

MEMORIAS

13 AL 17 DE NOVIEMBRE DEL 2000
PUNTA DEL ESTE - URUGUAY

SUDAMERICANAS DE INGENIERIA
1950 2000
XXIX JUBILEO XIX
ESTRUTURAL

JUBILEO

Prof. Julio Ricaldoni

ORGANIZAN:

- Instituto de Estructuras y Transporte
- Facultad de Ingeniería Universidad de la República
- Asociación Sudamericana de Ingeniería Estructural



Listado de Trabajos



Listado de Autores



Listado de Temas



Búsqueda
de trabajos



Auspicientes



Conferencias



Historia



Salir

Evaluadores

Agrelo, Vicente
Aguado de Cea, Antonio
Alcocer, Sergio
Ambrosini, Daniel
Antunes, Helena Carmo
Arze L. Elías
Astroza, Maximiliano
Awruch, Armando M.
Barlek, Rodolfo
Beckeres, Pierre
Benito, Raúl D.
Bignoli, Arturo J.
Blessman, Joaquín
Campagnolo, João Luiz
Campos Filho, Américo
Carmona, Juan S.
Carnicer, Roberto S.
Caro, Santina
Cataldo, José Alberto
Cechella Isaia, Geraldo
Cisilino, Adrian
Cleto, Agosti
Colacce, Carlos
Colmar Vellasco, Pedro
Consoli, Nilo
Cremonini, Ruy A.
Creus, Guillermo J.
Crisafulli, Francisco
Cudmani, Roberto D.
Curutchet, Raúl A.
da Conceição Domingues Shehata, Lidia
Dal Molin, Denise C. C.
Darin, Gustavo
Davila, Virginia Rosito
de Faria Telles, Jose Claudio
De Las Casas, Estevam
del Carril, Tomás
Del Villar, José M.
Doz, Graciela Nora
Duarte Ribeiro, José Luiz

INSTITUTO DE ESTRUCTURAS Y TRANSPORTE Prof. Julio Ricaldoni

FACULTAD DE INGENIERIA UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA

Avda. Julio Herrera y Reissig 565

C.P. 11300 - Montevideo - URUGUAY

Tels.: (598-2) 711 0524 - 711 0993 - 711 2643

Fax: (598-2) 711 2886

E-mail: iet@ing.edu.uy - www.ing.edu.uy/iet/

COMISIÓN ORGANIZADORA

Presidente
Prof. Ing. Gerardo Rodríguez
Secretario
Dr. Ing. Alvaro Gutiérrez
Vocales
Prof. Ing. Susana García
Dr. Ing. Berardi Sensale
M.Sc. Ing. Atilio Mórquico
Prof. Ing. Santina Caro

13 AL 17 DE NOVIEMBRE DEL 2000
PUNTA DEL ESTE - URUGUAY

SUDAMERICANAS DE INGENIERIA
1950 2000
XXIX JUBILEO XIX
ESTRUTURAL

JUBILEO
Prof. Julio Ricaldoni

Salir

Atrás



JUBILEO
Prof. Julio Ricaldoni

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO À FLEXÃO DE VIGA PRÉ-MOLDADA DE CONCRETO ASSOCIADA COM LAJE MOLDADA NO LOCAL PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Daniel de Lima Araújo: Professor da Escola de Engenharia Civil da UFG e doutorando da EESC / USP – dlaraujo@sc.usp.br

Mounir Khalil El Debs: Professor associado do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC / USP – mkdebs@sc.usp.br

Escola de Engenharia de São Carlos – USP
Departamento de Engenharia de Estruturas
Av. Dr. Carlos Botelho, 1465
São Carlos – SP – Brasil – 13560-250

SUMARIO

A associação de elementos pré-moldados com concreto moldado no local é uma das aplicações mais comuns da pré-moldagem, recebendo a denominação de peças compostas. Essa associação tem sido utilizada com sucesso na construção de pontes, onde as vigas longitudinais do tabuleiro são pré-moldadas e a laje é moldada no local. Algumas das principais vantagens do emprego das vigas compostas são a maior rapidez na execução da obra, com relação à solução unicamente em concreto moldado no local, e a redução de fôrmas e cimbramentos.

Diversos estudos têm sido realizados para compreender o comportamento à flexão das vigas compostas, quase todos através de análises experimentais. Neste trabalho, o comportamento à flexão dessas vigas é analisado através de simulação numérica no programa ANSYS, baseado no método dos elementos finitos. O principal objetivo é comparar os resultados obtidos pela simulação numérica com resultados obtidos de ensaios experimentais de modo a verificar o quanto uma simulação por elementos finitos pode representar o comportamento real desse tipo de estrutura. Para tanto, os resultados obtidos da simulação são comparados com resultados experimentais obtidos pelos autores a partir dos ensaios de duas vigas compostas de concreto. Observou-se uma boa concordância dos resultados numéricos com os experimentais. Contudo, essa concordância foi obtida após numerosas análises, mostrando que os resultados da simulação numérica são fortemente influenciados pela modelagem da estrutura e pela correta escolha de modelos constitutivos para os materiais.



1 - INTRODUÇÃO

A associação de elementos pré-moldados com concreto moldado no local é uma das aplicações mais comuns da pré-moldagem. Essa associação recebe normalmente as denominações de elementos compostos, peças compostas ou estruturas compostas. Cabe ressaltar que essas denominações se aplicariam mais adequadamente às estruturas formadas por dois materiais diferentes como, por exemplo, viga metálica e laje de concreto, também bastante empregadas na construção civil. Mas, devido à similaridade das associações, essas denominações também podem ser usadas para representar as estruturas formadas pela associação de elementos pré-moldados de concreto com concreto moldado no local.

Esse tipo de associação tem sido utilizado com sucesso em construções de pontes e pavimentos de edifícios de concreto. Na figura 1 está ilustrada algumas seções típicas. O elemento pré-moldado serve de fôrma para o concreto moldado no local, eliminando ou reduzindo drasticamente a utilização de fôrmas e cimbramentos. A seção resistente do elemento pré-moldado é ampliada após o endurecimento do concreto moldado no local, que passará a absorver parte dos esforços atuantes na estrutura desde que garantida a transferência de esforços através da interface entre o concreto pré-moldado e o concreto moldado no local.

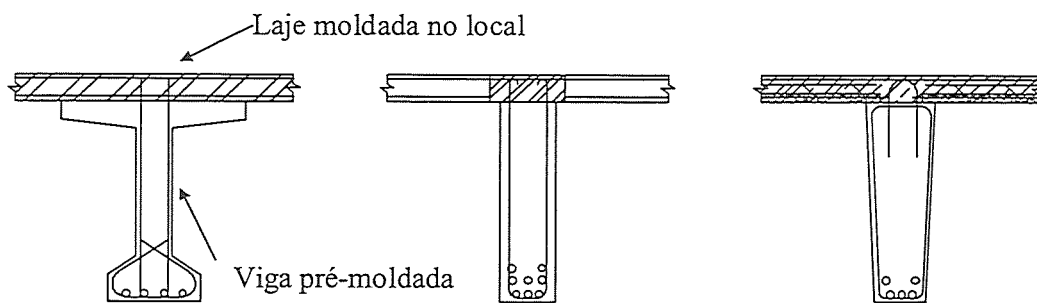


Figura 1 – Seções típicas de vigas compostas com laje moldada no local.

Com o emprego de peças compostas é possível beneficiar-se de grande parte das vantagens da pré-moldagem, como, por exemplo, a facilidade de execução dos elementos em fábricas e a rápida montagem na obra, e também das vantagens da solução em concreto moldado no local sem a utilização de fôrmas e cimbramentos. Algumas das vantagens mais significativas do uso de peças compostas são:

- redução do peso próprio dos elementos pré-moldados, o que resulta na utilização de equipamentos mais leves para o transporte e montagem da estrutura;
- comparado com a solução exclusivamente em elementos pré-moldados, as peças compostas apresentam menores dificuldades para a realização da ligação entre os elementos pré-moldados, pois a continuidade entre elas é garantida pelo concreto moldado no local;
- o concreto moldado no local garante maior monolitismo à estrutura e, conseqüentemente, aumenta a sua resistência aos esforços horizontais. Por essa razão, essas estruturas também são denominadas estruturas monolíticas formadas por elementos pré-moldados;

Ao projetar as peças compostas, contudo, deve-se analisar a resistência ao cisalhamento da interface entre o concreto pré-moldado e o concreto moldado no local, o que pode acarretar uma colaboração completa ou parcial da parte moldada no local quando a peça é solicitada.

A existência de tensões de cisalhamento horizontais em peças compostas pode ser observada em uma viga formada por duas barras retangulares iguais de altura h (figura 2). Colocando-as juntas sobre apoios simples e solicitando-as à flexão por meio de uma carga concentrada P , a flexão de uma é independente da outra se não houver tensões cisalhantes entre as barras (figura 2b). Numa barra única de altura $2h$, há tensões de cisalhamento ao longo do plano neutro em magnitude capaz de impedir o deslizamento entre as barras. Devido a essas tensões, a barra única possui maior resistência à flexão do que duas barras separadas. No caso das peças compostas, o seu comportamento situa-se entre o da barra única e o da barra com flexão independente. O comportamento de peça monolítica pode ser alcançado desde que existam tensões de cisalhamento entre as peças que impeçam o deslizamento excessivo entre elas. Nestas peças sempre ocorrem pequenos deslizamentos na interface.

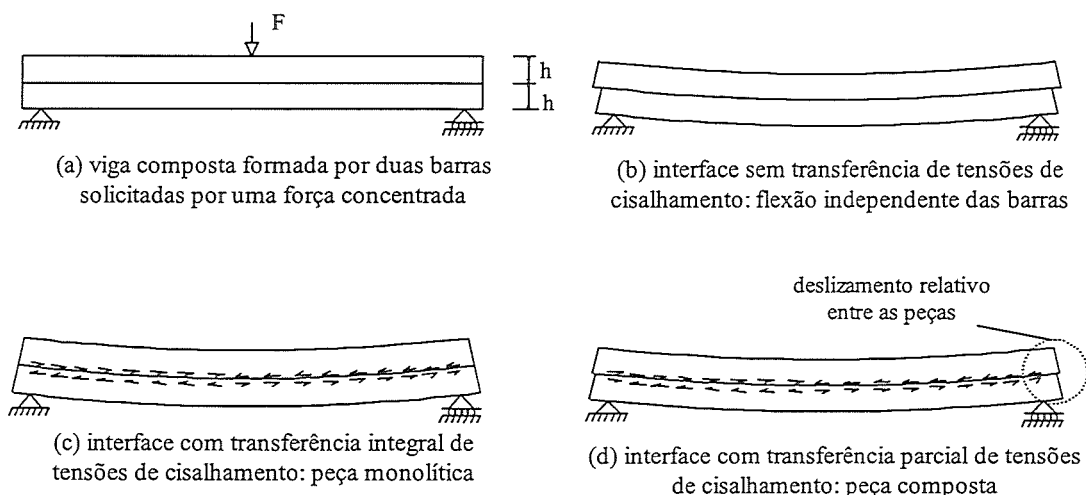


Figura 2 – Desenvolvimento de tensões de cisalhamento horizontal na interface de vigas compostas.

O dimensionamento das peças compostas no estado limite último pode, portanto, ser feito considerando a colaboração da seção completa ou apenas a colaboração da parte pré-moldada. Estudos recentes sobre a transferência de esforços pela interface desse tipo de viga foram realizados por PATNAIK (1992) e ARAUJO (1997). Em ARAUJO; EL DEBS (1997) são apresentados modelos empíricos para avaliação da resistência da interface de vigas compostas com laje moldada no local e em ARAUJO; EL DEBS (1998) são apresentadas diversas recomendações de normas internacionais para dimensionamento desse tipo de estrutura. Neste último trabalho, também é proposta a inclusão de um limite superior à expressão recomendada pela norma brasileira NBR-9062 – Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado – para dimensionamento da interface de vigas compostas.

2 - TRANSFERÊNCIA DE TENSÕES EM INTERFACES DE CONCRETO

Existem inúmeras formulações para avaliar a transferência de tensões de cisalhamento em interfaces de concreto, principalmente através de fissuras. TASSIOS; VINTZELEOU (1990) propuseram um modelo baseado na teoria atrito-cisalhamento e na contribuição da resistência ao corte da armadura transversal à interface com o objetivo de avaliar a resistência ao cisalhamento da ligação entre pilares pré-moldados. Nesse modelo, a tensão de cisalhamento (τ) é representada em função do deslizamento (s) por:

$$\tau = 0,5 \sqrt[3]{f_c^2 \cdot \sigma_n \cdot \frac{s}{s_u}} \leq \tau_u = 0,44 \sqrt[3]{f_c^2 \cdot \sigma_n} \quad (\text{MPa}) \quad , s_u \cong 2 \text{ mm} \quad (1)$$

onde f_c é a resistência a compressão do concreto e σ_n é a tensão normal a interface devido a forças externas.

A resistência devido à ação de pino da armadura pode ser avaliada em função do deslizamento (s_s) por:

$$\text{para } s_s \leq 0,1 s_{s,u}, \quad R_s = 5 \cdot \frac{R_{s,u}}{s_{s,u}} \cdot s_s \quad (\text{N}) \quad (2)$$

$$\text{para } 0,1 s_{s,u} \leq s_s \leq s_{s,u}, \quad s_s = 0,10 + 1,15 \cdot \left[\left(\frac{R_s}{R_{s,u}} \right)^4 - 0,5 \cdot \left(\frac{R_s}{R_{s,u}} \right)^3 \right] \cdot s_{s,u} \quad (3)$$

sendo:

$$s_{s,u} = 0,05 \Phi_s \quad (\text{mm});$$

$$R_{s,u} = 1,3 \cdot \Phi_s^2 \cdot \sqrt{f_c \cdot f_y \cdot (1 - \xi^2)} \quad (\text{N})$$

$$\xi = \frac{\sigma_s}{f_y}$$

σ_s : tensão de tração atuante na armadura;

Φ_s : diâmetro da armadura (mm);

f_y : tensão de escoamento da armadura.

A relação entre a força de arrancamento e o deslizamento de uma barra imersa em uma região de concreto com resistência a tração f_t pode ser obtida conhecendo-se a distribuição das tensões axiais e das tensões de aderência nesta barra, conforme ilustrado na figura 3a. Nessa figura, a barra possui comprimento insuficiente para que a tensão axial alcance a tensão de escoamento do aço. Dessa forma, a barra é arrancada do bloco de concreto com tensão axial σ_s inferior à tensão de escoamento f_y . Do equilíbrio entre forças externas e tensões de aderência obtêm-se:

$$\sigma_s = 7 \cdot \frac{\ell_b}{\Phi_s} \cdot f_t \leq f_y \quad \text{e} \quad \Delta \ell = 3,5 \cdot \frac{f_t}{E_s} \cdot \frac{\ell_b^2}{\Phi_s} \quad (4)$$

sendo as unidades em mm e MPa. Nessas expressões, ℓ_b é o comprimento sobre o qual são desenvolvidas as tensões de aderência na barra, e $\Delta \ell$ é o alongamento da barra. Admitindo que a barra esteja atravessando uma interface entre duas peças de concreto, o seu alongamento pode ser tomado igual a metade do afastamento entre as peças (w), o qual pode ser avaliado em função do deslizamento da interface (s) como $w = 0,05 \cdot s$ para superfície lisa e $w = 0,6 \cdot s^{2/3} \leq 1,4 \text{ mm}$ para superfície rugosa. Dessa forma, definido o deslizamento da interface é possível determinar o alongamento da barra e, conseqüentemente, a tensão axial atuante na barra. A partir daí pode-se determinar a resistência ao corte da armadura. Dessas equações também é possível determinar o mínimo comprimento de ancoragem de uma barra para que ela seja arrancada com $\sigma_s = f_y$, ou seja:

$$\ell_{\min} = \frac{1}{7} \cdot \frac{\Phi_s \cdot f_y}{f_t} \quad (\text{mm}) \quad (5)$$

Se a barra possuir comprimento de ancoragem maior que $\ell_{\min}$, ela alcançará a resistência de escoamento ($\sigma_s = f_y$) e o seu alongamento será dado por:

$$\Delta \ell = \left(\ell - \frac{1}{7} \cdot \frac{f_y}{f_t} \cdot \Phi_s \right) \left(\frac{f_y}{E_s} + 0,029 \right) + \frac{1}{14} \cdot \frac{f_y}{E_s} \cdot \frac{f_y}{f_t} \cdot \Phi_s \quad (6)$$

Esse valor deve ser inferior ao correspondente à deformação de ruptura do aço empregado.

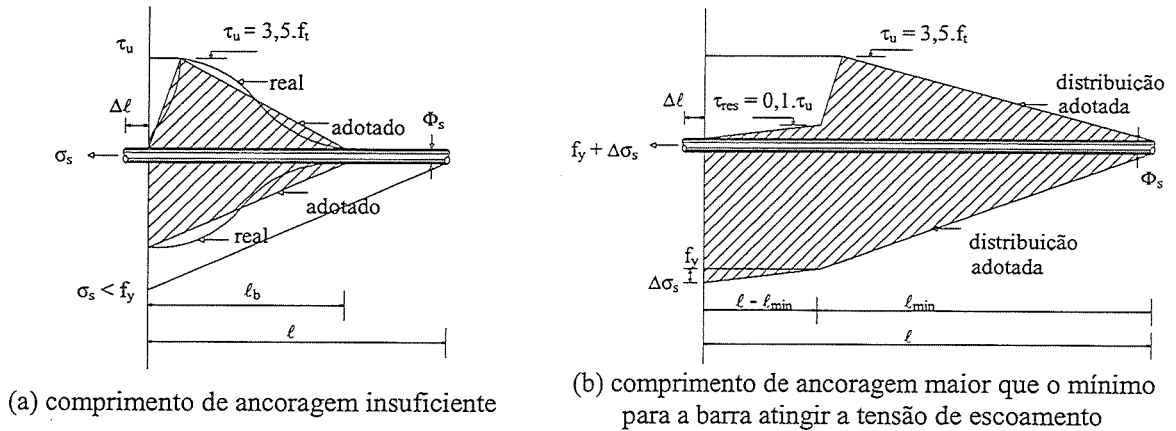


Figura 3 - Tensões de aderência em uma barra tracionada imersa numa região de concreto (TASSIOS; VINTZELEOU (1990))

Posteriormente o modelo de TASSIOS; VINTZELEOU (1990) é utilizado na simulação numérica para modelar a transferência de esforços pela interface entre a viga pré-moldada e a laje moldada no local.

3 - ENSAIOS DE VIGAS COMPOSTAS

ARAUJO (1997) ensaiou três vigas biapoiadas com seção transversal em forma de T e carregadas com uma força concentrada no meio do vão (figura 4). A principal variável estudada nos ensaios foi a forma da armadura transversal à interface, sendo utilizada armadura em forma de estribo fechado, em forma de estribo aberto com largura igual à largura dos estribos da viga pré-moldada, e em forma de estribo aberto com largura reduzida (viga 3), de modo a simular o efeito da utilização de pré-lajes como fôrma em vigas compostas. Neste caso, a armadura de costura possui largura inferior à largura da viga para possibilitar o apoio das pré-lajes, sendo, portanto, reduzida a área de transferência de esforços pela da interface entre a viga pré-moldada e a laje moldada no local. Na viga 3, essa redução foi proporcionada pela fixação de fita adesiva plástica na superfície da viga pré-moldada antes da concretagem da laje.

Na tabela 1 são mostradas a resistência média a compressão e a resistência média a tração do concreto empregado na moldagem das vigas compostas ensaiadas.

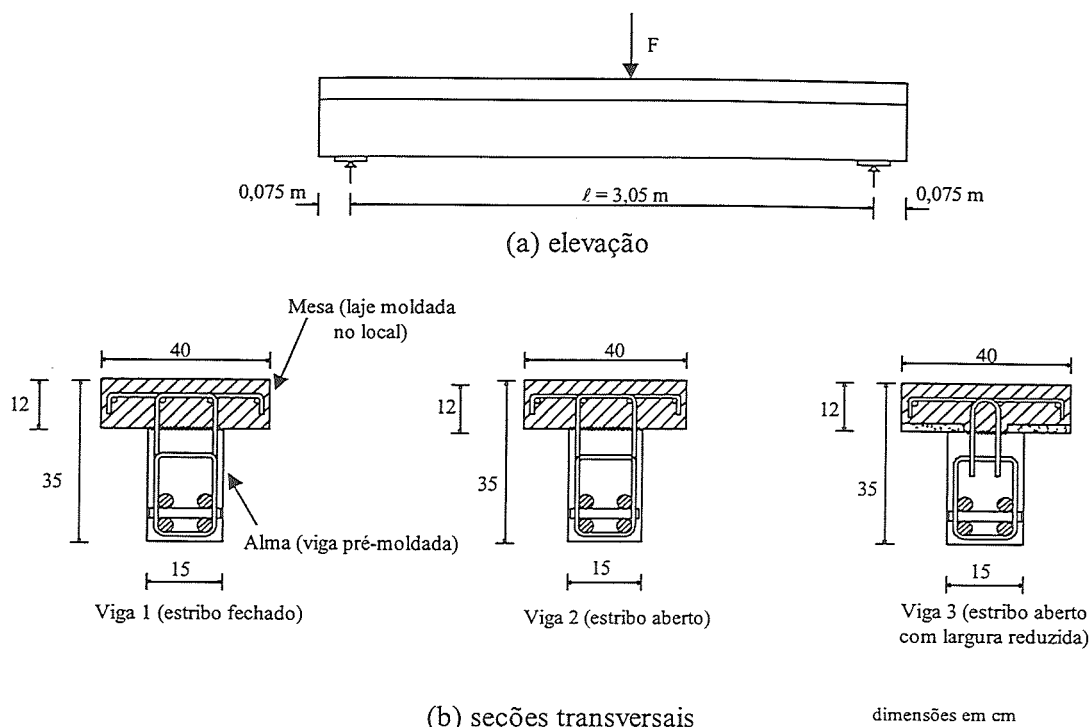


Figura 4 - Dimensões das vigas compostas ensaiadas por ARAUJO (1997).

Tabela 1 - Resistência média do concreto empregado nas vigas compostas ensaiadas.

Viga	Resistência média a compressão (f_c) MPa				Resistência média a tração (f_t) MPa		
	viga	s	laje	s	viga	laje	s
1	48,60	3,23	39,80	3,68	-	3,80	0,17
2	42,84	3,08	41,50	2,97	-	3,64	0,89
3	44,09	1,75	41,67	3,67	-	3,27	0,24

Nº de corpos-de-prova ensaiados: compressão da viga: 4
 compressão da laje: 8
 tração da mesa: 4

As vigas foram dimensionadas de forma que a ruptura ocorresse na interface entre a viga pré-moldada e a laje moldada no local. Dessa forma, tanto a armadura para resistir ao momento fletor quanto a armadura para resistir ao esforço cortante foram dimensionadas para resistir a duas vezes a força estimada de ruptura por cisalhamento na interface. Na figura 5 é mostrada a armadura utilizada nas vigas pré-moldadas. A armadura longitudinal de flexão foi estendida até o apoio e, nesta posição, foram soldadas duas barras com diâmetro de 25 mm para garantir a ancoragem da armadura longitudinal e evitar a ruptura localizada por escorregamento da armadura. Foram colocadas também barras com diâmetro de 10 mm na direção longitudinal e próximas à interface de forma a facilitar a montagem dos estribos da viga pré-moldada.

As vigas compostas foram moldadas em duas etapas. Na primeira etapa foi moldada a viga pré-moldada (alma), deixando-se exposta parte da armadura de costura, e, após quatro dias, foi moldada sobre ela a laje (mesa). A moldagem da viga pré-moldada foi feita em duas camadas. A primeira

camada de concreto foi lançada de forma que, após vibrada, restasse aproximadamente 3 cm para completar a altura da viga. Essa camada foi bem adensada com vibrador de agulha para que o concreto envolvesse toda a armadura e não houvesse a formação de vazios. A segunda camada de concreto foi lançada imediatamente a seguir e foi rapidamente vibrada de forma que os agregados graúdos ficassem expostos. Desse modo, procurou-se obter para a interface uma superfície naturalmente rugosa que pudesse ser reproduzida em obras civis correntes. O aspecto final da superfície é mostrado na figura 6.

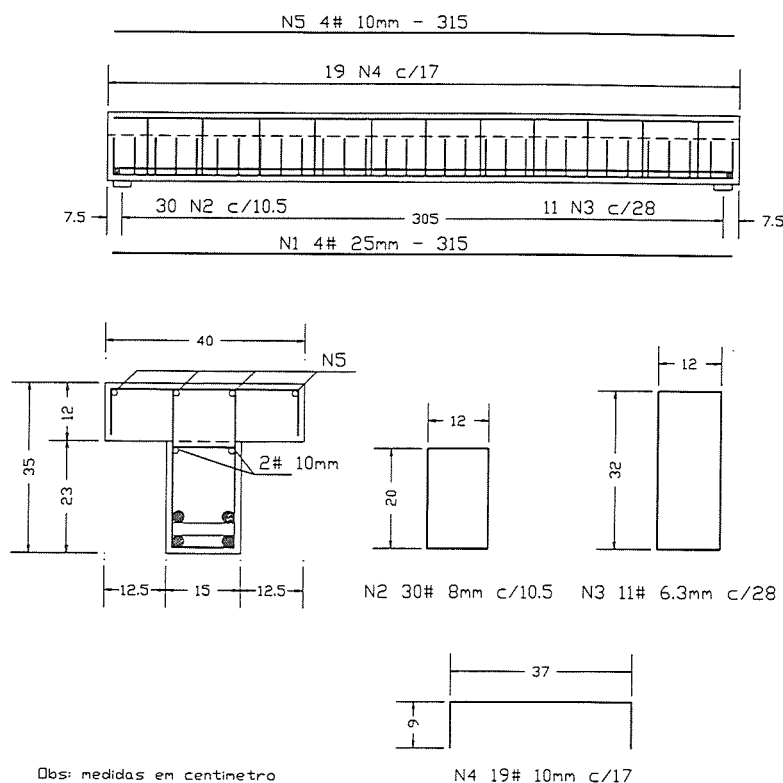


Figura 5 – Armadura da viga 1.

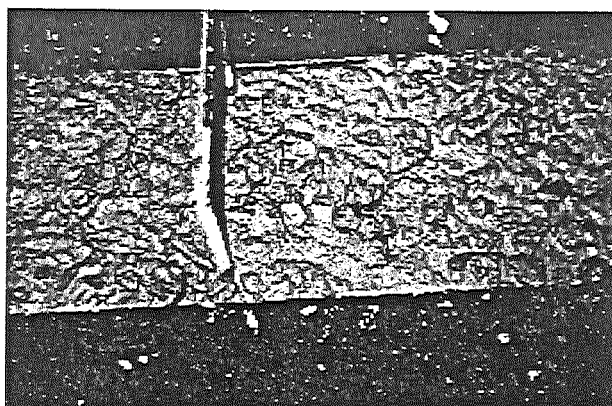


Figura 6 - Aspecto final da superfície da interface.

Após o início da pega do concreto da viga pré-moldada, sua face superior foi coberta com espuma encharcada com água e mantida nessas condições por dois dias. No terceiro dia as espumas foram

retiradas e a armadura da laje foi montada. No quarto dia procedeu-se a limpeza da superfície da interface com ar comprimido e aspirador para retirar impurezas e partículas soltas. Em seguida a superfície foi umedecida e efetuou-se a moldagem da laje. Tomou-se o cuidado de evitar que houvesse água livre na superfície de contato pois poderia prejudicar a ligação entre o concreto velho e o concreto novo. A laje foi moldada em uma única camada e sua superfície alisada. Após o início da pega do concreto, a face superior da laje foi mantida úmida durante dois dias através de espuma encharcada com água.

No terceiro dia após a moldagem da laje, a viga composta foi desmoldada. Ela foi içada com ajuda de uma ponte rolante e colocada no pórtico de ensaio em posição invertida, ou seja, com a sua face superior voltada para baixo. Na figura 7 é ilustrada a posição da viga no pórtico e o esquema de carregamento.

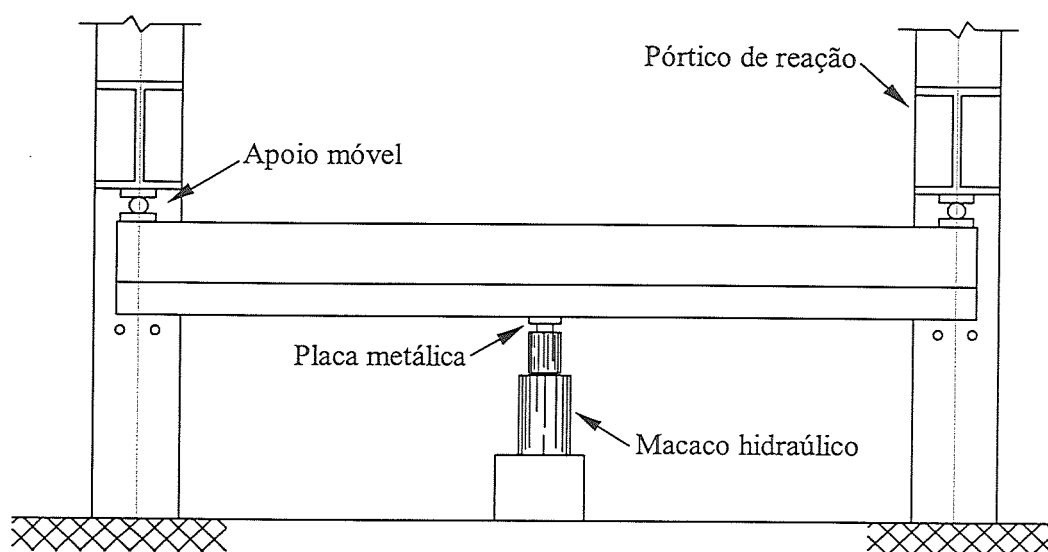


Figura 7 - Posição de ensaio das vigas e esquema de carregamento.

As vigas foram instrumentadas para a medição do deslizamento relativo entre a viga e a laje, para medição de deslocamentos verticais e para medição da deformação da armadura. O deslizamento relativo entre a viga pré-moldada e a laje moldada no local foi medido através de transdutores fixados à laje por meio de cantoneiras de alumínio com a haste apoiada numa outra cantoneira fixada à viga. Esses transdutores foram distribuídos ao longo do vão da viga. Os deslocamentos verticais foram medidos em três pontos: $1/4$ do vão, $1/2$ do vão e $3/4$ do vão.

3.1 Configuração de fissuras e forma de ruptura

Para pequenos valores de força aplicada às vigas compostas, surgiram fissuras de flexão no meio do vão das vigas. Com o aumento da força, novas fissuras inclinadas surgiram afastadas do meio do vão e as já existentes propagaram-se em direção à interface. Continuando a aumentar a força, as fissuras mais afastadas do meio do vão viga também atingiram a interface e prolongaram-se ao longo do vão. À partir desse estágio de carregamento a viga 3, que apresentava uma redução na área de contato da interface, apresentou comportamento diferente das vigas 1 e 2.

As vigas 1 e 2 romperam por cisalhamento da interface com pequeno deslizamento. Nessas vigas, a força correspondente ao início da fissuração da interface representou, aproximadamente, 58% da força de ruptura, cujo valor foi de 420 kN para a viga 1 e 390 kN para viga 2. O deslizamento relativo da interface ocorreu de ambos os lados da viga, contudo, a ruptura aconteceu apenas em um

dos lados pelo rápido acréscimo nos deslizamentos sem aumento da força aplicada. Próximo à ruptura, a configuração de fissuras na viga junto ao apoio sugere a formação de uma biela de compressão ligando a interface ao apoio. A fissuração da interface estendeu-se dessa possível biela de compressão até próximo à região de aplicação da força. Na viga 2 a fissura da interface estendeu-se até a extremidade sem, contudo, causar grandes deslizamentos. Na figura 8 são mostrados a fissuração da viga 2 na ruptura e o detalhe da fissuração junto ao apoio. Ao observar a configuração de fissuras das vigas 1 e 2, pôde-se concluir que estas vigas apresentaram comportamento semelhante ao de uma viga monolítica com as mesmas dimensões.

Na viga 3, após as fissuras de flexão atingirem a interface houve uma ruptura brusca da aderência entre a viga pré-moldada e a laje moldada no local seguida de um deslizamento significativo na interface. Esta viga apresentou uma resistência a flexão sensivelmente inferior à resistência das vigas 1 e 2.

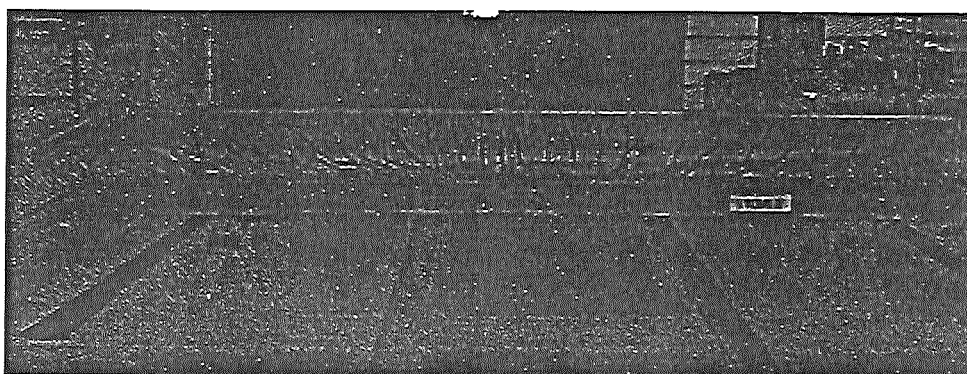


Figura 8(a) - Fissuração da viga 2 na ruptura.

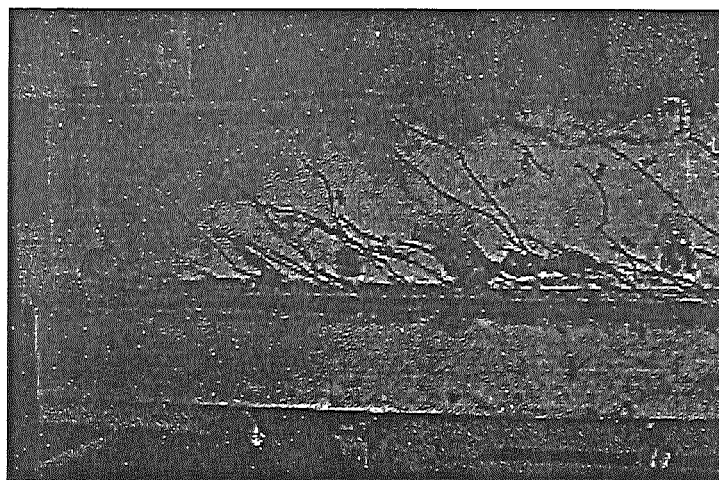


Figura 8(b) - Detalhe da fissuração da viga 2 junto ao apoio.

4 - SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Foi realizada a simulação numérica de uma viga composta com laje moldada no local e transferência integral de tensões de cisalhamento pela interface entre a viga pré-moldada e a laje. Para tanto, foi utilizado o programa comercial ANSYS baseado no método dos elementos finitos. Essa viga era semelhante às vigas 1 e 2 ensaiadas por ARAUJO (1997), as quais eram biapoiadas e carregadas com uma força concentrada no meio do vão. A simulação foi realizada empregando um

modelo tridimensional. Devido à simetria, foi analisado apenas um quarto da viga. Para o concreto da viga pré-moldada e da laje foram admitidas características idênticas, sendo tomado o concreto de menor resistência obtido dos ensaios experimentais das vigas 1 e 2 (ARAUJO (1997)). Na Figura 9 é mostrada a discretização da viga.

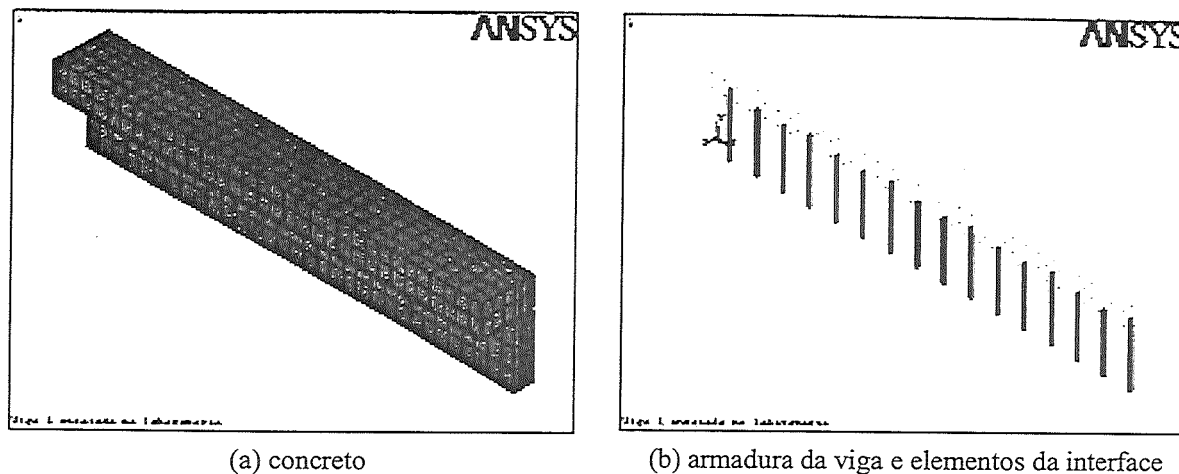


Figura 9 - Discretização das vigas 1 e 2 ensaiadas por ARAUJO (1997)

A transferência de esforços pela interface entre a viga pré-moldada e a laje foi garantida por três elementos, ou seja, CONTAC52, COMBIN39 e COMBIN40. O elemento CONTAC52 é um elemento de contato, definido a partir de dois nós coincidentes, que permite a transferência de tensões tangenciais entre dois nós segundo a teoria do atrito de Coulomb. Na Figura 10 é ilustrada a relação entre a força tangencial e o deslizamento para esse elemento. Essa característica, contudo, não foi utilizada na modelagem, sendo o elemento empregado apenas para evitar a penetração da laje na viga pré-moldada durante a flexão da viga composta.

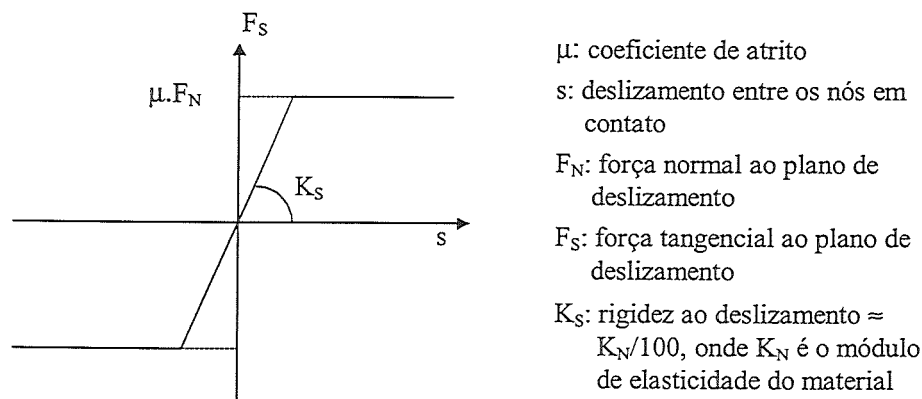


Figura 10 - Modelo de atrito utilizado no elemento CONTAC52 do ANSYS.

O elemento COMBIN40 foi utilizado para simular a resistência por aderência na interface. Esse elemento é composto por duas molas de comportamento elástico linear, um êmbolo para representar deformações dependentes do tempo e um “bloco” para representar deformações plásticas. Ele é definido a partir de dois nós que podem ser coincidentes ou não. Neste último caso, o elemento é ativado apenas quando os nós forem coincidentes ($GAP \leq 0$ na figura 11). Nesta simulação, as constantes K_2 e C do elemento foram tomadas iguais a zero, de modo que ele fica reduzido a uma mola e um “bloco” associados em série. Sendo assim, o elemento apresenta um comportamento elástico linear até ser atingindo um certo valor (FSLIDE) a partir do qual ocorre o deslizamento

relativo entre os nós sob força constante. Por se tratar de uma viga composta com superfície rugosa, a qual apresenta um comportamento estrutural próximo ao de uma viga monolítica, a rigidez dessa mola foi tomada igual ao módulo de elasticidade do concreto. A força que causa o deslizamento da interface foi obtida a partir das recomendações de PATNAIK (1992). Segundo esse autor, a resistência por aderência em vigas compostas com interface rugosa pode ser estimada por:

$$\tau_c = 0,6 \sqrt{0,1 f_c} \quad (\text{MPa}) \quad (7)$$

Essa tensão foi admitida constante em toda a interface e a força resultante foi dividida pelo número de elementos da interface.

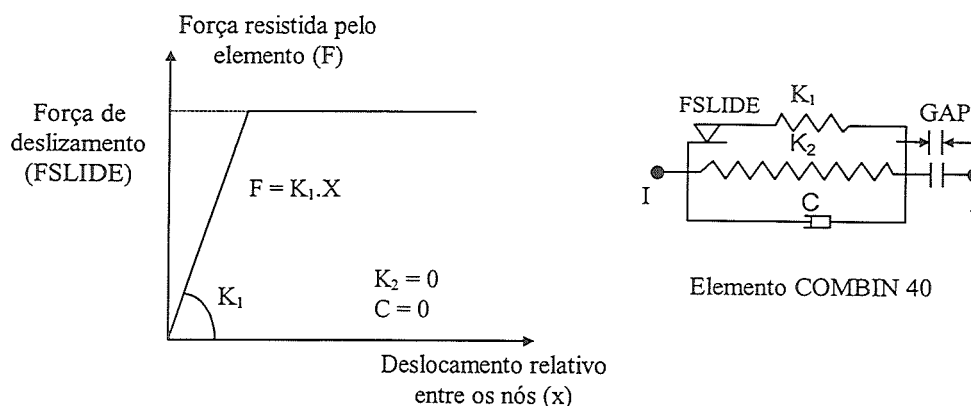


Figura 11 - Relação entre força e deslocamento para o elemento COMBIN40 do ANSYS.

O elemento COMBIN39 foi utilizado para simular a transferência por atrito na superfície de contato e a transferência pela ação de pino da armadura transversal a interface. Esse elemento é formado por uma mola com comportamento não-linear, e a curva que relaciona a força resistida pela interface com o deslizamento foi obtida da aplicação do modelo de TASSIOS; VINTZELEOU (1990) à interface da viga considerando as informações obtidas do ensaio experimental. Na Figura 12 é mostrada a curva de resistência por atrito obtida. Nessa figura, a força indicada já se encontra dividida pelo número de elementos da interface. Na Figura 13 é mostrada a curva de resistência ao corte da armadura transversal obtida. Neste caso, a força calculada é aplicada apenas nos nós localizados o mais próximo possível da posição real da armadura de costura das vigas ensaiadas.

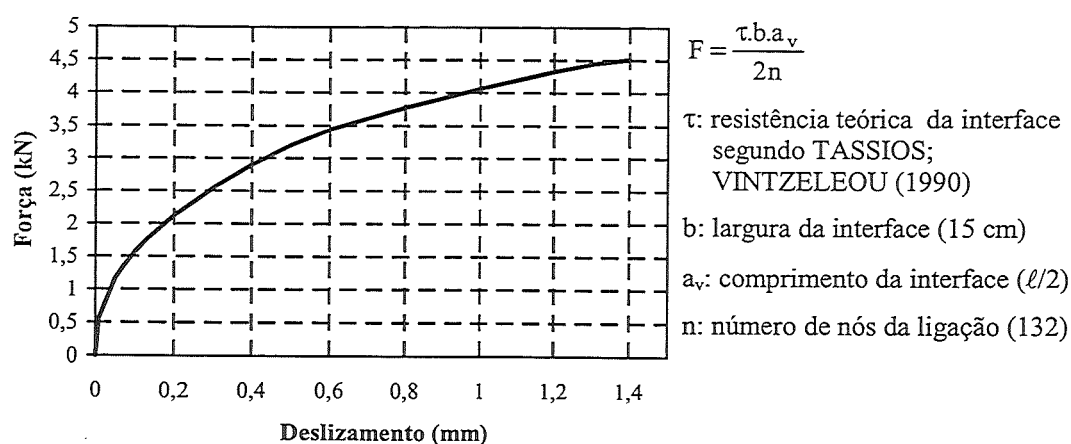


Figura 12 - Curva de resistência por atrito versus deslocamento da interface para o elemento COMBIN39 do ANSYS.

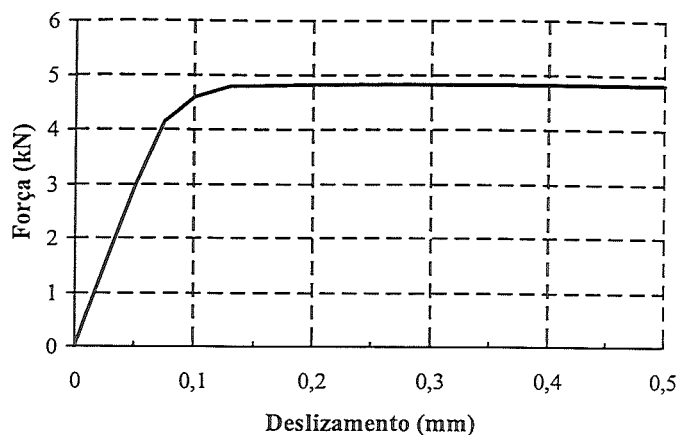


Figura 13 - Curva de resistência ao corte da armadura versus deslizamento da interface para o elemento COMBIN39 do ANSYS.

O concreto foi modelado usando um elemento sólido com três graus de liberdade por nó (SOLID65) e os estribos foram modelados por um elemento linear resistente à tração e à compressão (LINK8). A armadura de flexão da viga também foi modelada pelo elemento SOLID65 que permite a incorporação de barras no centro de gravidade do elemento. No total foram utilizados 960 elementos para o concreto, 54 elementos para os estribos e 132 de cada um dos elementos necessários para modelar a interface.

Foi admitido para a armadura um comportamento elastoplástico perfeito. Para o concreto foi adotado o critério de plastificação de Drucker Prager. Nesse caso, a coesão foi admitida como sendo um quarto da resistência à compressão ($c = f_c/4$) e o ângulo de atrito interno foi tomado igual a 37° (PROENÇA (1988)). Foram testados outros valores para a coesão e para o ângulo de atrito interno, contudo estes foram os que proporcionaram a melhor representação das vigas ensaiadas pelo modelo numérico. Vale ressaltar que o critério de Drucker Prager aqui empregado não possui o efeito de amolecimento do concreto ("softening") de modo que o concreto comporta-se como elastoplástico perfeito. Isso deve-se a uma limitação do programa ANSYS que não permite a consideração de encruamento negativo em nenhum dos modelos elastoplásticos disponíveis para o usuário.

As principais propriedades admitidas para os materiais e para os elementos empregados na simulação são:

Concreto:

- Resistência a compressão (f_c): 39,8 MPa*
- Módulo de elasticidade (E_c): 25.000 MPa*
- Coeficiente de Poisson (ν): 0,18**
- Critério de plastificação: Drucker Prager sem encruamento ($c = 9.950 \text{ kN/m}^2$ e $\phi = 37^\circ$)

Aço:

- Módulo de elasticidade (E_s): 210.000 MPa*
- Coeficiente de Poisson (ν): 0,25**
- Critério de plastificação: elastoplástico perfeito - $f_y = 650 \text{ MPa}$ (ARAUJO (1997))

Interface:

- Contato (elemento CONTAC52) : $K_N = 25.000 \text{ MPa}$ e $K_S = 0$
- Aderência (elemento COMBIN40): $K_I = 25.000 \text{ MPa}$ e $FSLIDE = 1,1 \text{ kN}$
- Atrito (elemento COMBIN39) : rigidez definida conforme Figura 12
- Ação de pino da armadura (elemento COMBIN39) : rigidez definida conforme Figura 13

* Valores obtidos experimentalmente por ARAUJO (1997)

** Valores adotados

Na figura 14 é mostrada a relação entre a força aplicada à viga e o deslizamento da interface medida no ponto de maior deslizamento. Observa-se boa concordância entre os resultados experimentais e os obtidos da simulação numérica. Quando é analisado o deslizamento relativo da interface ao longo da viga, observa-se que o máximo deslocamento não ocorre na extremidade da viga, mas sim a uma distância de aproximadamente três vezes a sua altura útil, o que corresponde a uma distância do apoio igual a aproximadamente um quarto do vão (Figura 15). Esse comportamento é semelhante ao observado nos ensaios, apesar das poucas leituras realizadas ao longo da interface.

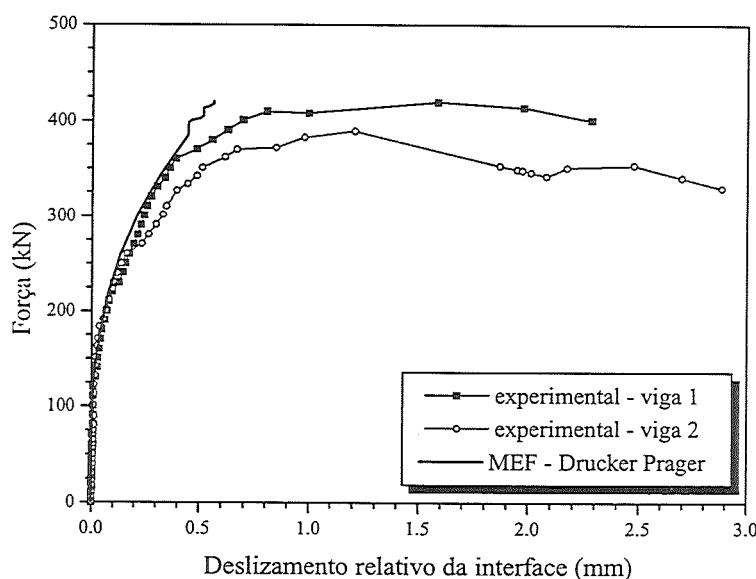
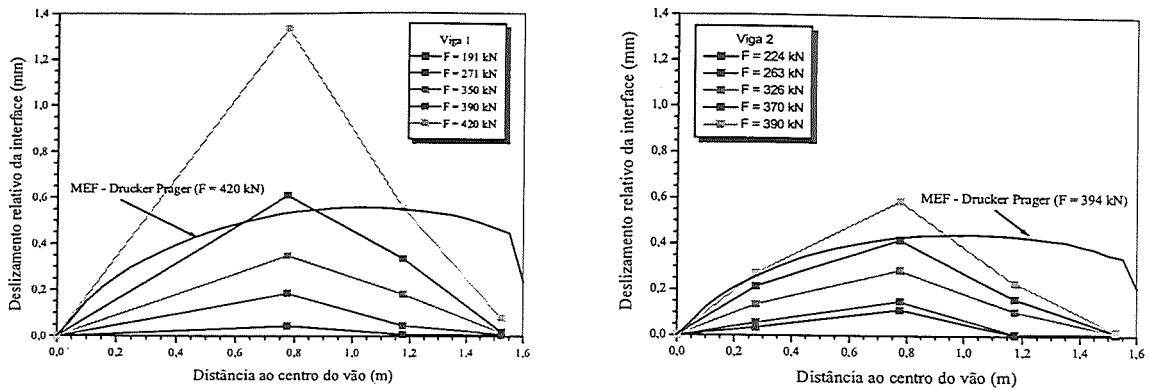


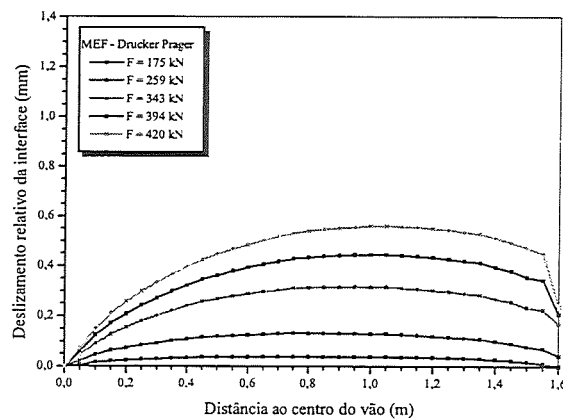
Figura 14 - Deslizamento relativo da interface para uma viga composta com laje moldada no local.

É interessante notar que, de modo geral, o deslizamento da interface na simulação numérica é inferior ao deslizamento observado no ensaio para o mesmo nível de carregamento. Observa-se, também, que para carregamentos elevados há uma maior tendência de distribuição do deslizamento ao longo do vão na simulação numérica do que nos ensaios. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de nos ensaios ter surgido uma fissura pronunciada próxima a extremidade da viga ligando a interface ao apoio, o que não pôde ser observado na simulação em função da escolha de um modelo elastoplástico para representar o concreto.

Com relação à deformação da armadura longitudinal de flexão e à deformação do concreto no meio do vão (Figura 16, Figura 17), os resultados obtidos da simulação estão próximos aos obtidos do ensaio. Observa-se, porém, que o modelo numérico apresenta-se mais rígido que o experimental, conforme pode ser observado com mais clareza na curva de deslocamento vertical no meio do vão (Figura 18). Esse comportamento pode ser explicado pelo fato do modelo de Drucker Prager disponível no programa ANSYS não permitir o emprego de um encruamento negativo.



(a) Resultados obtidos por ARAUJO (1997)



(b) Resultados obtidos da simulação numérica no ANSYS

Figura 15 - Deslizamento relativo da interface ao longo do vão de uma viga composta com laje moldada no local.

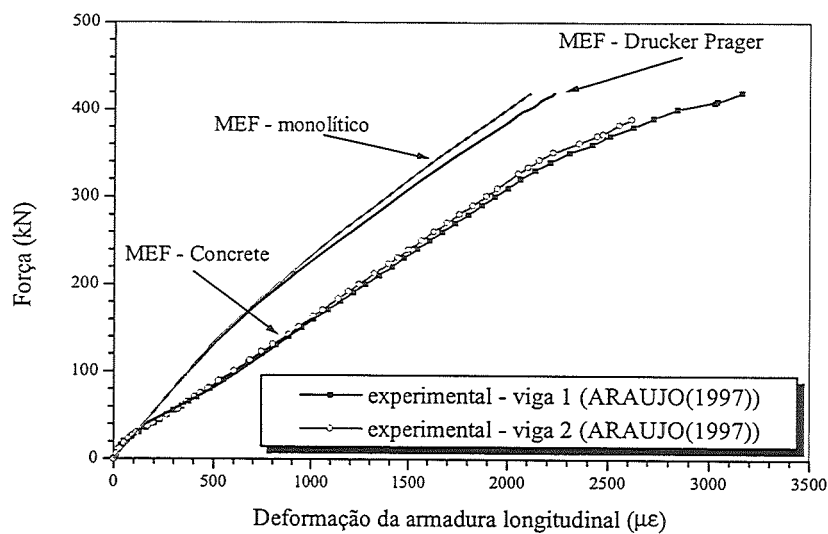


Figura 16 - Deformação da armadura longitudinal de uma viga composta com laje moldada no local.

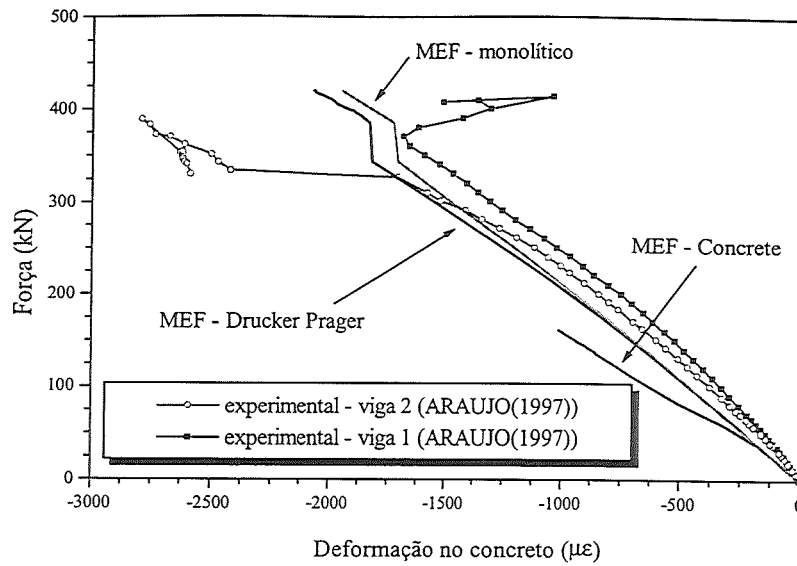


Figura 17 - Deformação do concreto no meio do vão de uma viga composta com laje moldada no local.

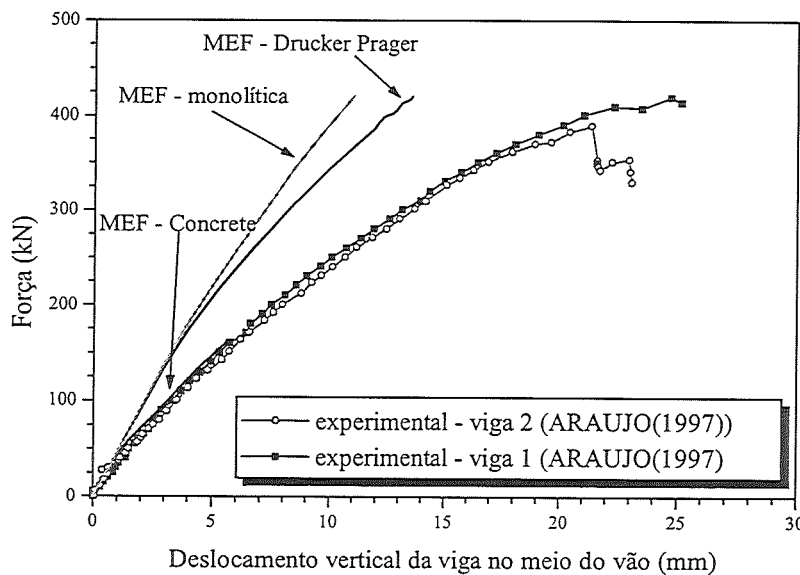


Figura 18 - Deslocamento vertical no meio do vão de uma viga composta com laje moldada no local.

A seguir, foi utilizado um modelo constitutivo baseado na teoria de fratura com fissuração distribuída, disponível no ANSYS (CONCRETE), para representar o concreto. Observa-se que, neste caso, a deformação da armadura de flexão e o deslocamento vertical no meio do vão da viga composta praticamente coincidiram com os resultados experimentais. Apenas a deformação do concreto mostrou-se um pouco superior a observada nos ensaios. Isso mostra a eficiência dos modelos baseados na mecânica da fratura na representação de estruturas de concreto, principalmente quando submetidas a esforços de tração. Contudo, com este modelo a viga não foi capaz de suportar carregamentos elevados, terminando o processo numérico com apenas 38% do carregamento de ruptura da viga 1. O ideal seria combinar um modelo de fissuração para a tração e um modelo elastoplástico para o compressão. Existem inúmeros trabalhos acadêmicos que apresentam modelos deste tipo. Ao tentar simular a viga composta pelo ANSYS acoplando o

modelo CONCRETE com o modelo de Drucker Prager não foi possível obter uma força de convergência maior e o comportamento apresentou-se próximo ao da viga com o modelo CONCRETE.

Foi, em seguida, modelada uma viga monolítica com as mesmas dimensões e materiais da viga composta. Nesse caso, foi adotado para o concreto o critério de plastificação de Drucker Prager com a coesão igual a 1/4 da resistência a compressão e o ângulo de atrito igual a 37° . De acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir que a viga composta com laje moldada no local com interface rugosa apresenta um comportamento muito próximo ao de uma viga monolítica de mesmas dimensões. A diferença mais significativa está na flecha de ruptura que é aumentada em 23% devido a substituição da viga monolítica por uma viga composta. Contudo, se for admitido que em serviço a viga trabalhe apenas com 40% do carregamento de ruptura, o aumento da flecha seria de apenas 5%. Isso sugere que a viga composta, para carregamentos em serviço, apresenta comportamento estrutural semelhante ao de uma viga monolítica de mesma dimensão.

A viga 3 ensaiada por ARAUJO (1997) também foi simulada através do programa ANSYS, contudo os resultados obtidos divergiram sensivelmente daqueles obtidos do ensaio experimental (Figura 19). Acredita-se que essa diferença tenha sido causada pela modificação da forma de ruptura da interface proporcionada pela redução da área de contato entre a viga pré-moldada e a laje moldada no local. Para esta viga, a forma de modelagem empregada neste trabalho para representação da interface não foi capaz de representar com fidelidade o comportamento da viga composta.

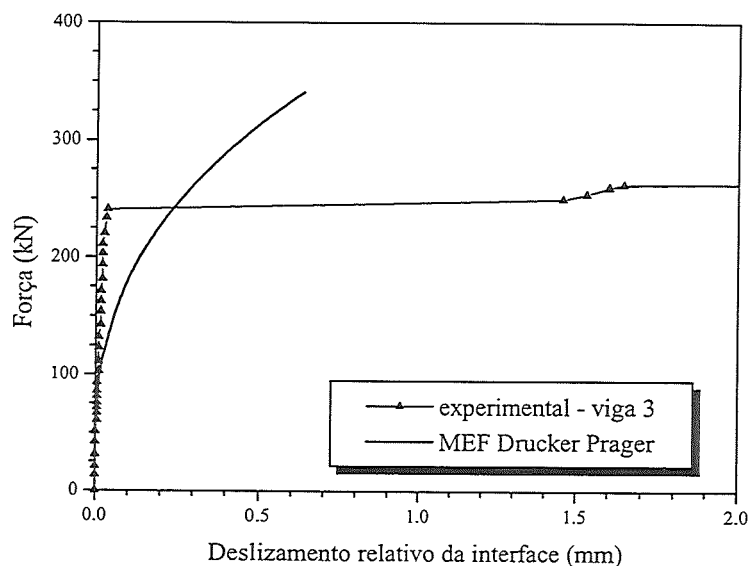


Figura 19 - Deslizamento relativo da interface para a viga 3 ensaiada por ARAUJO (1997).

5 - CONCLUSÕES

As principais conclusões que podem ser obtidas deste trabalho são:

- O aspecto mais importante na modelagem de vigas compostas com laje moldada no local é a utilização de elementos que representem corretamente o deslizamento relativo entre a viga pré-moldada e a laje moldada no local. Neste sentido, apesar do modelo de TASSIOS; VINTZELEOU (1990) ter sido formulado a partir de ensaios da ligação entre pilares pré-moldados, ao ser adicionado uma parcela de resistência por aderência ele mostrou-se eficaz na representação do deslizamento da interface de vigas compostas.

- b) A adoção do critério de Drucker Prager para representação do comportamento do concreto tornou o modelo numérico mais rígido que o experimental. Isso deve-se, principalmente, ao fato do programa ANSYS não permitir encruamento negativo nos modelos elastoplásticos, o que limita a utilização desse programa na representação das estruturas de concreto. Por outro lado, a adoção de um modelo baseado na mecânica da fratura com fissuração distribuída forneceu resultados praticamente coincidentes com os experimentais. Nesse caso, contudo, os resultados são fortemente influenciados pela malha utilizada, e o modelo numérico não é capaz de representar o comportamento da estrutura até a ruptura.
- c) De acordo com a simulação numérica, as vigas compostas com laje moldada no local com interface rugosa ensaiadas por ARAUJO (1997) apresentaram um comportamento muito próximo ao de uma viga monolítica de mesmas dimensões.
- d) Baseado neste trabalho, observa-se uma certa dificuldade de simular o comportamento real de uma estrutura por um modelo numérico. Essa dificuldade é ainda maior se o programa utilizado for comercial, o qual muitas vezes não incorpora metodologias modernas para avaliação do comportamento não-linear de estruturas disponíveis em programas acadêmicos. Dessa forma, ainda não é possível dispensar os ensaios experimentais como ferramenta de análise do comportamento de estruturas de concreto armado. Contudo, a análise numérica da estrutura antes da elaboração de um programa experimental pode dar grande contribuição na definição desse programa por possibilitar uma boa visualização do comportamento da estrutura. Sendo assim, podem ser evitados ensaios desnecessários ao se perceber que determinada variável não influencia no resultado, ou mesmo as dimensões dos corpos-de-prova podem ser modificadas antes dos ensaios.

6 - AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP – pelo apoio financeiro para a realização dos ensaios das vigas compostas e à Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES – pela concessão de bolsa de doutorado destinada à continuidade deste trabalho.

7 - BIBLIOGRAFIA

ANSYS RELEASE 5.5.1 (1998). *Basic Analysis Procedures Guide*. 3rd Edition. SAS IP, Inc. ©

ARAUJO, D.L. (1997). *Cisalhamento na interface entre concreto pré-moldado e concreto moldado no local em elementos submetidos à flexão*. São Carlos. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

ARAUJO, D.L.; EL DEBS, M.K. (1997). *Cisalhamento na interface entre concreto pré-moldado e concreto moldado no local em vigas submetidas à flexão: comparação de valores teóricos e experimentais*. In: JORNADAS SUL-AMERICANAS DE ENGENHARIA ESTRUCTURAL, 28, São Carlos, Brasil, setembro 1997. Estruturas e fundações. São Carlos, SET-EESC-USP / Associação Sul-Americana de Engenharia Estrutural, 1997, v.2, p.487-496.

ARAUJO, D.L.; EL DEBS, M.K. (1998). *Cisalhamento na interface entre concreto pré-moldado e concreto moldado no local em vigas submetidas à flexão: comparação entre resultados experimentais e valores de normas*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 40. O ESTADO DA ARTE: TECNOLOGIA E QUALIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL. Rio de Janeiro, agosto 1998. São Paulo, IBRACON, 1998. [CD ROM].

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT (1985). NBR 9062 - *Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado*. Rio de Janeiro.

PATNAIK, A.H. (1992). *Horizontal shear strength of composite concrete beams with a rough interface*. Ph.D Thesis, University of Calgary, Calgary, Canada.

PROENÇA, S.P.B. (1988). *Sobre modelos matemáticos do comportamento não-linear do concreto: análise crítica e contribuições*. São Carlos. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

TASSIOS, T.P. ; VINTZELEOU, E.N. (1990). *Shear crack stability along a precast reinforced concrete joint*. In: CARPINTERI, A., ed. Applications of fracture mechanics to reinforced concrete. Essex, Elsevier Applied Science. p.365-486.