasileiras, supondo diferentes taxas de armadura longitudinal, dois valores para o módulo de elasticidade do concreto – E_c e $0,5E_c$ – e diferentes configurações de corrosão da armadura. A análise foi efetuada considerando dois modelos em elementos finitos: um modelo com elementos de barras e cascas e outro com elementos sólidos.

Os resultados obtidos para a distribuição das tensões de compressão na seção transversal e de tração nas barras da armação são apresentados para cada uma das situações analisadas e discutidos os seus valores.

Palavra-Chave: Pontes de concreto; Corrosão da armadura; Distribuição de tensões.

Abstract

The Brazilian federal road network has about 5.600 bridges, 90% of them in reinforced concrete. Most of them have more than 30 years old, with little information about the mechanical properties of their constitutive materials. Along the serviceability of these bridges so much modification occurred in load support and vehicles geometry and in design standards and some of them have signs of concrete and steel deterioration. These aspects directed to the analysis of stresses in concrete reinforced bridge sections to verify the effects of the reinforcement corrosion and the Young's module concrete variation in stress distribution in several load patterns.

It was selected a representative bridge of the Brazilian road network, with different longitudinal reinforcement taxes, with two Young's module concrete – E_c and $0.5E_c$ – and with different percentage of reinforcement corrosion. The analysis considered two finite element models: bar and shell elements and solid elements.

The compression stress distribution in cross section and tension stress distribution in the reinforcement bars are presented for each analysis and their results discussed.

Keywords: concrete bridge; reinforcement corrosion; stresses distribution

1 Introdução

Pesquisa realizada por MENDES (2009) possibilitou caracterizar as pontes existentes na rede de rodovias federais brasileiras quanto à idade, dimensões, número de vãos, sistema estrutural, trem-tipo de projeto e as condições de estabilidade e de durabilidade. A maioria dessas pontes tem idade superior a 30 anos, com pouca ou nenhuma informação sobre as características mecânicas de seus materiais constituintes. As alterações ocorridas ao longo do tempo na capacidade de carga e geometria dos veículos da frota circulante, bem como a constatação de sinais perceptíveis de deterioração, tanto do concreto quanto da armação dessas pontes, direcionaram para uma avaliação da distribuição das tensões na seção transversal das pontes de concreto armado que considerasse os efeitos da variação do módulo de elasticidade do concreto, da corrosão da armadura e das diferentes situações de carregamento.

Neste trabalho foi analisada uma ponte com vão e seção transversal representativos das pontes existentes nas rodovias federais brasileiras, supondo diferentes taxas de armadura longitudinal, dois valores para o módulo de elasticidade do concreto – E_c e $0,5.E_c$ – e diferentes configurações de corrosão da armadura. A análise foi efetuada considerando dois modelos em elementos finitos: um modelo com elementos de barras e cascas e outro com elementos sólidos.

2 Caracterização dos modelos

A ponte representativa adotada para análise é em viga simplesmente apoiada de concreto armado, com vão de 20,0 m e dimensões da seção transversal conforme figura 1.

Para efeito de análise admitiu-se concreto com $f_{ck} = 18,0$ MPa e armadura constituída de aço CA25 ou CA50.

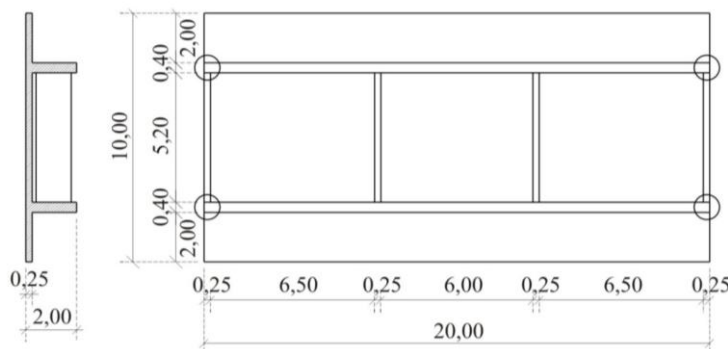


Figura 1 – Ponte representativa (MENDES (2009))

2.1 Modelos computacionais

Para avaliação do comportamento da ponte foram adotados dois modelos computacionais. O primeiro modelo consistiu na discretização das vigas com elementos

finitos de barras e a laje com elementos finitos de cascas (B-C), conforme figura 2. No segundo modelo os elementos constituintes da superestrutura da ponte foram discretizados com elementos finitos sólidos (SOL) conforme figura 3.

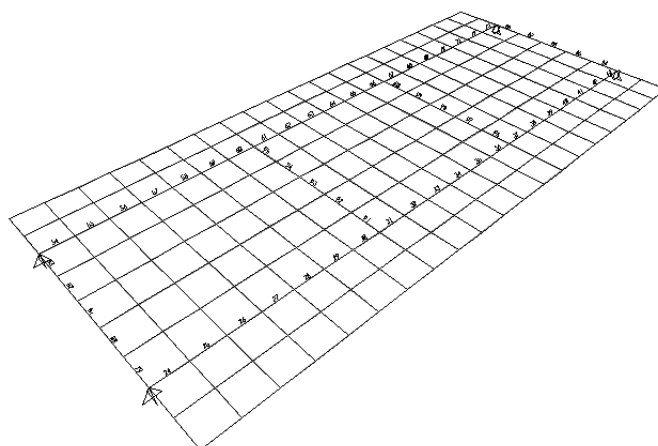


Figura 2 – Modelo com elementos finitos de barras e cascas (MENDES (2009))

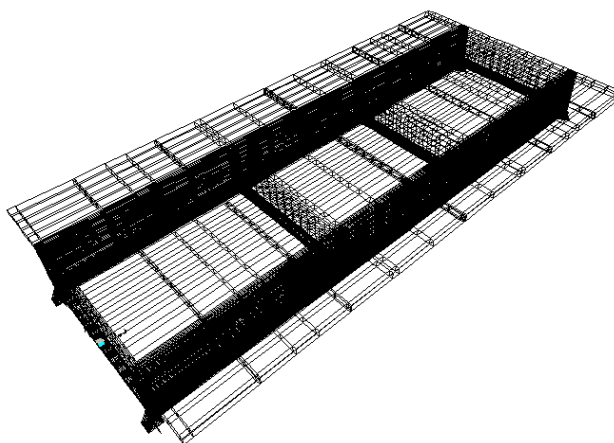


Figura 3 – Modelo com elementos finitos sólidos (MENDES (2009))

2.2 Módulos de elasticidade do concreto e do aço

Para a análise dos modelos adotou-se um módulo de elasticidade do concreto $E_c = 23,8$ GPa correspondente ao valor sugerido na NBR 6118 (2003).

Devido à precariedade das informações relativas às características mecânicas dos concretos executados nessas pontes, optou-se por analisá-las considerando também um módulo de elasticidade do concreto correspondente a 50% do valor de E_c , com o objetivo de avaliar a influência deste fator na distribuição de tensões no concreto e no aço.

O módulo de elasticidade do aço foi considerado $E_s = 210,0$ GPa.

2.3 Variação da taxa geométrica de armadura

A taxa geométrica da armadura longitudinal das vigas foi considerada com os valores $\rho_1=3,78\%$, $\rho_2=3,22\%$, $\rho_3=2,68\%$ e $\rho_4=1,63\%$, correspondentes a possibilidades de detalhamento com o aço CA25 e com o aço CA50, conforme figura 4.

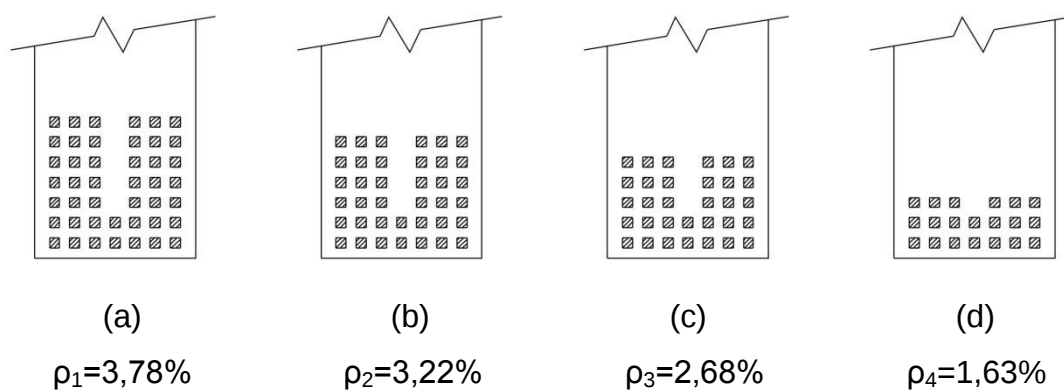


Figura 4 – Distribuição das barras na seção transversal das longarinas (MENDES (2009))

2.4 Configurações de corrosão

Tendo em vista que a configuração de corrosão da armadura longitudinal mais freqüente corresponde à corrosão das barras da camada inferior, optou-se por admitir a redução de seção das barras dessa camada em 40% e 100%, conforme as figuras 5 e 6.

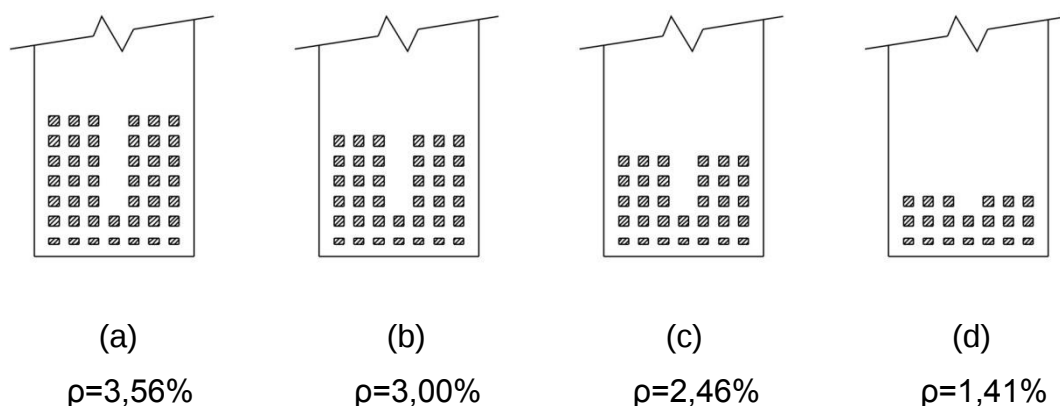


Figura 5 – Distribuição das barras na seção transversal das longarinas, com a primeira camada com 40% de corrosão (MENDES (2009))

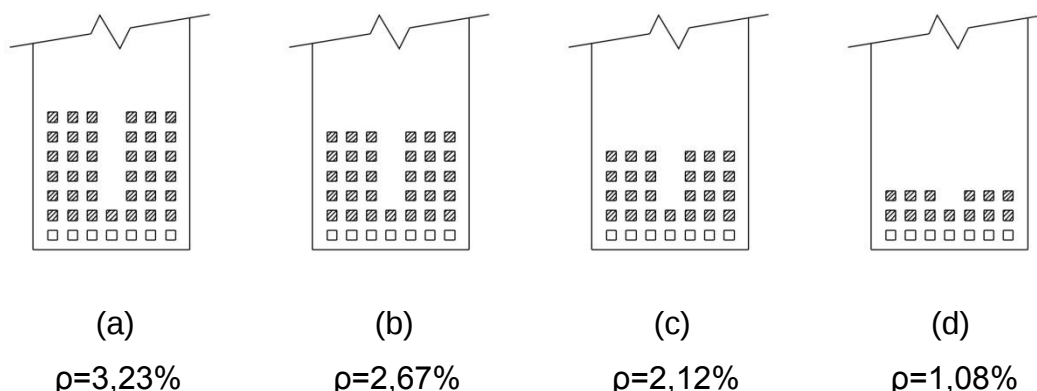


Figura 6 – Distribuição das barras na seção transversal das longarinas, com a primeira camada com 100% de corrosão (MENDES (2009))

2.5 Carregamentos

Para análise foram considerados os carregamentos correspondentes às cargas permanentes e aos trens-tipo TB360 da NB6 (1960) e TB450 da NB6 (1982), incluindo o efeito de impacto através do coeficiente de impacto ϕ .

3 Resultados das análises

3.1 Tensões de compressão no concreto – efeito da fissuração

Para os modelos com elementos de barra e casca (B-C), a tensão máxima de compressão no concreto, considerada uniforme ao longo da largura comprimida, e de tração na armadura, determinada no seu centro de gravidade e ambas variando linearmente ao longo da altura, foram obtidas a partir do momento fletor máximo e das características geométricas da seção transversal.

No modelo com elementos sólidos, a tensão longitudinal de compressão no topo do tabuleiro varia consideravelmente ao longo da largura da aba comprimida, no centro dos elementos de 1 a 12 indicados na figura 7, dependendo do tipo de carregamento aplicado, conforme indicado nas figuras 8 e 9 para as situações de carregamento {PERM} e {PERM + ϕ .TB450} no Estádio 1 e figuras 10 e 11 no Estádio 2.

Observa-se para o carregamento {PERM} que o valor máximo da tensão longitudinal de compressão no topo do tabuleiro é de 2.897 kN/m², ou 2,90 MPa (figura 8), obtido com o concreto tracionado não fissurado e que na situação mais desfavorável de carregamento, correspondente à combinação {PERM + ϕ .TB450}, o valor máximo da tensão longitudinal de compressão no topo do tabuleiro é de 6.790 kN/m², ou 6,79 MPa (figura 11), obtido com

o concreto tracionado fissurado. Portanto, a tensão de compressão longitudinal máxima varia entre 2,90 MPa e 6,79 MPa, com a seção considerada fissurada ou não-fissurada.

Considerando o concreto com $f_{ck} = 18,0$ MPa as tensões de compressão no concreto variam entre 16,1% e 37,7% da resistência característica do concreto.

Considerando o valor médio no topo do tabuleiro esses percentuais passam a ser de 13,6% e de 25,9%, respectivamente.

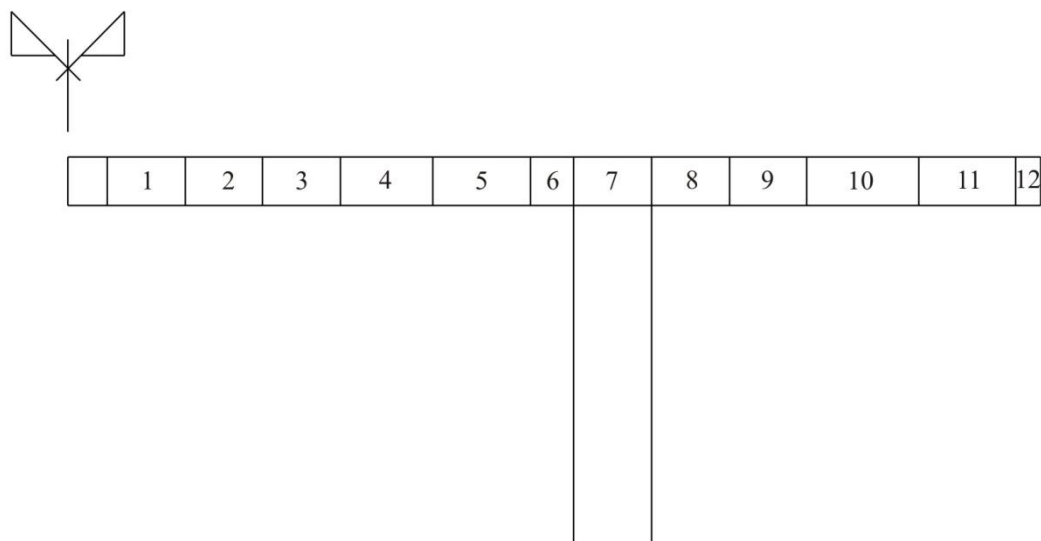


Figura 7 – Elementos comprimidos do tabuleiro da ponte

{PERM} - ρ_1 - E_c - NF (kN/m²)
Valor médio (topo) = -2.457
Valor médio (espessura) = -1.995

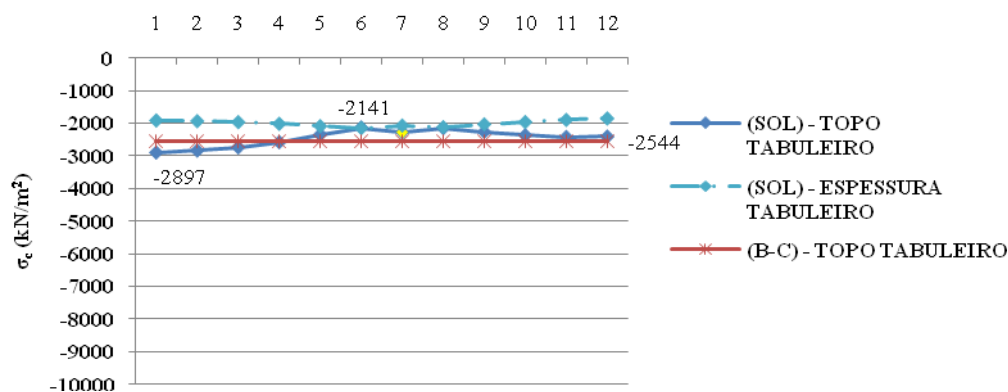


Figura 8 – Distribuição das tensões longitudinais de compressão – carregamento {PERM}, no Estádio 1

$$\{\text{PERM} + \phi \cdot \text{TB450}\} - \rho_1 - E_c - \text{NF (kN/m}^2\text{)}$$

Valor médio (topo) = -4.566

Valor médio (espessura) = -3.689

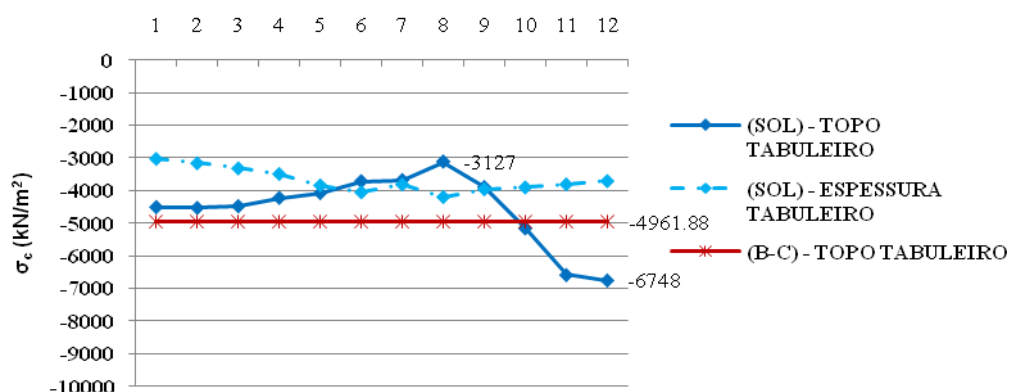


Figura 9 - Distribuição das tensões longitudinais de compressão – carregamento {PERM + ϕ .TB450}, no Estádio 1

$$\{\text{PERM}\} - \rho_1 - E_c - \text{F150 (kN/m}^2\text{)}$$

Valor médio (topo) = -2.506

Valor médio (espessura) = - 1.923

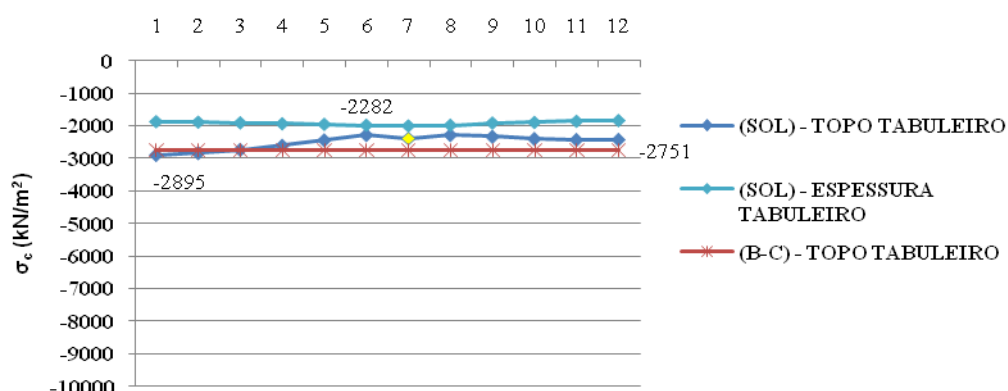


Figura 10 – Distribuição das tensões longitudinais de compressão – carregamento {PERM}, no Estádio 2

$$\{\text{PERM} + \phi \cdot \text{TB450}\} - \rho_1 - E_c - \text{F150 (kN/m}^2\text{)}$$

Valor médio (topo) = - 4.662

Valor médio (espessura) = - 3.570

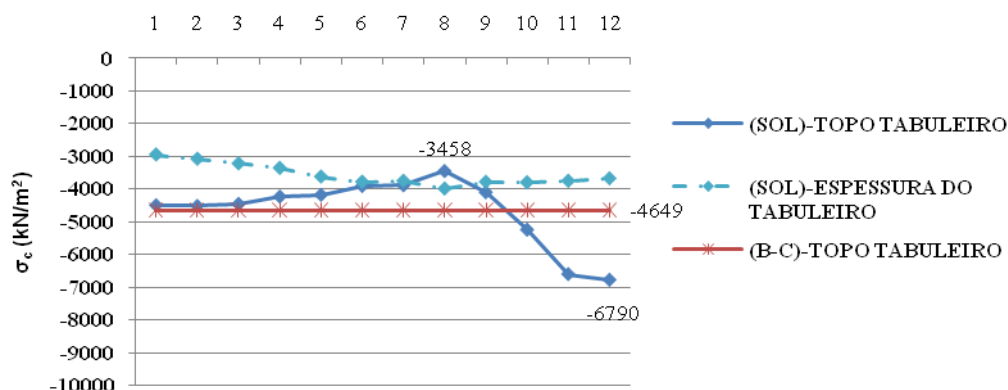


Figura 11 - Distribuição das tensões longitudinais de compressão – carregamento $\{\text{PERM} + \phi \cdot \text{TB450}\}$, no Estádio 2.

3.2 Tensões de compressão no concreto – efeito da corrosão

As figuras 12 e 13 apresentam os valores das tensões de compressão mínima, média e máxima no topo do tabuleiro, para cada uma das situações seguintes:

- taxa geométrica de armadura igual a $\rho_1=3,78\%$, $\rho_2=3,22\%$ e $\rho_3=2,68\%$, conforme figura 4;
- módulo de deformação longitudinal do concreto igual a E_c e $0,5E_c$;
- seção no Estádio 2;
- modelos com elementos de barra e casca (B-C) e modelos com elementos sólidos (SOL).

A variação da taxa de armadura da seção entre $\rho_1=3,78\%$ e $\rho_3=2,68\%$ tem pequena repercussão na intensidade da tensão de compressão máxima, cujos valores variam entre 6,79 MPa e 6,94 MPa, para um mesmo valor de módulo de deformação do concreto E_c . A redução do módulo de deformação de E_c para $0,5.E_c$ mobiliza uma área maior na região comprimida da seção, o que reduz os valores máximos das tensões, que variam entre 6,30 e 6,41 MPa.

As figuras 14 e 15 mostram as variações das tensões de compressão mínima, média e máxima no topo do tabuleiro, considerando a longarina com taxa geométrica de armadura $\rho_3=2,68\%$ variável com a corrosão, módulos de deformação longitudinal E_c e $0,5.E_c$, para a seção trabalhando no Estádio 2 e casos de carregamentos $\{\text{PERM}\}$, $\{\text{PERM} + \phi \cdot \text{TB360}\}$ e $\{\text{PERM} + \phi \cdot \text{TB450}\}$.

VARIAÇÃO DAS TENSÕES DE COMPRESSÃO MÍN, MÉD E MÁX NO TOPO DO TABULEIRO
COM A TAXA DE ARMADURA ρ - ESTÁDIO 2 - $\varphi=1,26$
MODELOS (B-C) E (SOL) - E_c (kN/m²)

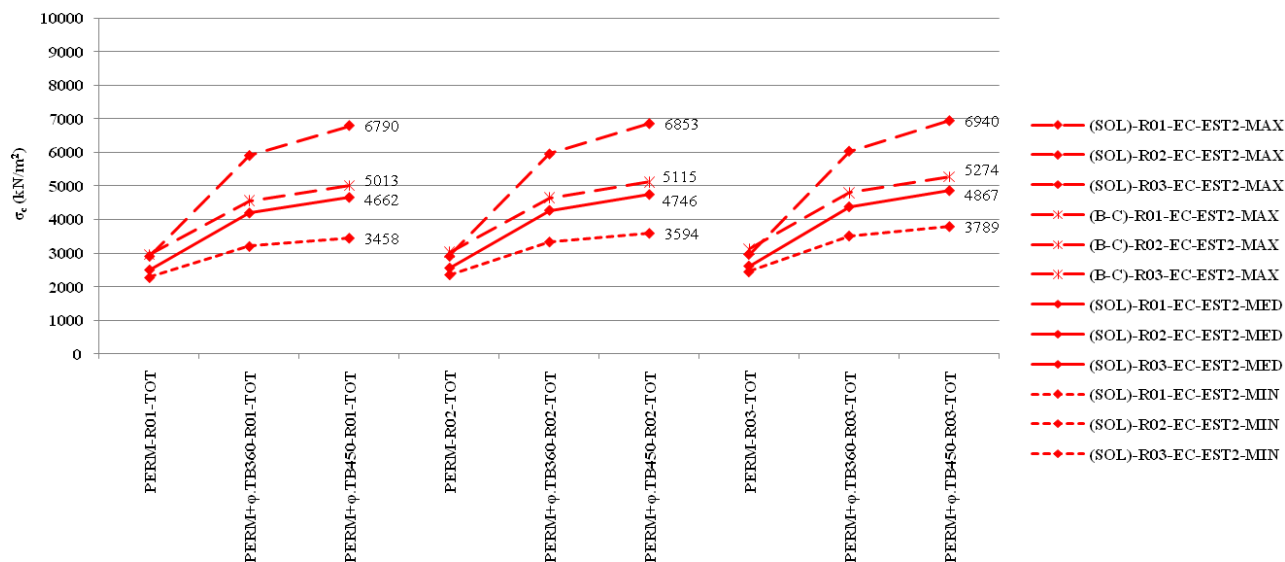


Figura 12 – Variação das tensões longitudinais de compressão mínima, média e máxima no topo do tabuleiro com ρ , para os modelos (B-C) e (SOL), no Estádio 2, módulo de deformação E_c , com impacto, provocadas por {PERM}, {PERM + φ .TB360} e {PERM + φ .TB450}

VARIAÇÃO DAS TENSÕES DE COMPRESSÃO MÍN, MÉD E MÁX NO TOPO DO TABULEIRO
COM A TAXA DE ARMADURA ρ - ESTÁDIO 2 - $\varphi=1,26$ MODELOS (B-C) E (SOL) -
 $0,5.E_c$ (kN/m²)

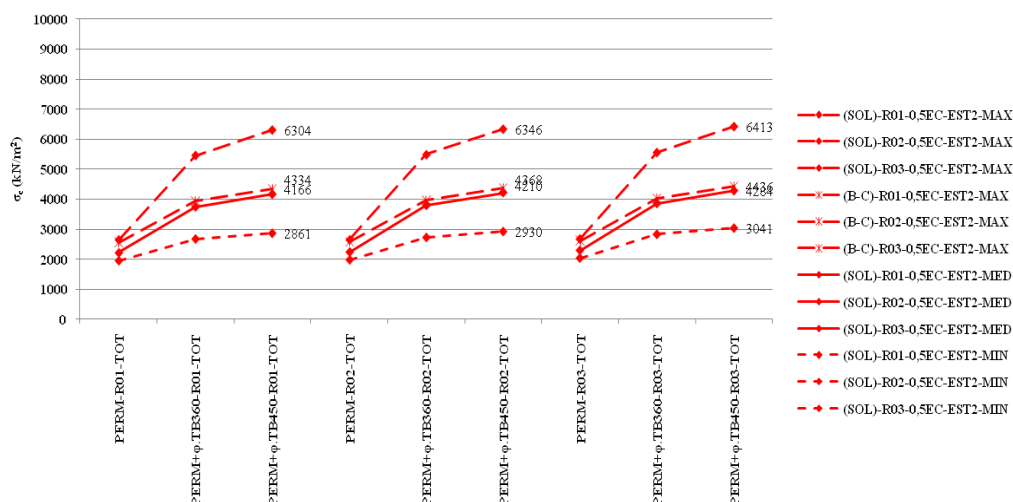


Figura 13 – Variação das tensões longitudinais de compressão mínima, média e máxima no topo do tabuleiro com ρ , para os modelos (B-C) e (SOL), no Estádio 2, módulo de deformação $0,5.E_c$, com impacto, provocadas por {PERM}, {PERM + φ .TB360} e {PERM + φ .TB450}

VARIAÇÃO DAS TENSÕES DE COMPRESSÃO MÍN, MÉD E MÁX COM A CORROSÃO DA
ARMADURA - $\rho=2,68\%$ - $\phi=1,26$
TOPO TABULEIRO - ESTÁDIO 2 - MODELOS (B - C) E (SOL) - E_c - (kN/m²)

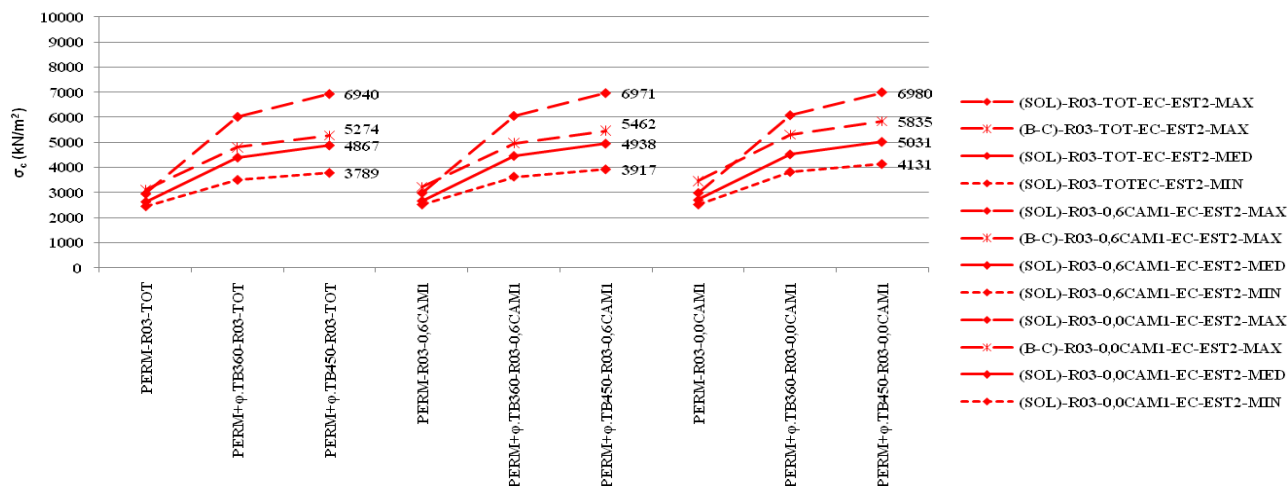


Figura 14 – Variação das tensões de compressão mínima, média e máxima no topo do tabuleiro com a corrosão da armadura ($\rho_3=2,68\%$), modelos (B-C) e (SOL), no Estádio 2, módulo de deformação E_c , com impacto, provocadas por {PERM}, {PERM + ϕ .TB360} e {PERM + ϕ .TB450}

VARIAÇÃO DAS TENSÕES DE COMPRESSÃO MÍN, MÉD E MÁX COM A CORROSÃO DA
ARMADURA - $\rho_3=2,68\%$ - $\phi=1,26$ - TOPO TABULEIRO - ESTÁDIO 2 - MODELOS (B - C) E
(SOL) - $0,5.E_c$ - (kN/m²)

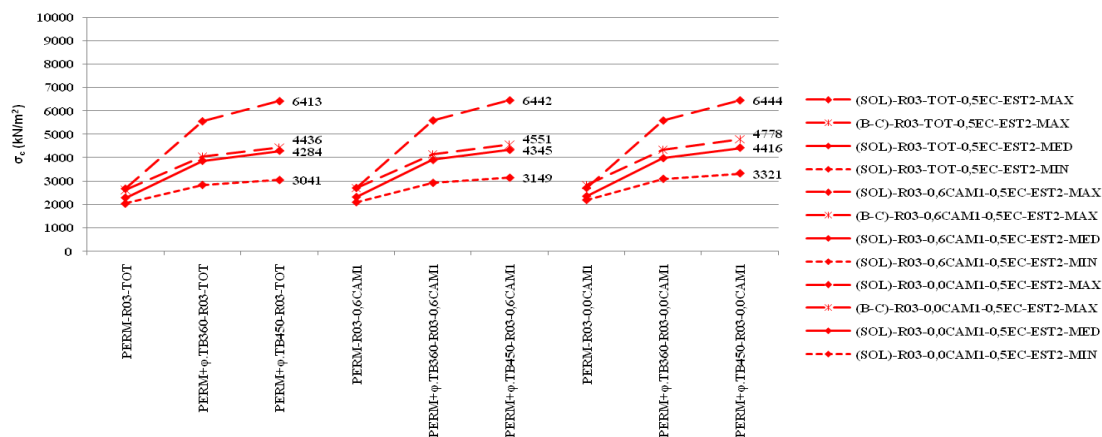


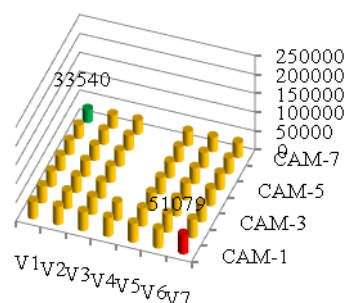
Figura 15 – Variação das tensões de compressão mínima, média e máxima no topo do tabuleiro com a corrosão da armadura ($\rho_3=2,68\%$), modelos (B-C) e (SOL), no Estádio 2, módulo de deformação $0,5.E_c$, com impacto, provocadas por {PERM}, {PERM + ϕ .TB360} e {PERM + ϕ .TB450}

Considerando o caso de carregamento {PERM + ϕ .TB450}, a tensão máxima de compressão varia de 6,41 MPa (figura 15) com a armadura não-corroída a 6,98 MPa (figura 14) com a primeira camada totalmente corroída, para módulos de deformação $0,5.E_c$ e E_c , respectivamente, o que indica pouca influência da corrosão da armadura e do módulo de deformação do concreto na variação de intensidade dessas tensões.

3.3 Tensões de tração na armadura não corroída

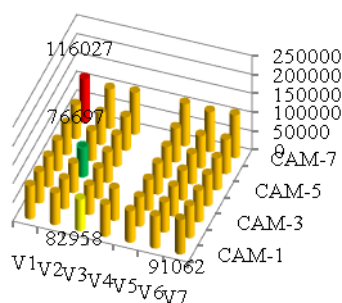
No modelo com elementos sólidos, as tensões de tração são fornecidas para cada barra, o que facilita na determinação dos valores médios, máximos e mínimos, conforme apresentado nas figuras 16 (a) e 17 (a), para a seção não fissurada, e 16 (b) e 17 (b) para a seção fissurada, correspondentes aos carregamentos {PERM} e {PERM + ϕ .TB450}.

{PERM} - R01 - EC - NF
(kN/m²)
Valor médio = 43.130



(a)

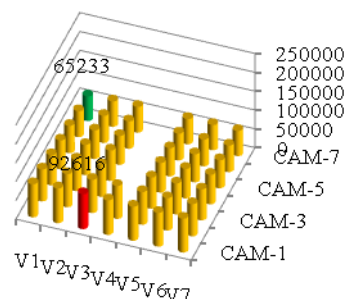
{PERM} - R01 - EC - F150
(kN/m²)
Valor médio = 86.380



(b)

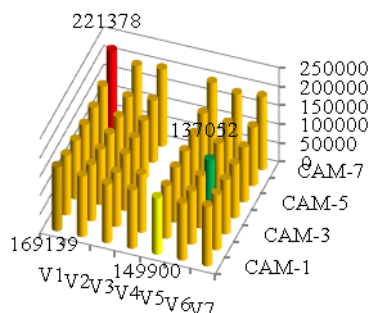
Figura 16 – Distribuição das tensões nas barras na seção não fissurada (a) e na seção fissurada (b) para o modelo com elementos sólidos, para carregamento {PERM}

{PERM + ϕ .TB450} - R01 -
EC - NF (kN/m²)
Valor médio = 79.193



(a)

{PERM + ϕ .TB450} - R01 -
EC - F150 (kN/m²)
Valor médio = 157.341



(b)

Figura 17 – Distribuição das tensões nas barras na seção não fissurada (a) e na seção fissurada (b) para o modelo com elementos sólidos, para carregamento {PERM + ϕ .TB450}, respectivamente.

Observa-se que a existência da fissura na seção altera completamente a distribuição de tensões nas barras, fazendo com que a barra mais solicitada, que antes da fissuração

pertencia à camada mais distante da linha neutra (CAM-1), passe a ser uma barra situada na camada mais próxima dela (CAM-7).

As figuras 18 e 19 apresentam os valores das tensões médias na armadura obtidos com os modelos (B-C) e (SOL) no Estádio 1 e no Estádio 2, para os carregamentos {PERM} e {PERM + ϕ .TB450}. Enquanto os resultados do carregamento {PERM} podem ser considerados equivalentes em termos de tendências e de valores, os resultados do carregamento {PERM + ϕ .TB450} apresentam mesma tendência mas pequena diferença a maior (inferior a 10%) para o modelo (SOL), atribuída ao efeito torcional do posicionamento do trem-tipo.

Nessas figuras os marcadores em forma de asterisco dizem respeito aos modelos com elementos de barra e casca, enquanto os marcadores em forma de losango cheio dizem respeito aos modelos com elementos sólidos. As linhas cheias referem-se ao Estádio 1 e as linhas tracejadas ao Estádio 2.

COMPARAÇÃO DAS TENSÕES MÉDIAS DE TRAÇÃO MODELOS (B-C) E (SOL) - {PERM} ESTÁDIOS 1 E 2 - E_c E $0,5.E_c$

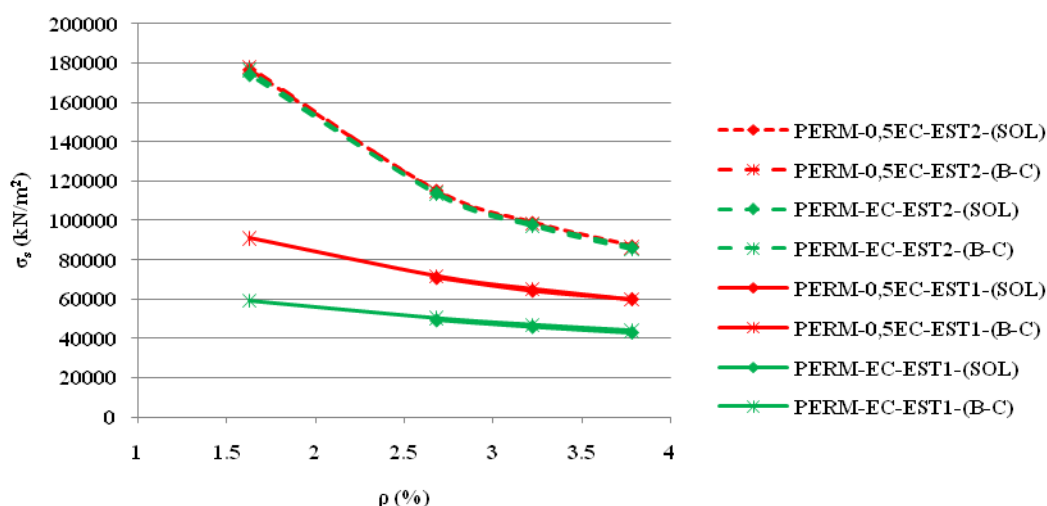


Figura 18 – Comparação das tensões médias de tração nos modelos (B-C) e (SOL) para o carregamento {PERM}

COMPARAÇÃO DAS TENSÕES MÉDIAS DE TRAÇÃO MODELOS (B-C) E (SOL) - {PERM + ϕ .TB450} ESTÁDIOS 1 E 2 - E_c E $0,5.E_c$

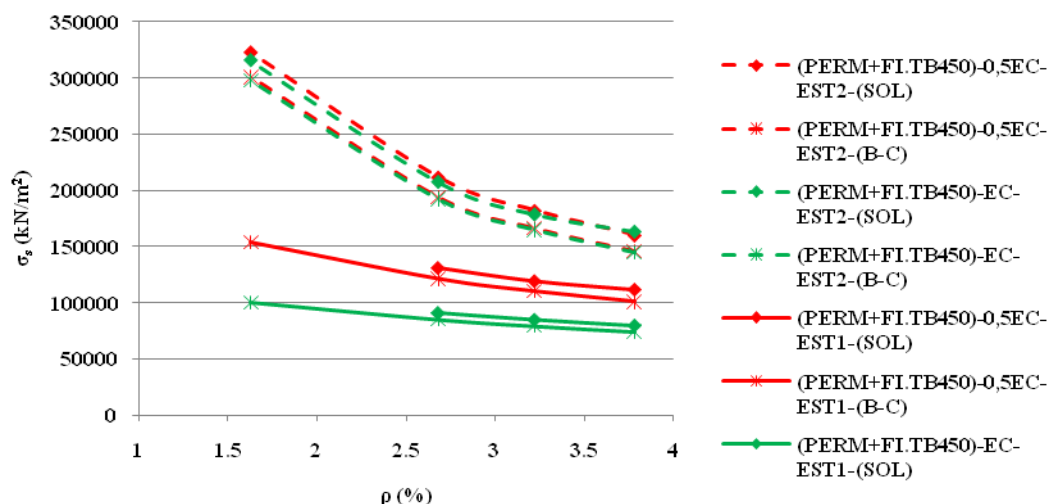


Figura 19 – Comparação das tensões médias de tração nos modelos (B-C) e (SOL) para o carregamento {PERM + TB450}

3.4 Tensões de tração na armadura corroída

As figuras 20 e 21 apresentam as tensões de tração mínima, média e máxima nas barras da armadura, para as condições descritas em 3.2. Ressaltem-se as elevadas diferenças entre as tensões nas barras da armadura para os modelos (SOL) comparadas com as diferenças obtidas com os modelos (B-C), para cada nível de corrosão da armadura.

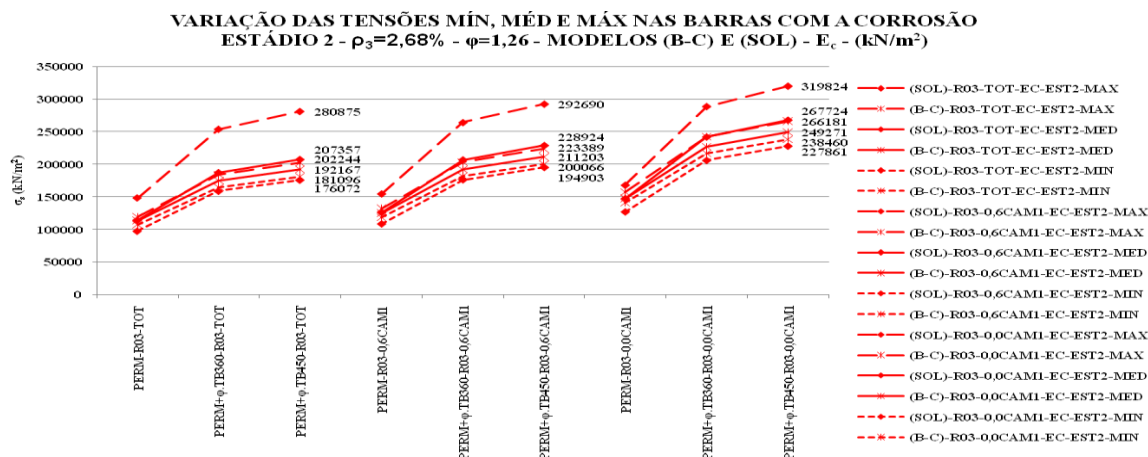


Figura 20 – Variação das tensões mínima, média e máxima nas barras com a corrosão da armadura ($\rho_3=2,68\%$), modelos (B-C) e (SOL), no Estádio 2, módulo de deformação E_c , com impacto, provocadas por {PERM}, {PERM + ϕ .TB360} e {PERM + ϕ .TB450}

VARIAÇÃO DAS TENSÕES MÍN, MÉD E MÁX NAS BARRAS COM A CORROSÃO
ESTÁDIO 2 - $\rho_3=2,68\%$ - $\varphi=1,26$ - MODELOS (B-C) E (SOL) - $0,5.E_c$ - (kN/m^2)

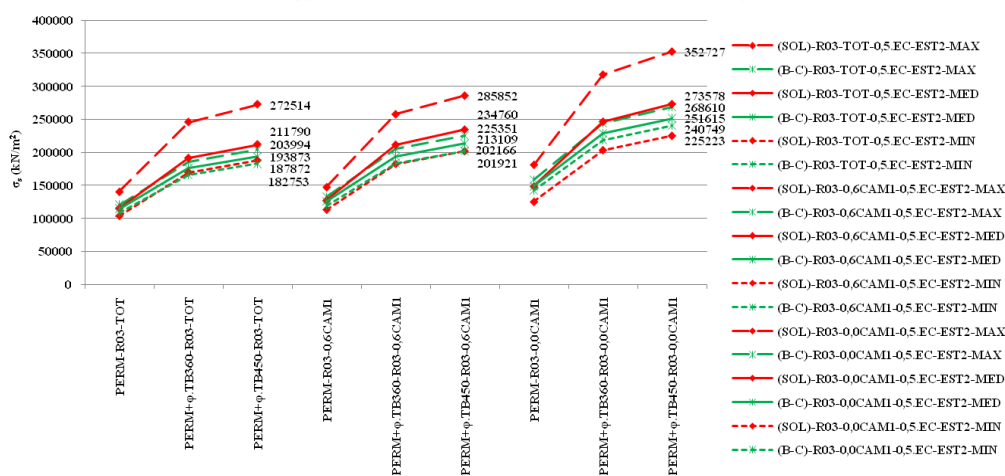


Figura 21 – Variação das tensões mínima, média e máxima nas barras com a corrosão da armadura ($\rho_3=2,68\%$), modelos (B-C) e (SOL), no Estádio 2, módulo de deformação $0,5.E_c$, com impacto, provocadas por {PERM}, {PERM + φ .TB360} e {PERM + φ .TB450}

Considerando o caso de carregamento {PERM + φ .TB450} e módulo de deformação E_c , a tensão máxima de tração varia de 280,88 MPa com a armadura não-corroída a 319,82 MPa com a primeira camada totalmente corroída, o que corresponde a um acréscimo de 13,9% na intensidade da tensão, para uma redução de 20,9% da taxa de armadura decorrente da corrosão total da primeira camada. Neste caso, a tensão máxima nas barras supera o valor do f_{yk} correspondente (CA25), mesmo considerando a armadura íntegra, evidenciando que essas pontes não atendem às exigências impostas pelo trem-tipo vigente.

4 Conclusões

Com o exposto, pode-se concluir que as tensões de compressão no concreto, oriundas da flexão, são pouco influenciadas pela fissuração, pela variação do módulo de elasticidade do concreto e pela corrosão da armadura.

Com relação às tensões de tração na armadura, observa-se, como esperado, uma variação significativa por efeito da fissuração. O efeito da variação do módulo de elasticidade de E_c para $0,5.E_c$, nas seções fissuradas, não é significativo. A completa corrosão da camada inferior da armadura (CAM-1), com redução da taxa de armadura $\rho_3=2,68\%$ em 20,9%, aumenta o valor da tensão máxima nas barras em 13,9% para o módulo de elasticidade E_c e em 30% considerando uma redução do módulo de elasticidade para $0,5.E_c$.

Da distribuição das tensões nas barras da armadura, na seção fissurada, pode-se constatar que um posicionamento inadequado dos sensores de deformação na armadura pode não captar a real situação das tensões nas barras, por ocasião da realização de provas de carga.



5 Referências

MENDES, P. T. C.. **Contribuições para um modelo de gestão de pontes de concreto aplicado à rede de rodovias brasileiras**. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

MENDES, P. T. C.. **A influência da fissuração no comportamento das vigas de concreto armado**. 1983. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de Estruturas de Concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, março 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NB 1**: Norma para Cálculo e Execução de Obras de Concreto Armado. Rio de Janeiro: ABNT, 1940.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NB 2**: Cálculo e Execução de Pontes de Concreto Armado. Rio de Janeiro: ABNT, 1940.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NB 6**: Carga Móvel em Pontes Rodoviárias. Rio de Janeiro: ABNT, 1940.

NORMAS RODOVIÁRIAS. **NPER6**: Normas para Projeto de Estradas de Rodagem. 1949.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NB 6**: Carga Móvel em Pontes Rodoviárias. Rio de Janeiro: ABNT, 1960.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NB6**: Carga Móvel em Ponte Rodoviária e Passarela de Pedestre. Rio de Janeiro: ABNT, 1982.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO – CONTRAN. **Resolução nº 12/98**. Estabelece os Limites de Peso e Dimensões para Veículos que Transitem por Vias Terrestres. Fevereiro, 1998.

CENTRO DE EXCELÊNCIA EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES – CENTRAN. **Plano Diretor Nacional Estratégico de Pesagem – PDNEP**. Volume II. Pesquisa de Tráfego. Junho/2006.