

MODELAGEM NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS FORMADOS POR PAINÉIS DUPLOS TRELIÇADOS PRÉ-MOLDADOS DE CONCRETO

ESTÉFANO IRINEU TOLEDO¹; MARIA CRISTINA VIDIGAL DE LIMA²

RESUMO

O trabalho aborda os aspectos estruturais relativos ao comportamento dos painéis duplos treliçados de concreto pré-moldado, visando estudar a resposta estrutural sob cisalhamento da região da ligação entre concreto pré-moldado e o concreto moldado no local. O estudo numérico foi desenvolvido por meio do programa computacional ANSYS, baseado no Método dos Elementos Finitos, por meio de análise linear. Foram construídos modelos para a análise do painel duplo sob cisalhamento direto e para análise sob flexão. Este trabalho apresenta resultados das análises numéricas do comportamento de painéis duplos treliçados, levando em conta a variação da resistência característica do concreto moldado no local. As características geométricas dos modelos considerados nas análises foram baseadas em modelos comerciais comumente fabricados. Os resultados mostram que é muito importante quantificar adequadamente as parcelas de transferência de tensões por adesão, atrito e armaduras que cruzam a interface de modo a simular o comportamento estrutural dos painéis duplos treliçados preenchidos com concreto moldado no local.

Palavras-chave: painel duplo treliçado, modelagem numérica, concreto pré-moldado.

ABSTRACT

The project seeks to know the behavior of structural elements formed by precast concrete sandwich composite panels filled with concrete cast in place, in order to better exploit the advantages of their application and also to provide important parameters for the calculation appropriate of these structures. The numerical study was developed by the software ANSYS, based on the Finite Element Method, using linear analysis. It was built models of the precast concrete sandwich composite panels for analysis under direct shear and models for analysis under flexion. This work presents results of the numerical analysis of the behavior of the sandwich composite panels, considering the variation of the cast in site concrete's compressive strength. The model's geometric characteristics considered on the analyses were based in commercial models commonly manufactured. The results show that it is very important to adequately quantify the portions of transfer stress by adhesion, friction and reinforcement crossing the interface to simulate the structural behavior of the precast concrete sandwich composite panels filled with concrete cast in place.

Keywords: Sandwich composite panels, numerical modeling, precast concrete.

1 Aluno de graduação do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Ex-bolsista do PIBIC CNPQ UFU. irineutoledo@gmail.com.

2 Professora Doutora da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). macris@ufu.br

1 INTRODUÇÃO

Algumas aplicações de elementos pré-moldados de seção parcial têm se difundido na cidade de Uberlândia em construções habitacionais e comerciais até 2 pavimentos, em galpões, escadas, passarelas, pontes, piscinas e cortinas (ALMEIDA, LIMA e CASTILHO (2009)). Estes elementos são chamados de pré-baldrames, pré-pilares e pré-vigas, sendo formados por placas duplas de concreto ligadas por uma treliça eletrossolda da e armaduras longitudinais e transversais conforme ilustra a Figura 1.

A utilização destes elementos estruturais possibilita redução significativa da utilização de formas e de cimbramentos, redução de gasto com armadores e carpinteiros no local, redução de resíduos resultantes da construção e rapidez na execução de obra.

Figura 1 – Painéis duplos treliçados.



Segundo Albuquerque (2007), a utilização de elementos pré-moldados de concreto de seção parcial é também uma tendência nacional, que sinaliza que muitos fabricantes de pré-moldados seguem este panorama, caracterizando assim uma solução mista que atende a uma grande quantidade de obras. Assim, optar por um maior ou menor grau de pré-fabricação, depende das características da obra, tais como condições de canteiro, prazo e disponibilidade de recursos. Nesse contexto, destaca-se a utilização dos painéis duplos treliçados pré-moldados de concreto (Figura 2).

Os painéis duplos treliçados de concreto pré-moldado (CPM) após serem preenchidos com concreto moldado no local (CML), resultam em elementos estruturais compostos por concretos de diferentes idades, com uma interface de ligação entre estes concretos, cujo

comportamento merece estudo mais detalhado a fim de garantir ou não um comportamento monolítico do sistema.

Vale ressaltar que as ligações entre os elementos pré-moldados constituem uma das principais diferenças entre as estruturas formadas por elementos pré-moldados e as estruturas de concreto moldado no local. A consideração das ligações no projeto das estruturas envolve sua análise e sua implicação no comportamento estrutural (EL DEBS, 2000).

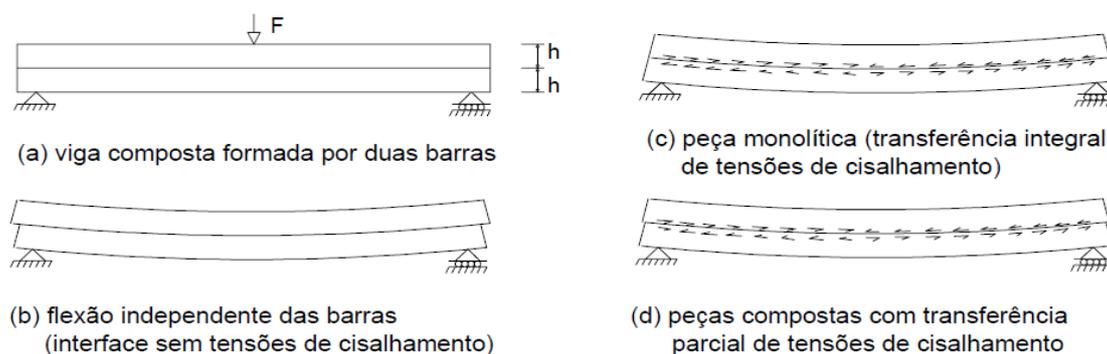
Figura 2 – Aplicações de painéis duplos treliçados em muros de arrimo.



2 MATERIAL E MÉTODOS

Os aspectos estruturais relativos ao comportamento dos painéis duplos treliçados de concreto pré-moldado, visando à análise da resposta estrutural sob cisalhamento da região da ligação entre concreto pré-moldado e o concreto moldado no local ainda é uma área pouco explorada no cenário nacional (Figura 3).

Figura 3 – Tensões de cisalhamento horizontal de vigas compostas [El Debs (2000)].



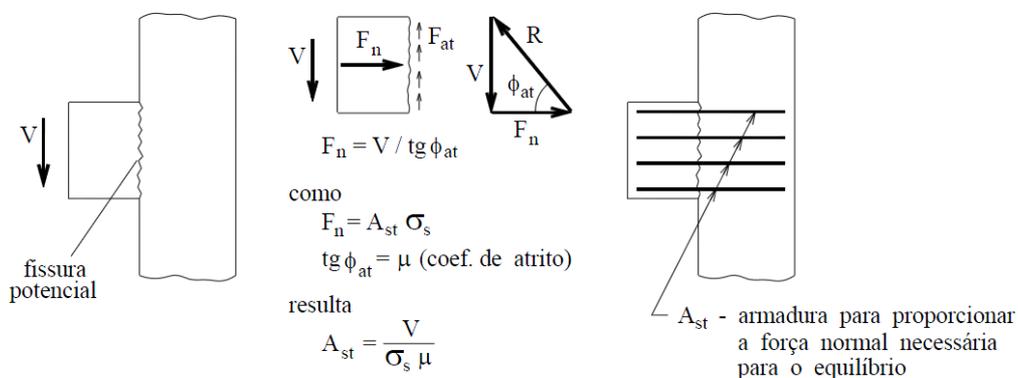
O cisalhamento na interface entre dois concretos ocorre sempre que há tendência de deslizamento na superfície de contato. De acordo com El Debs (2000), este fenômeno ocorre quando se trata de concretos com idades diferentes, como é o caso da interface entre elemento

pré-moldado e concreto moldado no local, e quando os concorrentes de mesma idade são separados por fissura.

Ballarin (1993) define as ligações como zonas singulares de descontinuidade da estrutura pré-moldada, apresentando frequentemente nestas regiões problemas de concentração de esforços e compatibilidade geométrica.

O modelo de atrito-cisalhamento para análise de transferência é uma ferramenta interessante para o projeto de ligações entre elementos pré-moldados. A idéia básica do modelo consiste em assumir que o concreto submetido a tensões de cisalhamento desenvolve uma fissura no plano dessas tensões. A integridade das partes separadas por essa fissura potencial é garantida pela colocação de uma armadura cruzando a superfície definida pela fissura que, na tendência de separação das partes, produz força normal a ela. Essa força mobiliza a força de atrito, de forma a equilibrar o cisalhamento atuante. Assim, a partir da teoria de Coulomb, pode-se determinar a armadura necessária para garantir a transferência do cisalhamento. A Figura 4 mostra a idealização em questão citada e procedimento para obtenção da área de armadura transversal.

Figura 4 – Modelo de atrito-cisalhamento [El Debs (2000)].



Segundo Fernandes & ElDebs(2005), a clássica teoria de atrito-cisalhamento prevê a transferência de esforços de cisalhamento através de um dado plano por meio de uma armadura distribuída que o atravessa. Esse plano pode ser o de uma provável fissura, o da interface de ligação de materiais diferentes ou da superfície entre dois concretos moldados em datas distintas.

As forças de cisalhamento podem ser transferidas por meio de concreto ou da armadura. A transferência pelo concreto pode ser por adesão, atrito ou chaves de

cisalhamento. A transferência pela armadura pode ser com barras cruzando a ligação ou com conectores metálicos, unidos por solda ou parafuso (EL DEBS, 2000).

O cisalhamento na interface entre dois concretos ocorre sempre que há tendência de deslizamento na superfície de contato. Este fenômeno ocorre quando se trata de concretos com idades diferentes, como é o caso da interface entre elemento pré-moldado e concreto moldado no local, e quando os concretos de mesma idade são separados por fissura. Nesses dois casos, a transferência de cisalhamento pela interface pode ser dividida em transferência por meio da superfície de contato e transferência por meio de armadura cruzando a superfície de contato (EL DEBS, 2000).

A aderência entre concretos de diferentes idades é algo importante a ser observado no estudo dos painéis duplos treliçados. A aderência é a propriedade que impede que haja escorregamento relativo entre os concretos de diferentes idades. É, portanto, responsável pela solidariedade entre esses materiais, fazendo com que o conjunto concreto pré-moldado e concreto moldado no local adquira ligações com características monolíticas.

Segundo Leonhardt & Mönning (1977) a aderência pode ser classificada em três tipos: aderência por adesão, aderência por atrito e aderência mecânica. Esses tipos decorrem de diferentes fenômenos que intervêm na ligação entre armadura e concreto.

Para a aderência entre concreto de diferentes idades, a classificação também é aplicável. A aderência por adesão se dá pela ligação cimentícia que ocorre entre os concretos de diferentes idades. Este efeito de adesão depende também da rugosidade e da limpeza da superfície do pré-moldado. A aderência por atrito se dá através da rugosidade do concreto mais velho e do concreto novo. A aderência mecânica ocorre se houver um engaste mecânico, como, por exemplo, um agregado graúdo saliente na superfície do concreto pré-moldado.

A aderência, dentre outros fatores, é influenciada pela fluência (deformação lenta), retração e fissuração do concreto, sendo, portanto, difícil estabelecer um equacionamento embasado apenas na teoria (LEONHARDT & MONNING, 1977).

Neste contexto, foi desenvolvida neste trabalho a modelagem numérica no programa computacional ANSYS® versão 11.0 de painéis duplos treliçados pré-moldados de concreto, preenchido com concreto moldado no local. As análises levaram em conta situações de cisalhamento direto da região da ligação entre concreto pré-moldado e o concreto moldado in loco, considerando a variação da resistência característica à compressão do concreto moldado

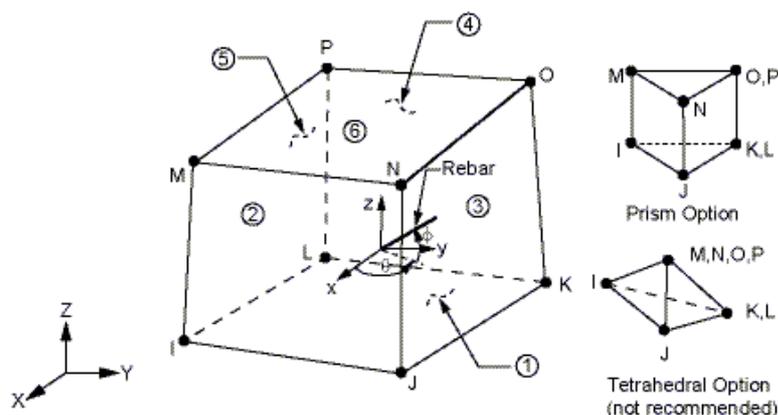
no local. Também foi avaliado o comportamento estrutural de vigas formadas por painéis duplos treliçados sob flexão. Os materiais foram considerados com comportamento elástico-linear.

2.1 Modelagem numérica computacional

A construção dos modelos numéricos no programa computacional ANSYS deve ser desenvolvida de forma criteriosa a fim de alcançar resultados adequados ao problema em estudo.

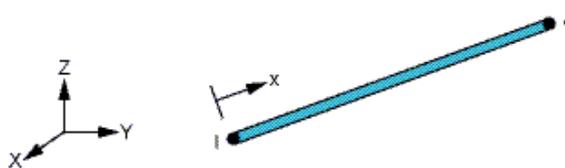
Inicialmente, foram escolhidos os elementos finitos apropriados ao desenvolvimento da simulação, levando-se em conta as propriedades e características de cada um. Para o desenvolvimento futuro de análises não-lineares, bem como utilização do critério de ruptura para o concreto disponível no programa, optou-se pela escolha do elemento finito Solid65 para representar o concreto tanto pré-moldado (CPM) como moldado in loco (CML). Esse elemento finito é usado para modelagem 3D de sólidos com ou sem barras de reforço. O elemento finito Solid65 na análise não linear é capaz de apresentar fissuração quando tensionado e esmagamento quando comprimido. Possui três graus de liberdade (UX, UY, UZ) em cada nó, sendo formado por 8 nós, conforme representado na Figura 5.

Figura 5 – Elemento finito Solid65 [ANSYS].



A treliça eletrossoldada, os estribos e demais armaduras foram representadas pelo elemento finito Link8. Esse elemento pode ser usado para representação de treliças, cabos e molas, possui três graus de liberdade (UX, UY, UZ) e é formado por dois nós, conforme representado na Figura 6.

Figura 6 – Elemento finito Link8 [ANSYS].



Assim, estabelece-se o elemento finito que será utilizado e características como o módulo de elasticidade, coeficiente de *Poisson*, peso específico e área da seção transversal. Para a análise numérica de cisalhamento direto no programa ANSYS foram utilizadas as propriedades dos materiais constituintes conforme descrito a seguir.

O aço que compõe a treliça possui módulo de elasticidade $E = 21000 \text{ kN/cm}^2$, coeficiente de Poisson $\nu = 0,3$ e massa específica de $\rho = 78,5 \times 10^{-6} \text{ kN/cm}^3$. A treliça que compõe o modelo físico utilizada na fabricação dos painéis duplos treliçados atende aos requisitos da ABNT NBR 14862(2002). Ela é formada por uma barra no banzo superior com seção transversal de $0,2827 \text{ cm}^2$ ($\phi 6 \text{ mm}$), duas barras no banzo inferior de $0,1963 \text{ cm}^2$ ($\phi 5 \text{ mm}$) e a sinusóide com seção transversal de $0,1385 \text{ cm}^2$ ($\phi 4,2 \text{ mm}$). Os estribos utilizados possuem seção transversal de $0,1963 \text{ cm}^2$ ($\phi 5 \text{ mm}$).

O concreto pré-moldado possui módulo de elasticidade $E = 3313 \text{ kN/cm}^2$, coeficiente de Poisson $\nu = 0,2$ e massa específica de $\rho = 25 \times 10^{-6} \text{ kN/cm}^3$. O concreto moldado no local possui módulo de elasticidade $E = 3067 \text{ kN/cm}^2$, coeficiente de Poisson $\nu = 0,2$ e massa específica de $\rho = 25 \times 10^{-6} \text{ kN/cm}^3$.

De forma geral, as propriedades dos materiais constituintes consideradas nas análises estão apresentadas na Tabela 1.

Na análise dos modelos sob cisalhamento direto, considerou-se a variação da resistência do concreto à compressão f_{ck} e, portanto, conseqüente variação do módulo de elasticidade considerado, conforme mostra a Tabela 2

Tabela 1 - Propriedades dos Materiais Constituintes.

Propriedades dos Materiais Constituintes			
Material	Módulo de Elasticidade (kN/cm ²)	Coeficiente de Poisson	Peso Específico (kN/cm ³)
AÇO	21000	0,3	78,5
CPM	3067	0,2	25
CML	3313	0,2	25

Tabela 2 – Variação do Módulo de Elasticidade do concreto moldado no local.

Variação do Módulo de Elasticidade do CML				
fck (MPa)	20	25	30	35
Módulo de Elasticidade (kN/cm ²)	2504	2800	3067	3313

Uma vez definidos os elementos finitos, parte-se para a elaboração do desenho geométrico da peça que será analisada. A modelagem geométrica do painel duplo treliçado foi baseada nas dimensões do painel duplo fabricado pela PremonIndústria de Pré-Fabricados Ltda, em Uberlândia, MG (Figura 7).

Figura 7 – Painel duplo treliçado fabricado pela Premom Indústria de Pré-Fabricados.



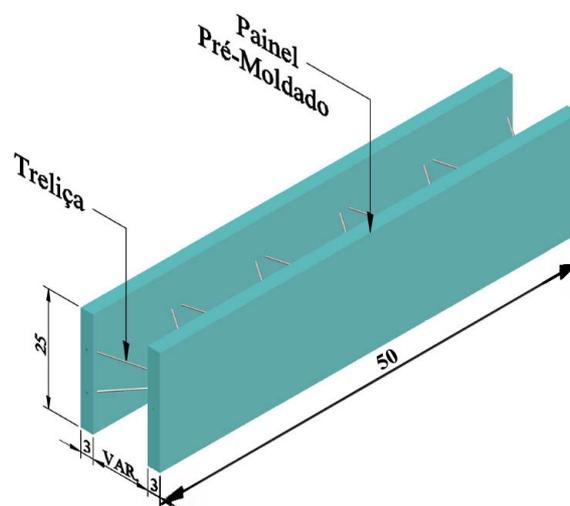
No programa ANSYS, modelou-se o painel duplo de concreto pré-moldado para análise de cisalhamento direto com espessura de 3,0 cm para cada painel e o concreto moldado no local com espessura de 13,0 cm sendo o comprimento da peça de 25,0 cm e altura de 50,0 cm (Figura 8). Para a análise de flexão modelou-se o painel duplo de concreto pré-moldado com altura (espessura) de 3,0 cm para cada painel e 13,0cm para a altura (espessura) do concreto moldado no local, largura da peça de 25,0 cm e comprimento de 300,0 cm.

Finalmente, uma das etapas mais importantes no desenvolvimento da modelagem numérica é a escolha apropriada da malha para, posteriormente, incluir as condições de contorno e carregamentos.

O estudo e proposta de uma malha com boa regularidade e com coincidência de nós das treliças eletrossoldadas espaciais e dos concretos adjacentes constituiu uma etapa trabalhosa, mas extremamente necessária para obter respostas estruturais adequadas. Na confecção de malha para que houvesse coincidência dos nós das treliças

eletrossoldadas espaciais e dos concretos adjacentes o modelo foi montado com diversos volumes para que a divisão dos elementos finitos e os respectivos nós coincidisse com os nós das treliças espaciais. Este procedimento é necessário para que o modelo não ficasse hipostático no comportamento do sistema treliçado.

Figura 8 – Dimensões do painel duplo treliçado.



A Figura 9 ilustra os volumes que formam o elemento estrutural. A Figura 10 mostra a divisão dos elementos finitos. É interessante observar que a malha ficou mais densa no centro da peça para que os nós dos elementos de CPM e CML coincidisse com os nós dos elementos da treliça espacial.

Figura 9 – Volumes da modelagem numérica do concreto [ANSYS].

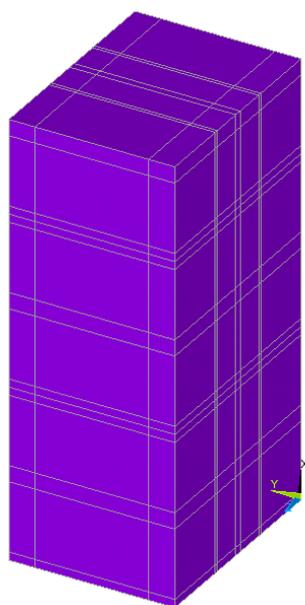
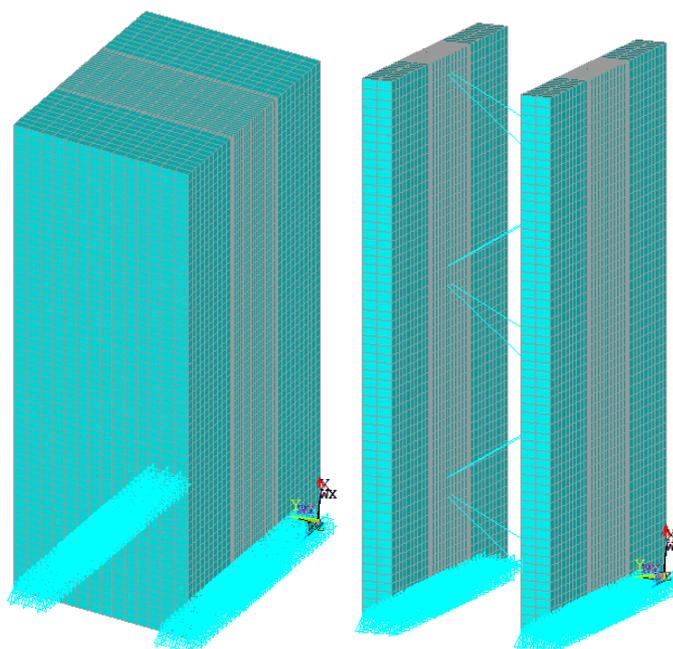
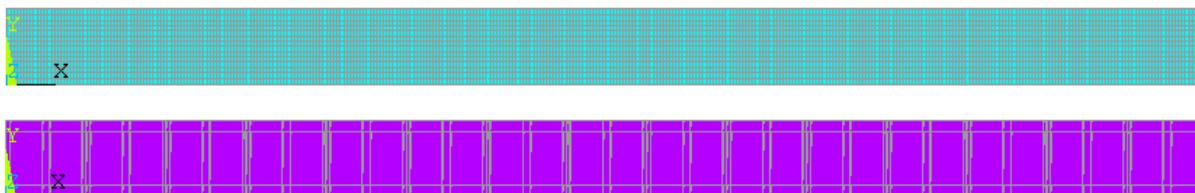


Figura 10 – Discretização em elementos finitos [ANSYS].



A Figura 11 ilustra a divisão dos elementos finitos e os volumes que formam o elemento estrutural no modelo numérico para o ensaio de flexão.

Figura 11 – Modelagem da viga sob flexão [ANSYS].



A análise do comportamento estrutural do painel duplo pré-moldado de concreto sobre cisalhamento direto no ANSYS foi desenvolvida observando-se 2 situações bastante distintas. Primeiramente admitiu-se que os elementos finitos de CPM e CML estavam unidos na interface por meio de seus nós. Esta análise representa uma situação de um único material, o que seria uma condição muito conservadora para a simulação numérica. No entanto, foi desenvolvida para fins de comparação dos resultados.

A existência de concretos de diferentes idades e a superfície de interface entre eles caracteriza uma situação de cisalhamento na interface entre dois concretos. Segundo a literatura técnica, ocorre transferência de tensões por meio da superfície de contato (adesão e atrito) e transferência por meio de armadura cruzando a superfície de contato. Vale ressaltar que, segundo El Debs (2000) o cisalhamento na interface entre dois concretos ocorre sempre que há tendência de deslizamento na interface de contato.

Para considerar a transferência por meio da superfície de contato, seria necessário utilizar as ferramentas numéricas de simulação de atrito entre as interfaces. Não sendo objeto de análise neste projeto, buscou-se considerar apenas a transferência por meio de armadura cruzando a superfície de contato, no caso as sinusóides da treliça e os estribos.

2.2 Condições de Contorno

Em relação às condições de contorno, foram impedidos os deslocamentos nos três eixos (X, Y e Z) dos painéis de concreto pré-moldado nas análises sob cisalhamento direto. A base do concreto moldado do local não teve nenhum deslocamento impedido (Figura 12). Para a análise da viga sob flexão, o painel de 3,0 metros é biapoiado com deslocamentos impedidos nos eixos X e Y de um lado e impedido apenas em Y na outra extremidade (Figura 13).

Figura 12 – Condições de contorno para a análise de cisalhamento direto [ANSYS].

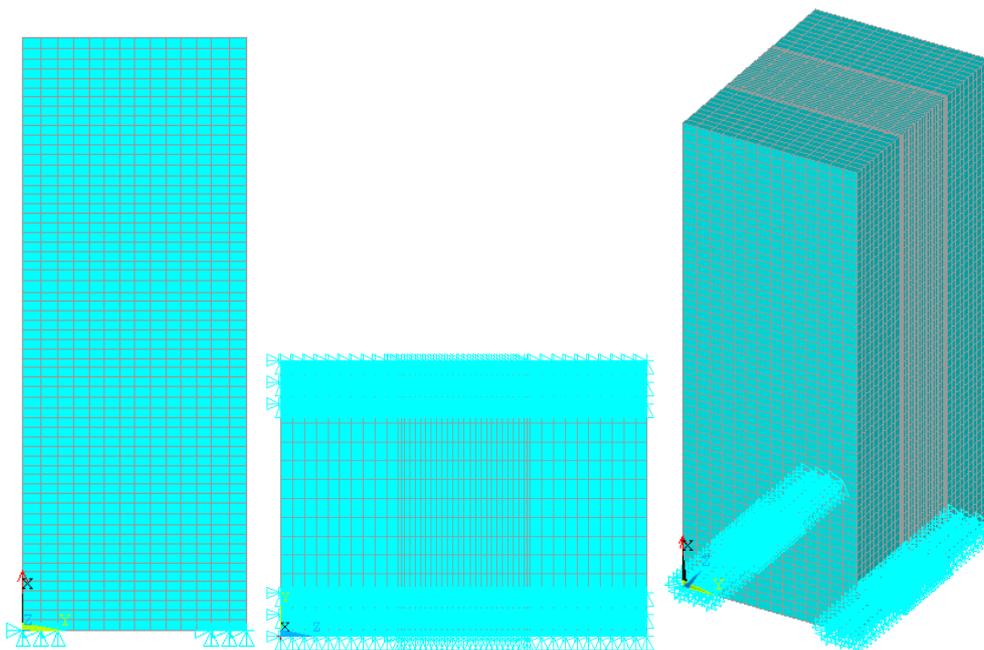
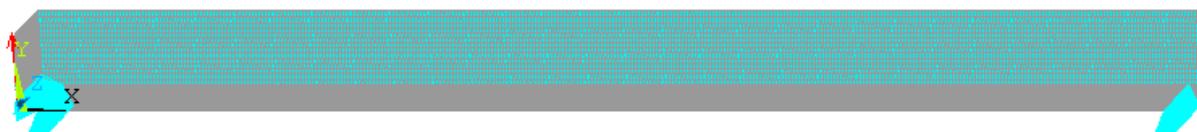


Figura 13 – Condições de contorno para a análise de flexão [ANSYS].



2.3 Carregamentos

Na análise de cisalhamento direto foi feita a aplicação de uma pressão de $0,4 \text{ kN/cm}^2$ distribuída uniformemente na face do concreto moldado no local com área de 325 cm^2 , resultando em uma força total de 130 kN . Este carregamento foi escolhido por representar a força de ruptura obtida em ensaio experimental realizado para um modelo com mesmas características físicas e geométricas, a fim de analisar a transferência de cisalhamento entre as faces dos concretos de diferentes idades e entre a armadura e o concreto, como ilustrado na Figura 14.

Na análise dos painéis sob flexão foi feita a aplicação de força concentrada de 80 kN a 100 cm e a 200 cm do início da peça (Figura 15). A aplicação de força nesses dois pontos gera um momento uniforme no meio da peça. Essa condição de carregamento permite análise do trecho central, entre as forças concentradas, sob flexão pura e análise da transferência de cisalhamento entre as faces dos concretos de diferentes idades e entre a armadura e o concreto.

Figura 14 – Carregamento vertical aplicado na face superior do concreto moldado no local para análise sob cisalhamento direto [ANSYS].

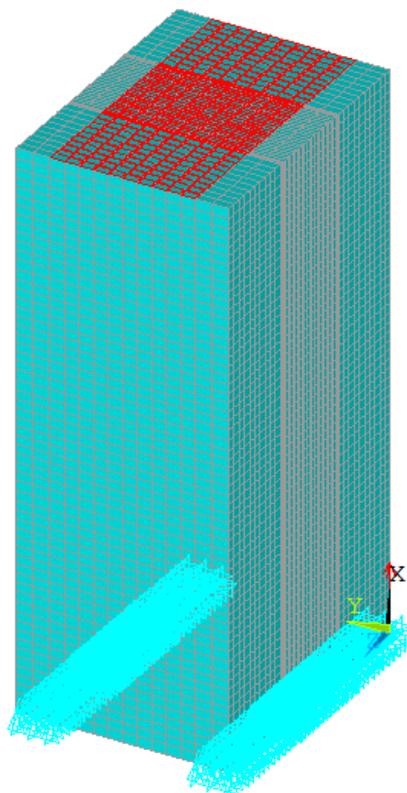


Figura 15 – Carregamento do modelo para análise sob flexão [ANSYS].



3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

São apresentados nesta seção os resultados numéricos obtidos nas análises sob cisalhamento direto e flexão de uma viga biapoiada formada por painéis duplos treliçados.

3.1 Cisalhamento Direto

A análise do painel duplo pré-moldado de concreto sobre cisalhamento direto no ANSYS considerando todos os elementos finitos de CPM e CML unidos na interface produziu os resultados presentes na Tabela 3. Em busca da influência da resistência dos materiais constituintes na aderência entre o painel pré-moldado e concreto moldado no local, foi variada a resistência característica do concreto (f_{ck}) moldado no local. Conforme dito

anteriormente, esta análise representa uma condição muito conservadora para a análise em estudo.

Visando considerar apenas a transferência por meio de armadura cruzando a superfície de contato, no caso as sinusóides da treliça e os estribos, pode-se observar, na Tabela 4, os resultados numéricos das análises considerando duas interfaces distintas bem como a variação da resistência do concreto moldado no local.

Tabela 3 – Resultados obtidos considerando união dos nós na interface entre os dois concretos e diferentes valores de f_{ck} no ensaio de cisalhamento direto.

Parâmetros Analisados	f_{ck} do Concreto Moldado no Local			
	20 MPa	25 MPa	30 MPa	35 MPa
Deslocamento máximo na direção X - vertical (cm)	$6,201.10^{-3}$	$5,758.10^{-3}$	$5,414.10^{-3}$	$5,135.10^{-3}$
Tensão máxima no CML pelo critério de Von Mises (kN/cm ²)	0,980	0,968	1,015	1,075
Tensão normal máxima no CML na direção X - vertical (kN/cm ²)	-1,201	-1,185	-1,171	-1,232
Tensão axial máxima nas barras da treliça (kN/cm ²)	-3,594	-3,491	-3,404	-3,329

Tabela 4 – Resultados obtidos considerando a transferência de esforços apenas pelas barras da treliça e estribos na interface entre os dois concretos e diferentes valores de f_{ck} no ensaio de cisalhamento direto.

Parâmetros Analisados	f_{ck} do Concreto Moldado no Local			
	20 MPa	25 MPa	30 MPa	35 MPa
Deslocamento máximo na direção X - vertical (cm)	$1,087.10^{-2}$	$1,028.10^{-2}$	$9,842.10^{-3}$	$9,498.10^{-3}$
Tensão máxima no CML pelo critério de Von Mises (kN/cm ²)	8,992	9,428	9,793	10,107
Tensão normal máxima no CML na direção X - vertical (kN/cm ²)	8,414	8,833	9,183	9,485
Tensão axial máxima nas barras da treliça (kN/cm ²)	-13,435	-13,187	-12,968	-12,770

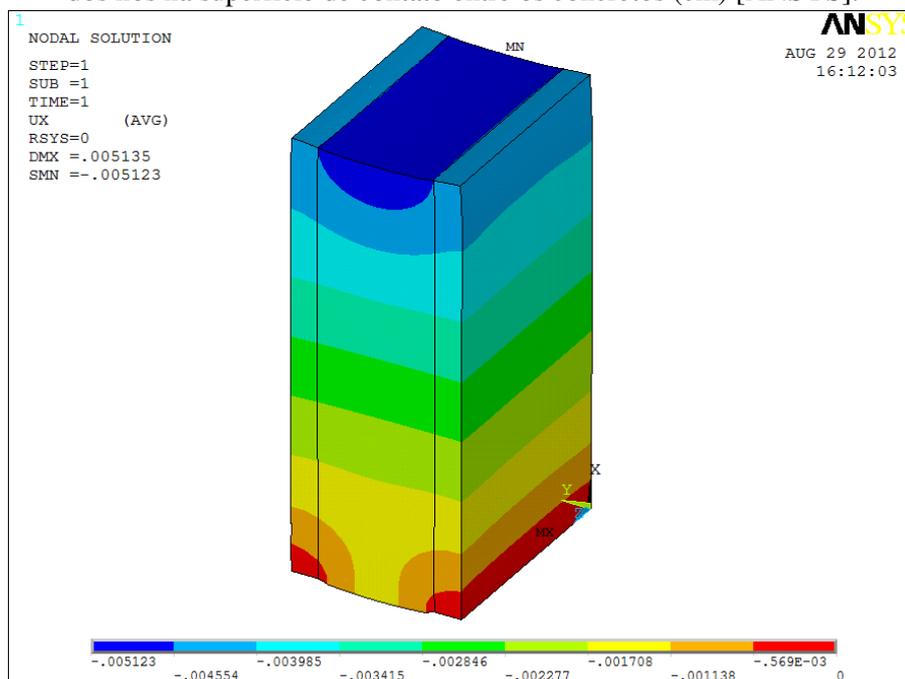
As Figuras 16, 17, 18, 19 e 20 mostram as imagens obtidas no programa computacional ANSYS referentes às análises numéricas desenvolvidas, para os seguintes resultados, respectivamente: deslocamento no eixo vertical; tensão na direção vertical; tensão pelo critério de Von Mises; deslocamento na face de contato entre CML e CPM; e tensão axial nas barras da treliça.

A Figura 16 mostra que os maiores deslocamentos na direção vertical estão no CML na região onde a força é aplicada. É importante observar que a resistência dos materiais envolvidos, especificamente f_{ck} do concreto, influencia no deslocamento relativo entre as

placas. Quanto maior o valor da resistência do concreto moldado no local, menores são os deslocamentos relativos entre os concretos. Esta variação no valor de deslocamento relativo entre as partes atinge cerca de 20%, para a situação def_{ck} de 20MPa para o f_{ck} de 35MPa.

Em linhas gerais, conforme apresentado na Tabela 3, a variação das tensões nos materiais – concreto e armadura – foi muito pequena considerando a união das interfaces para as variações de resistência do concreto estudadas para o CML. O maior efeito observado da influência do f_{ck} do CML acontece para os deslocamentos.

Figura 16 – Deslocamentos na direção longitudinal (X) obtidos na análise com $f_{ck}= 35$ MPa e união dos nós na superfície de contato entre os concretos (cm) [ANSYS].



Entretanto, admitindo-se a ligação entre as interfaces apenas por meio da treliça eletrossoldada e dos estribos, os deslocamentos aumentam consideravelmente, apresentando deslocamento relativo entre os elementos de concreto estudados (Figura 17).

Uma vez que o carregamento é aplicado na região do CML e o modelo está apoiado nas regiões de concreto pré-moldado, ocorre uma concentração de tensão nestas regiões que apresentam ainda menor área de distribuição. A Figura 18 permite visualizar as tensões normais na direção x considerando ligação entre os nós da interface. Observam-se as tensões normais de tração na região inferior em CML e as tensões de compressão nas regiões inferiores em CPM.

Considerando a transferência de tensões por meio das armaduras que cruzam a interface de ligação entre os concretos de diferentes idades, tem-se na Figura 19 a distribuição das tensões normais no CPM e CML. Observa-se claramente a diferença de tensões da região da interface para cada superfície de concreto.

Figura 17 – Deslocamentos na direção longitudinal (X) obtidos na análise com $f_{ck}=35$ MPa e ligação entre as interfaces por meio das armaduras (cm) [ANSYS].

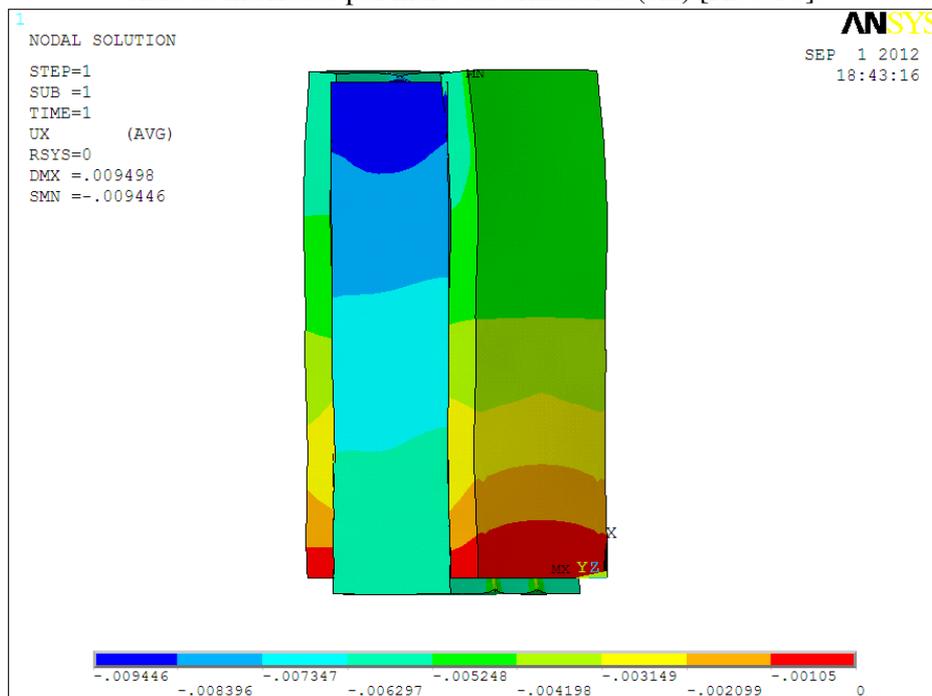


Figura 18 – Tensões normais na direção X obtidas na análise com ligação dos nós entre os concretos na interface e $f_{ck}=35$ MPa (kN/cm^2) [ANSYS].

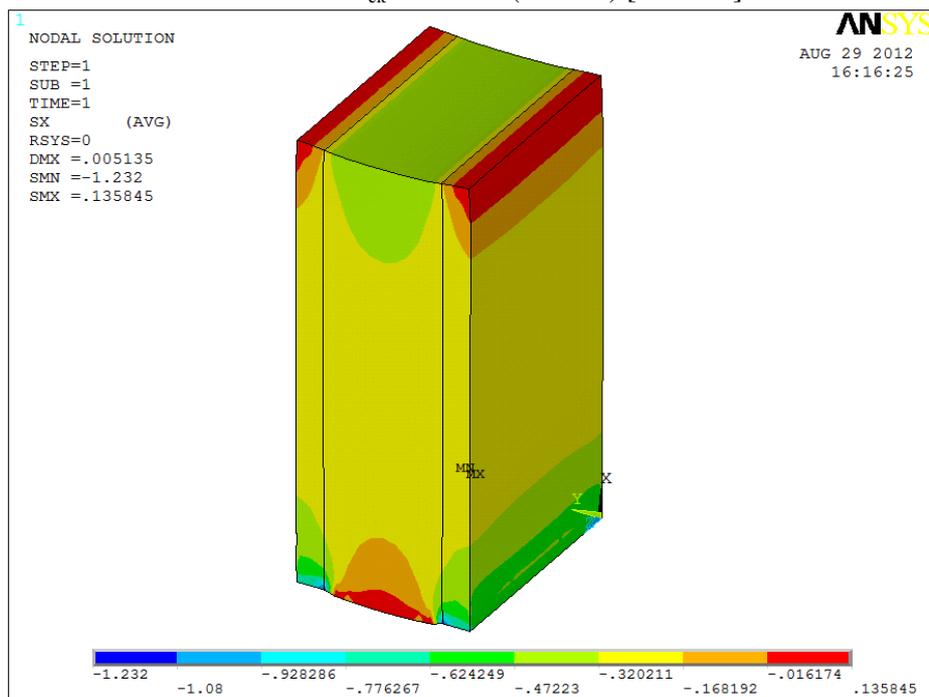
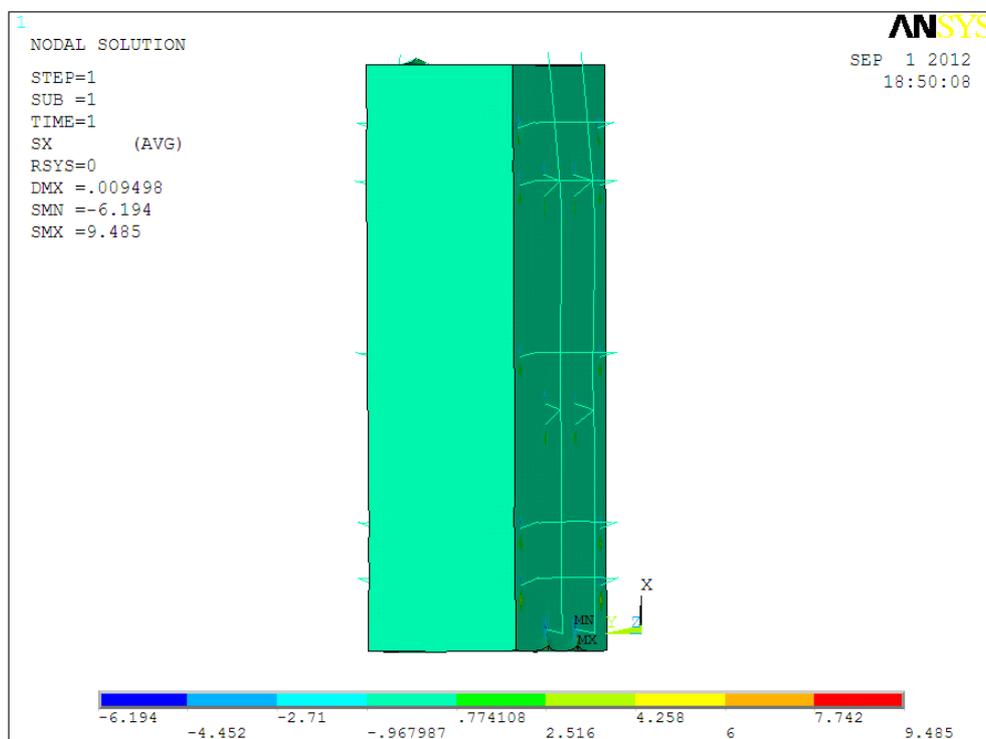


Figura 19 – Tensões normais na direção X obtidas na análise com transferência de tensões por meio das armaduras que cruzam a interface e $f_{ck} = 35 \text{ MPa (kN/cm}^2)$ [ANSYS].



(a) Concreto pré-moldado

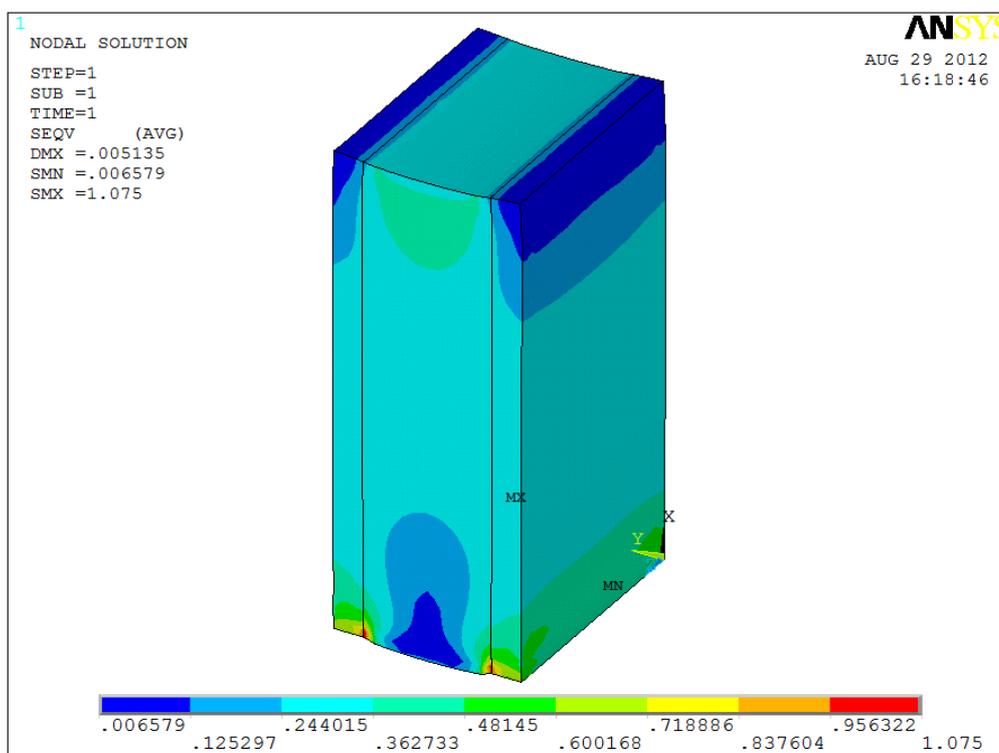


(b) Concreto moldado no local

A Figura 20 mostra a distribuição das tensões de Von Mises obtidas na análise com $f_{ck}=35\text{MPa}$. Dentre os critérios de falha, o critério das tensões de Von Mises considera que um material dúctil começa a escoar em um local onde a tensão de Von Mises se torna igual ao limite de tensão. Na maioria dos casos, o limite de escoamento é usado como limite de tensão.

A Figura 21 mostra que as tensões críticas dos banzos da treliça eletrossoldada se concentraram na base do modelo, sendo estas de compressão. Observa-se que os banzos trabalham comprimidos, enquanto as diagonais e os estribos trabalham sob tração na análise de solitação por cisalhamento direto. Em geral, nas diagonais, o valor médio das tensões axiais obtido foi em torno de $0,5 \text{ kN/cm}^2$, o que é extremamente baixo, porém, coerente com a consideração de união de nós de concreto na interface de ligação.

Figura 20 – Tensões de Von Mises obtidas na análise com $f_{ck}=35\text{MPa}$ (kN/cm^2) [ANSYS].



As tensões nas armaduras considerando a transferência de tensões por meio das armaduras que cruzam a interface de contato podem ser observadas na Figura 22. Como se pode observar, nesta situação de fato as tensões são bastante superiores, caracterizando a transferência de esforços do trecho central de concreto moldado no local, que recebe o carregamento externo e transfere para os trechos de concreto pré-moldado, por meio das armaduras que cortam a interface.

Figura 21 - Tensão axial nas barras da treliça obtidas na análise com ligação dos nós entre os concretos na interface e $f_{ck}=35\text{MPa}$ (kN/cm^2) [ANSYS].

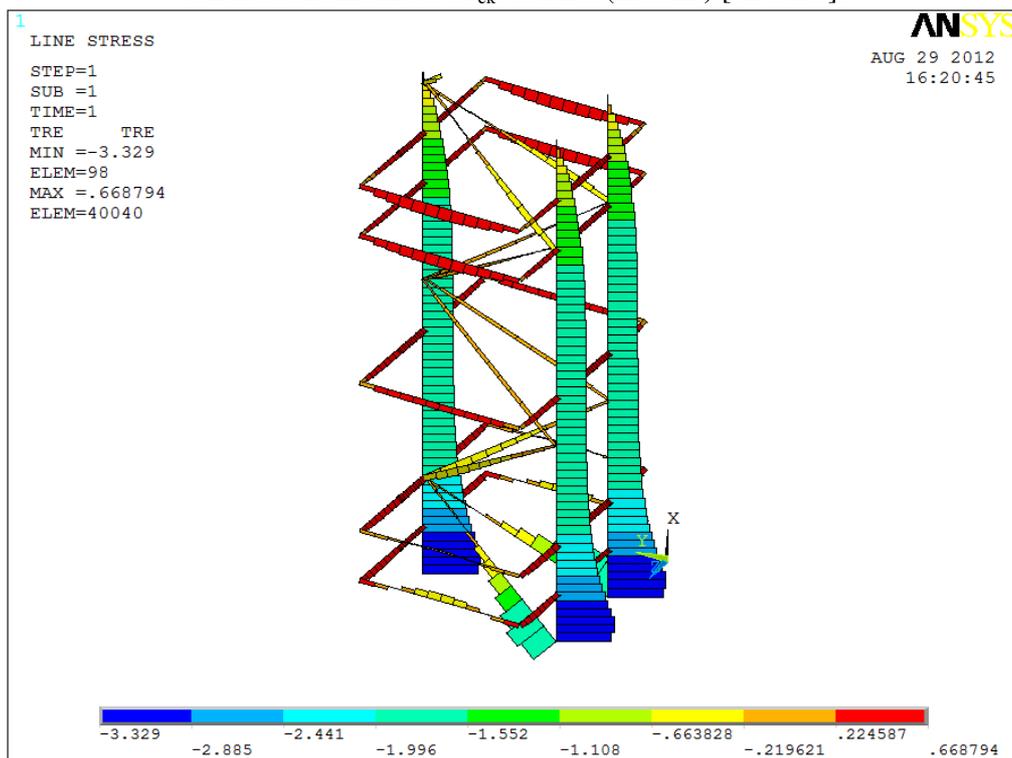
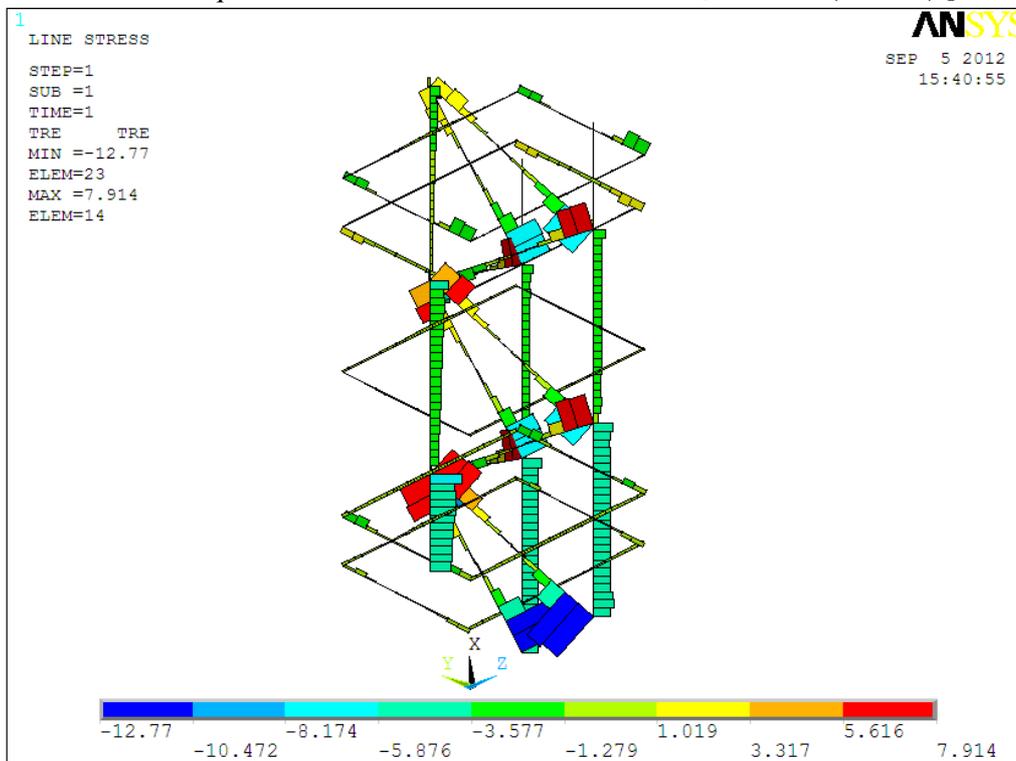


Figura 22 - Tensão axial nas barras da treliça obtidas na análise com transferência de tensões por meio das armaduras que cruzam a interface entre concretos e $f_{ck}=35\text{MPa}$ (kN/cm^2) [ANSYS].



Foi construído um modelo experimental piloto do ensaio de cisalhamento direto (Figura 23) para possibilitar a comparação com o modelo numérico. Esse modelo experimental foi construído com as mesmas propriedades geométricas e possui CML e CPM com f_{ck} de 35 MPa. Ao ser ensaiado sobre cisalhamento direto apresentou resultados semelhantes ao da análise numérica linear o que confirma a coerência do modelo numérico com a realidade.

O modelo foi ensaiado até romper com uma força sobre o CML de aproximadamente 130 kN. Quando comparado os deslocamentos verticais do modelo experimental com o modelo numérico nas mesmas condições (CML e CPM com f_{ck} de 35 MPa com força de 130kN aplicada sobre o CML) observa-se a conformidade entre os resultados.

O modelo piloto foi executado sem molhar as superfícies de CPM, o que provoca inicialmente uma separação das interfaces entre os concretos de diferentes idades, uma vez que durante o processo de cura, há perda de água no contato entre o CPM e o CML. A ruptura do modelo piloto ocorreu por destacamento nesta interface, que já estava previamente sem adesão (Figura 24). No entanto, as armaduras que cruzam os trechos concretados foram os elementos responsáveis pela transferência do carregamento aplicado no CML para o CPM.

Figura 23 – Modelo experimental ensaiado no laboratório da FECIV-UFU.

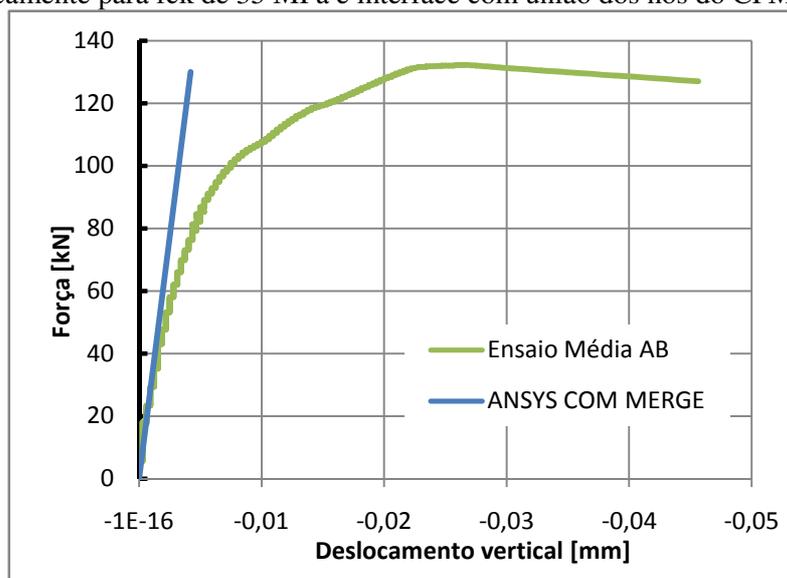


Figura 24 – Ruptura do modelo piloto.



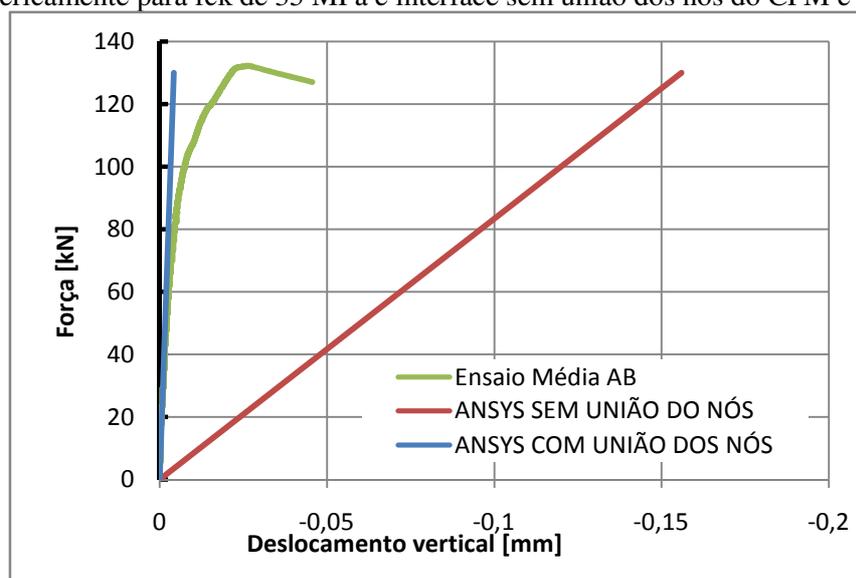
A Figura 25 mostra uma maior compatibilidade dos resultados experimentais com os resultados numéricos, com relação ao trecho linear do comportamento do modelo sob cisalhamento direto, admitindo-se a união dos nós entre os elementos de concreto pré-moldado e moldado no local na região da interface. A modelagem com união dos nós consiste em uma aproximação razoável para até 50% da carga de ruína (ou seja, aplicável pra variações em regime de serviço). Observa-se que os deslocamentos relativos são muito pequenos, da ordem de 0,005mm para o resultado numérico sob ação da força de ruptura, no caso de 130kN.

Figura 25 – Relação Força (kN) x Deslocamento vertical (mm) obtida experimentalmente e numericamente para f_{ck} de 35 MPa e interface com união dos nós do CPM e CML.



Porém, desconsiderando-se as duas parcelas importantes de transferência de esforços, no caso a adesão entre os elementos de concreto, que embora limitada a baixas solicitações, é a primeira parcela mobilizada no carregamento, e o atrito, que é a parcela que se manifesta após destruída a adesão é função da tensão normal que atua na interface, os resultados de deslocamentos são muito superiores. Neste caso, apenas a treliça espacial e os estribos transferem o carregamento externo para os elementos pré-moldados. Os deslocamentos obtidos podem ser visualizados na Figura 26.

Figura 26 – Relação Força (kN) x Deslocamento vertical (mm) obtida experimentalmente e numericamente para f_{ck} de 35 MPa e interface sem união dos nós do CPM e CML.



Nota-se, finalmente, a importância de uma análise numérica nem tão conservadora, como o caso de união dos nós entre os elementos de concreto na interface e nem tão pessimista, quando se despreza as parcelas de adesão e atrito para o comportamento sob cisalhamento direto dos modelos em estudo. Neste ponto é importante observar a necessidade de utilizar recursos que permitam levar em conta a presença do atrito entre as interfaces como parcela de transferência de cisalhamento entre as interfaces.

3.2 Vigas sob Flexão

Na construção do modelo numérico do painel duplo sob flexão foi utilizada a armadura de flexão mais comumente empregada para utilização em muros de contenção pela Premon Indústria de Pré-Fabricados Ltda, Uberlândia, MG (Figura 27). Na face de pré-moldado sujeita a esforços positivos foram dispostas 2 barras de 10mm de diâmetro.

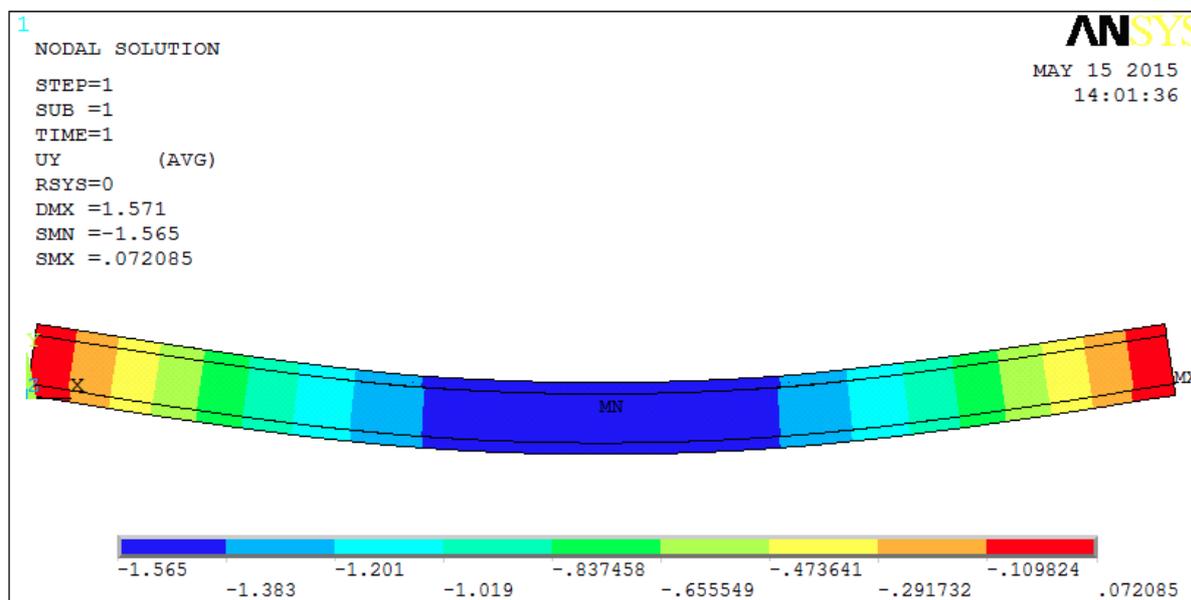
Para o modelo das vigas sob flexão analisadas no ANSYS o f_{ck} do concreto moldado no local é igual a 30MPa e o f_{ck} do concreto pré-moldado igual a 35MPa.

Figura 27 – Armaduras utilizadas no painel duplo em muros de contenção.



A Figura 28 mostra a imagem obtida no programa ANSYS para o deslocamento do painel no eixo vertical. Observa-se um deslocamento vertical máximo de 1,571 cm no centro do painel.

Figura 28 – Deslocamentos verticais - direção y (cm) [ANSYS].



As tensões normais na direção do eixo longitudinal da peça estrutural, no caso a direção x, podem ser visualizadas na Figura 29. A Figura 30 permite observar as tensões normais no concreto pré-moldado, a Figura 31(a) às mesmas tensões, porém no concreto de

preenchimento, no caso o concreto moldado in loco (CML) e a Figura 31(b) permite visualizar um detalhe dessas tensões no CML na região do cruzamento das armaduras.

Através das análises das tensões normais na direção do eixo longitudinal observa-se a flexão na parte de inferior do painel e compressão na parte superior. Os pontos de tensões críticas são a região de aplicação da força concentrada, região dos vínculos externos de apoio do modelo e a região da interface entre as barras da treliça, o CML e o CPM.

Figura 29 – Tensões normais na direção X (kN/cm^2) [ANSYS].

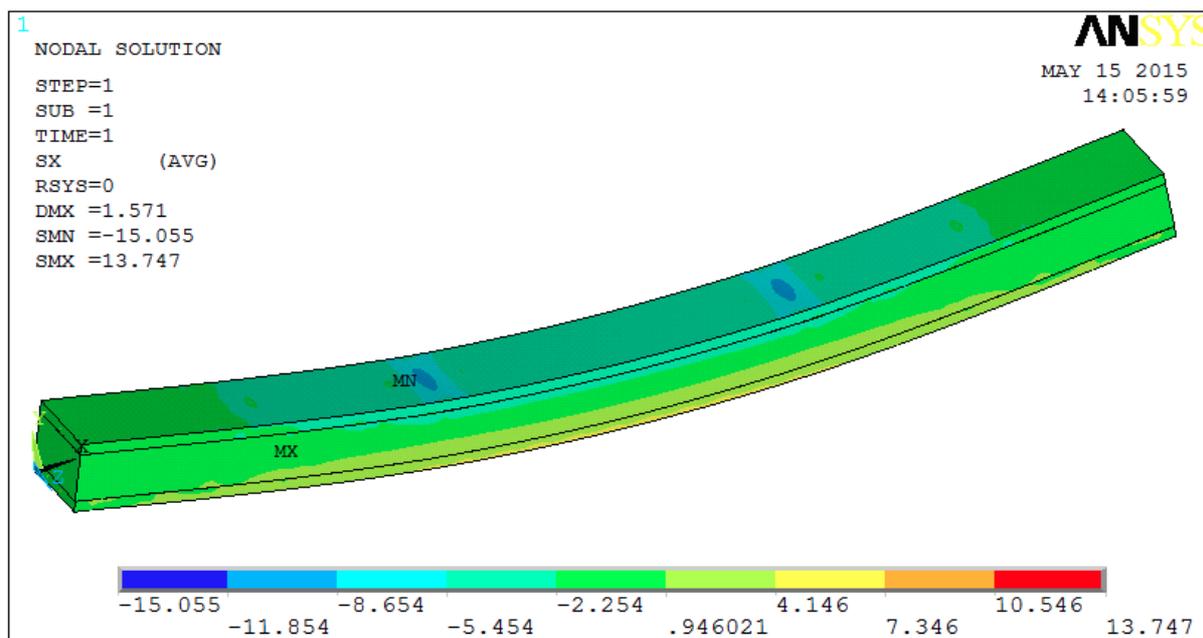


Figura 30 – Tensões normais na direção X dos elementos pré-moldados (kN/cm^2) [ANSYS].

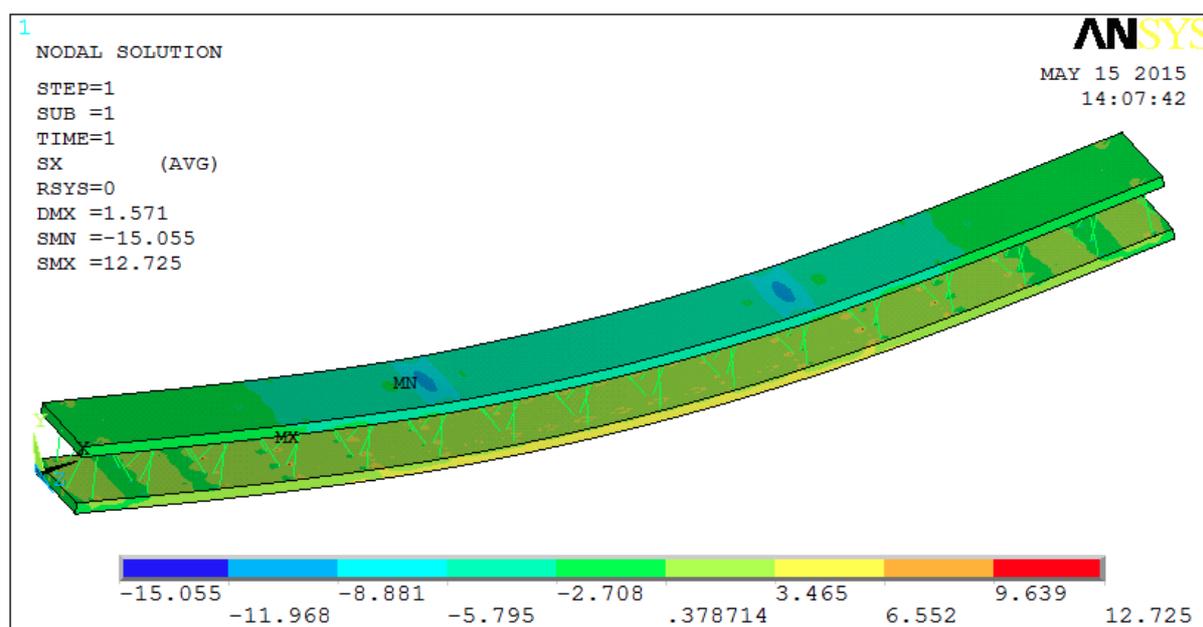
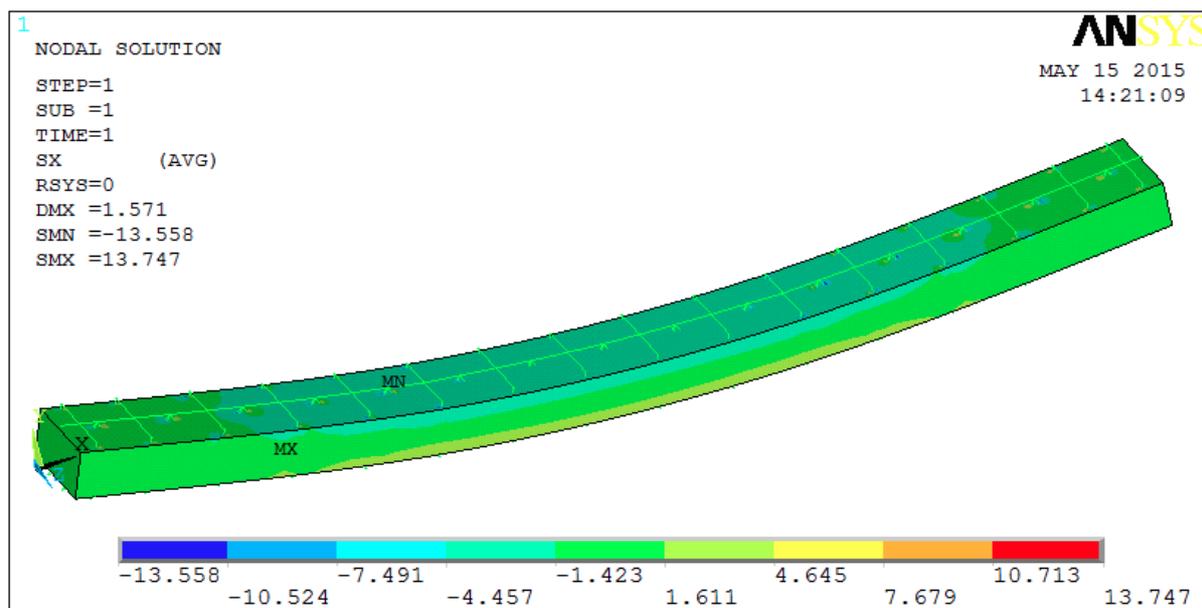
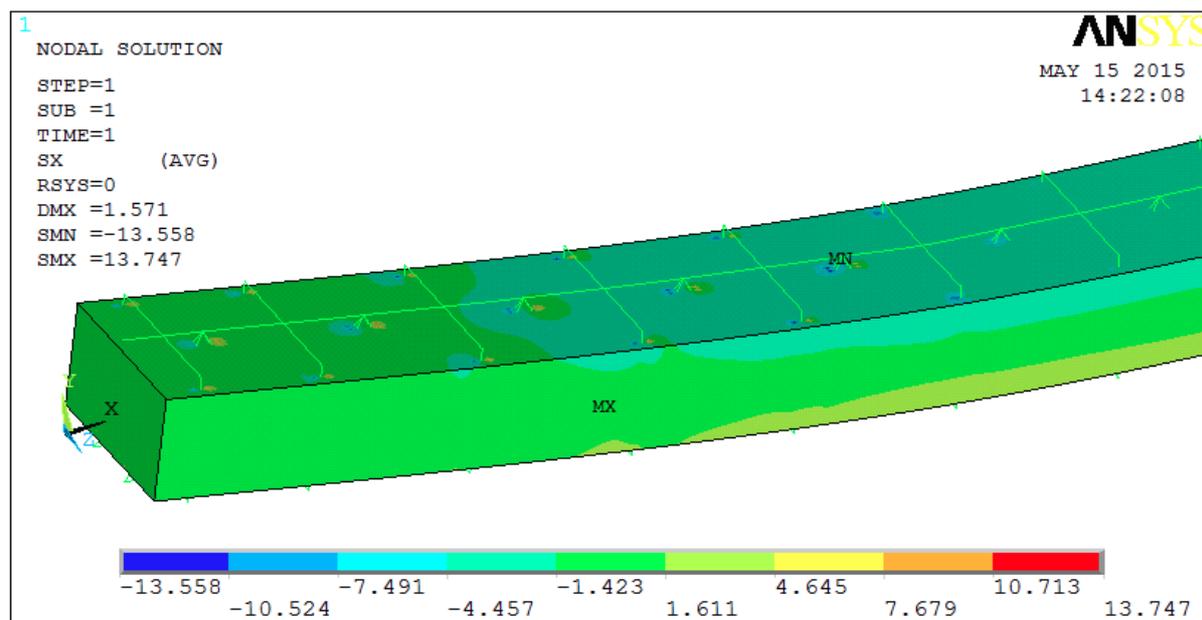


Figura 31 – Tensões normais na direção X dos elementos moldados no local (kN/cm²) [ANSYS].



(a) Concreto moldado no local

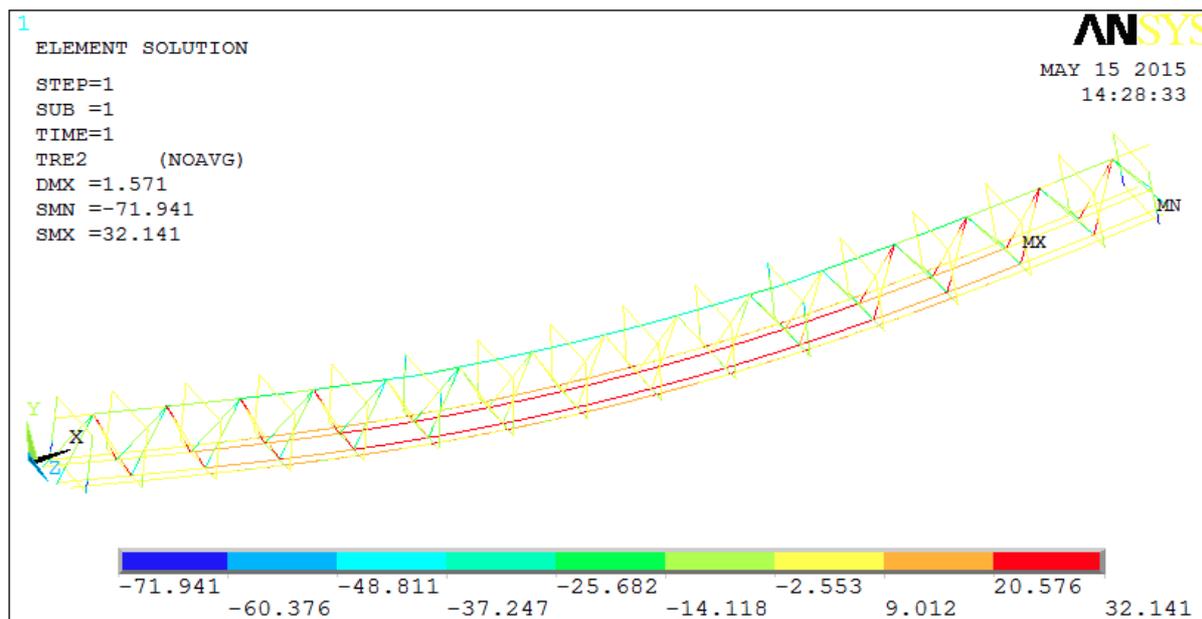


(b) Detalhe da região de cruzamento das armaduras

A Figura 32 mostra a distribuição das tensões axiais na armadura do modelo, que é composta pela treliça, pelos estribos e pelas barras longitudinais

A análise do ANSYS para as tensões axiais nas armaduras do painel duplo treliçado mostra que as tensões críticas concentram-se nos estribos da região do apoio e da aplicação da carga concentrada. Também são críticas nas barras longitudinais para absorção do momento positivo no centro da peça e nas sinusóides da treliça localizadas nas extremidades do painel.

Figura 32 – Tensão axial nas barras da treliça, nos estribos e nas barras longitudinais (kN/cm²) [ANSYS].



A Tabela 5 permite observar que o aumento da resistência característica do concreto adotada para o CML provoca redução, embora muito pequena, do deslocamento máximo na direção Y e a redução da tensão normal máxima na interface entre a armadura, o CML e o CPM.

Tabela 5 – Resultados obtidos considerando a transferência de esforços apenas pelas barras da treliça e estribos na interface entre os dois concretos e diferentes valores de f_{ck} para o CML no ensaio de flexão.

Parâmetros Analisados	f_{ck} do Concreto Moldado no Local	
	20 MPa	30 MPa
Deslocamento máximo na direção Y - vertical (cm)	1,768	1,571
Tensão normal máxima na direção X - longitudinal (kN/cm ²)	-15,506	-15,055

4 CONCLUSÕES

As principais conclusões obtidas das análises deste projeto de pesquisa podem ser agrupadas como segue:

- A escolha de uma malha adequada em termos de discretização do modelo é muito importante para a obtenção de resultados coerentes;
- Uma vez admitida aderência total entre as peças e comportamento elástico linear, observou-se a importância da resistência dos materiais envolvidos nas análises;

- As análises de cisalhamento direto com variação do f_{ck} do CML mostraram que quanto maior o f_{ck} , menores serão os deslocamentos relativos entre as faces do CML e CPM;
- A transferência de tensões de cisalhamento na interface entre concretos de diferentes idades, no caso as paredes de concreto pré-moldado e o preenchimento de concreto moldado no local, ocorre mobilizando parcelas de adesão, atrito e mecânica, sendo esta última representada pelas armaduras que cruzam a interface;
- Desprezar as parcelas representadas pela adesão e atrito torna a análise muito pessimista e superestima consideravelmente os deslocamentos produzidos, além de aumentar bastante as tensões nas armaduras;
- Por meio do desenvolvimento do modelo experimental piloto reiterou-se o entendimento de que a aderência e atrito entre as faces do CPM e do CML constituem importantes funções estruturais. Na prática, caso a aderência não ocorra adequadamente, tem-se comprometimento das funções estruturais. Daí a importância da cura bem feita e de molhar adequadamente os painéis duplos treliçados antes de concretar o preenchimento com concreto moldado in loco;
- Na aplicação dos painéis como elementos estruturais de vigas, especialmente no caso dos muros de arrimo, observa-se uma grande vantagem em termos construtivos, eliminando-se as formas, mas exigindo cuidado na vibração durante a concretagem in loco. Com relação ao comportamento estrutural, entende-se que a proposta é bastante adequada tanto em termos de tensões como deslocamentos.

5 AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Francisco Romero Gesualdo pela colaboração na elaboração dos modelos no programa ANSYS. Agradeço ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e à PROPP-UFU (Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação da Universidade Federal de Uberlândia) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 14862: Armaduras treliçadas e letrossoldadas-Requisitos”. Rio de Janeiro, 2002.

ALBUQUERQUE, A. T. Otimização de pavimentos de edifícios com estruturas de concreto pré-moldado utilizando algoritmos genéticos. São Carlos. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007.

ALMEIDA, R.O; LIMA, M. C. V.; CASTILHO, V. C. “Aspectos arquitetônicos e soluções estruturais em concreto pré-moldado em Uberlândia/MG”. In: 2º Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto Pré-moldado. São Carlos, 2 e 4 de novembro, 2009.

ANSYS®User’s Manual. Versão 11.0.

BALLARIN, A. W. Desempenho das ligações de elementos estruturais pré-moldados de concreto. São Carlos. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade São Paulo, 1993. 255p.

EL DEBS, M. K. Concreto Pré-Moldado: Fundamentos e Aplicações. Universidade de São Paulo. São Carlos: EDUSP, 2000.

FERNANDES, R. M.; EL DEBS, M. K. Análise da capacidade resistente de consolos de concreto armado considerando a contribuição da armadura de costura. Cadernos de Engenharia de Estruturas, São Carlos, v. 7, n. 25, p.103-128, 2005.

LEONHARDT, F., MÖNNING, E. (1977). Construções de concreto: princípios básicos de dimensionamento de estruturas de concreto armado. Rio de Janeiro: Interciência, v. 1.