

CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DA INTERFACE EM MODELOS NUMÉRICOS DO TIPO PUSH-OUT APLICADOS A LIGAÇÕES POR ADERÊNCIA

Hidelbrando José Farkat Diógenes¹ & Ana Lúcia Homce de Cresce El Debs²

Resumo

Em geral, o dimensionamento das ligações é a parte mais importante no projeto de estruturas de concreto pré-moldado e mistas de aço-concreto. As ligações têm importância estratégica quando relacionadas à produção (execução, montagem e outros serviços in-loco), quanto ao comportamento estrutural depois de finalizado o processo de produção. Neste aspecto o desenvolvimento de novos tipos de ligações é evidentemente necessário. Na busca por uma solução prática, econômica e rápida para ligações em estruturas mistas de aço-concreto, ligações por aderência se apresentam bastantes promissoras. Este trabalho apresenta a calibração de um modelo numérico referente aos protótipos de tipo Push-out de um novo conector de cisalhamento para utilização na ligação viga-laje pré-moldada utilizando a aderência como mecanismo de transferência de esforço. Os resultados da simulação numérica apresentaram-se promissores no que tange a aproximação da resistência última do protótipo experimental.

Palavras-chave: Estruturas mistas. Ligações por Aderência. Push-out.

INTERFACE PARAMETERS CALIBRATION OF NUMERICAL PUSH-OUT MODELS APPLIED TO CONNECTIONS FOR ADHERENCE

Abstract

In general, connections are the most important part in the project of precast concrete and composite structures. They have a strategic importance, as related to production (execution, assemblage and other services on site), as to structural behaviour after finished the production process. In this way, the development of new types of connections is clearly necessary. Looking for a practical, economical and fast solution to connections in composite structures of steel-concrete, connections by adherence presents themselves quite promising. This paper presents the calibration of a numerical model concerning the prototype type Push-out of a new technology for connections of composite structures. The results of numerical simulation showed a good approach of ultimate strength.

Keywords: Connections. Composite Structures. Precast slabs. Adherence. Push-out

Linha de Pesquisa: Estruturas de Concreto e de Alvenaria; Estruturas Metálicas.

¹ Doutorando em Engenharia de Estruturas - EESC-USP, hidelbrando@sc.usp.br

² Professor do Departamento de Engenharia de Estruturas da EESC-USP, analucia@sc.usp.br

1 INTRODUÇÃO

De acordo com o fib Model Code (2010), a construção em concreto moldado no local é na maioria das vezes a solução mais barata no contexto de obras convencionais, entretanto a pré-fabricação apresenta a vantagem da rápida execução e de fornecer elementos estruturais de elevada qualidade. Assim, a combinação das duas soluções, concreto pré-fabricado e estruturas mistas, podem resultar em uma estrutura com mais qualidade, executada com maior rapidez e economia.

Os sistemas mistos de aço e concreto são perfeitamente adaptáveis a um processo de pré-fabricação, por ser tratar de um sistema construtivo em que o todo, ou parte dele, pode ser fabricado fora de seu local de utilização definitivo.

O uso do concreto pré-fabricado em sistemas estruturais mistos é facilitado por sua aptidão em ser integrado a outros tipos de elementos. Como há a liberdade de se criar em uma peça de concreto pré-moldado uma infinidade de formas, é facilitada a geração de reentrâncias e saliências que ajudarão na solidarização com outros tipos de elementos estruturais. Ressalta-se que esta versatilidade de formas não implica obrigatoriamente no encarecimento da peça, principalmente se esta for inserida em um sistema de produção em série (BEZERRA, 2011).

Um sistema misto de aço e concreto visa extrair o máximo desempenho dos materiais. Para tanto, é necessário que se garanta a melhor interação possível entre os materiais. Uma ação composta pode ser obtida reduzindo o deslocamento relativo da interface entre o aço e o concreto por meio da utilização de conectores de cisalhamento. Nesse contexto, o comportamento das conexões entre os elementos de aço e concreto pré-fabricado, é fator determinante na escolha do sistema construtivo. Há uma dificuldade de se garantir o comportamento monolítico, mas isto pode ser contornado com a elaboração de ligações eficientes.

Desta forma, em geral, as ligações são as partes mais importantes no projeto das estruturas de concreto pré-fabricado e mistas. Elas são de fundamental importância, tanto no que se refere à sua produção (execução de parte dos elementos adjacentes às ligações, montagem da estrutura e serviços complementares no local), como no comportamento da estrutura.

As ligações em estruturas mistas de aço e concreto mais simples, normalmente as articulações, implicam em estruturas mais solicitadas a momentos fletores positivos. Em contrapartida, as ligações que tendem a reproduzir o comportamento monolítico das estruturas, pela transmissão de momentos fletores entre os elementos, requerem mais trabalho, reduzindo em parte as vantagens da pré-moldagem.

As dificuldades associadas à execução deste último tipo de ligação se devem à complexidade de realizar a solidarização dos elementos envolvidos na ligação, o aço e o concreto. Além de ter que acomodar tolerâncias que intervêm nas várias fases de confecção da estrutura.

Na perspectiva de uma solução prática, econômica e rápida, a emblemática das ligações em estruturas mistas de aço e concreto, as ligações por aderência se apresentam como uma solução inovadora e bastante promissora.

Os primeiros estudos que objetivaram o melhoramento da aderência entre o aço remontam a década de 70, com, por exemplo, o de Beck e Heunisch (1972), que estudaram o atrito entre placas de aço lisas e blocos pré-moldados de concreto.

Outro bom exemplo da aplicação destes melhoramentos na interface entre o aço e o concreto, nas estruturas mistas de aço e concreto, é o trabalho de Kitoh e Sonoda (1996) que utilizou ranhuras paralelas e oblíquas em vigas do tipo *opensandwich*. Kitoh e Sonoda (1996) observou que de fato as ranhuras proporcionavam um acréscimo na capacidade resistente do elemento estrutural misto de aço e concreto.

A partir da experiência Kitoh e Sonoda (1996), em especial, Dauner e Antille (2002) propuseram a ligação denominada, *ligação por aderência*. Essa ligação foi posteriormente estudada por Thomann (2005), Papastergiou (2013) e Diógenes (2013).

Um exemplo de ligação por aderência é ilustrado na Figura 1. Ela representa uma condensação de diferentes idéias para este tipo de ligação proposta por Thomann (2005). Corresponde a uma laje de concreto pré-fabricado, com sulco longitudinal de encaixe (nervura), apoiada sobre viga metálica. Esta viga, por sua vez, possui na mesa superior um conector linear com superfície rugosa. Ainda na mesa superior aplica-se uma rugosidade (camada adesiva) aumentando-se o coeficiente de atrito e conseqüentemente a resistência da ligação.

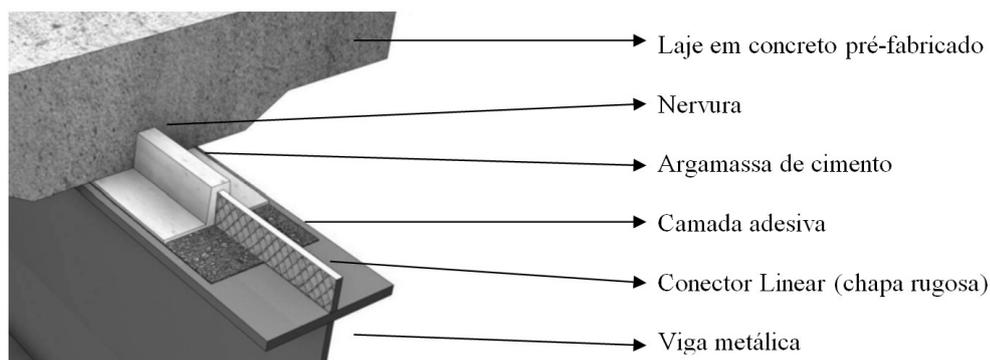


Figura 1 – Ligação por aderência proposta por Thomann (2005).

Thomann (2005), até então, representa a mais extensiva pesquisa a respeito de interfaces cisalhantes, considerando a influência da geometria da ranhura e dos materiais constituintes, direcionadas à confecção de uma ligação entre vigas de aço e lajes pré-fabricadas de concreto, para a sua utilização em pontes mistas de aço e concreto. O resultado dos experimentos realizados por Thomann (2005) foi à proposição de um critério de ruptura e uma metodologia de cálculo simplificada para a ligação presente na Figura 1.

Ressaltasse que Papastergiou (2012) deu continuidade ao trabalho de Thomann (2005), no sentido de mitigar os pontos não esclarecidos do estudo de Thomann (2005), especialmente acerca do comportamento a fadiga da referida ligação. Papastergiou (2012) ainda propôs a utilização de uma nova geometria para a nervura da laje e UHPFRC (*ultra high performance fiber reinforced concrete*), para a confecção das lajes.

Considerando o que foi apresentado até aqui, o presente estudo teve por objetivo calibrar os parâmetros da interface do modelo numérico do tipo *Push-out*, resultante do programa experimental piloto desenvolvido por Diógenes (2013). Uma vez que em seu trabalho, Diógenes (2013), propôs novas interfaces para a ligação por aderência, aplicada à ligação viga-laje pré-fabricada, no contexto das estruturas mistas de aço e concreto. Os resultados da simulação serviram de complemento a análise dos resultados experimentais obtidos no programa piloto e balizaram a análise numérica dos ensaios do tipo *Push-out* definitivos, culminando na análise numérica dos protótipos de Viga Mista desenvolvida por Diógenes (2013).

2 METODOLOGIA

A metodologia de trabalho adotada consiste na simulação do comportamento estrutural de protótipos piloto do tipo *Push-out*, ensaiados na investigação desenvolvida por Diógenes (2013), utilizando para isto um pacote computacional baseado no Método dos Elementos Finitos. A calibração dos parâmetros necessários à simulação numérica do referido protótipo experimental é realizada a partir da comparação da curva força *versus* escorregamento experimental com a numérica.

3 DESCRIÇÃO DOS PROTÓTIPOS EXPERIMENTAIS

Diógenes (2013), na etapa piloto do seu programa experimental, ensaiou 06 (seis) protótipos do tipo *Push-out*. Os modelos ensaiados pelo referido autor são uma variação do modelo de ligação por aderência proposto por Thomann (2005). A distinção deste trabalho em relação ao realizado por Thomann (2005) está no tratamento dado às interfaces envolvidas na ligação por aderência.

Os protótipos consistem de 02 (dois) blocos de concreto simples, sujeitos a imprimação de uma rugosidade em uma de suas faces, dispostos de maneira a receber entre suas reentrâncias (nervuras) um elemento metálico, composto de uma placa de reação e 02 (dois) conectores lineares soldados em face opostas. A fusão entre os referidos elementos é feita a partir do grauteamento das partes (Figura 2).

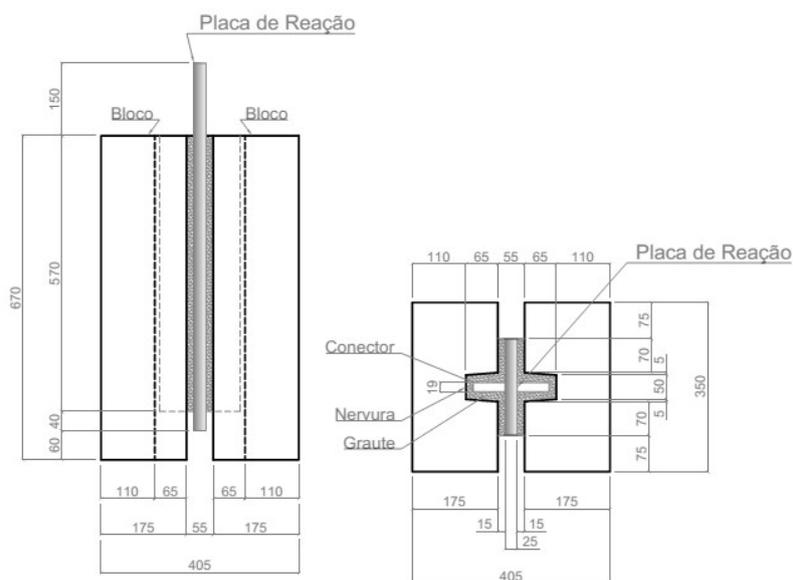
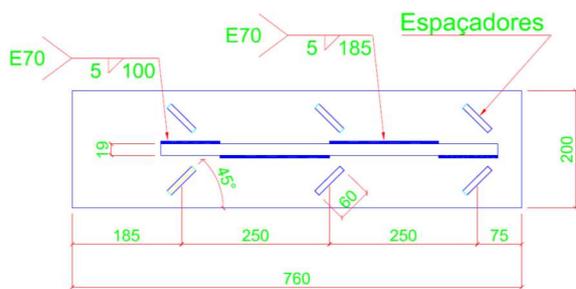


Figura 2 – Modelo de *Push-Out*

Neste trabalho as recomendações do Eurocode 4 (2004), no que tange ao ensaio de *Push-out* não são respeitadas em sua integralidade devido às particularidades construtivas, escolhidas em função dos parâmetros que se pretende analisar. Isto é permitido pela referida norma. Ressaltasse ainda que também foi objetivo da não observância às recomendações do Eurocode 4, a possibilidade de comparação dos resultados obtidos com o do trabalho de Thomann (2005), único trabalho disponível no contexto das ligações por aderência aplicada a estruturas mistas de aço e concreto, na altura dos ensaios de Diógenes (2013).

Em todos os conectores propostos foram soldadas barras de 12.5 mm sobre a superfície da placa de reação, visando simular chaves de cisalhamento e garantir o espaçamento entre a laje e a mesa do perfil (Figura 3).

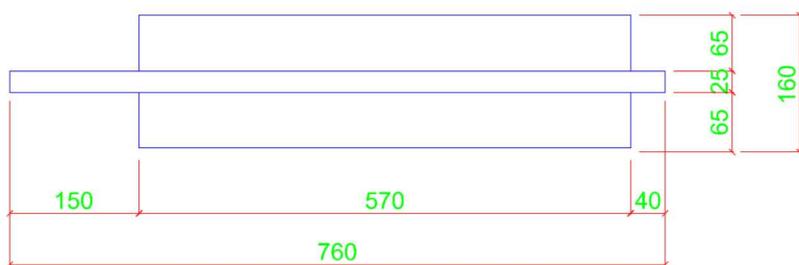


(a)

(b)

Figura 3 – Barras soldadas sobre a placa de reação: (a) Geometria; (b) Detalhe

A diferenciação dos conectores é em função de sua superfície. O conector tipo L corresponde àquele onde não foi realizado nenhum tipo de tratamento mecânico (usinagem), como se representa na Figura 4.

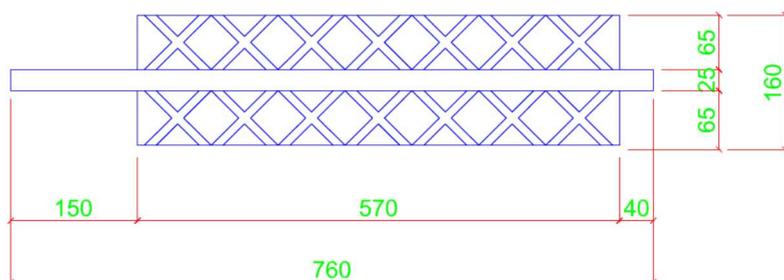


(a)

(b)

Figura 4 – Fôrmas do conector L Push-out: a) Dimensões em mm; b) Conector L + Placa de reação.

No conector tipo R, ao contrário do conector L, foi realizado um tratamento mecânico (usinagem), como demonstrado na Figura 5, visando melhorar o mecanismo de transferência de esforço de cisalhamento.



(a)

(b)

Figura 5 – Fôrmas do conector R Push-out: a) Dimensões em mm; b) Conector R + Placa de reação.

Inicialmente, se tentou reproduzir a geometria das ranhuras considerada no estudo de Thomann (2005) (Figura 6 – (a)). Todavia, por inviabilidade de ordem econômica, isto não foi possível. O tratamento mecânico proposto por Thomann (2005) previa a criação de losangos rebaixados de 1.4 mm, enquanto que Diógenes (2013) propôs canais rebaixados de 2.0 mm (Figura 6 – (b)).

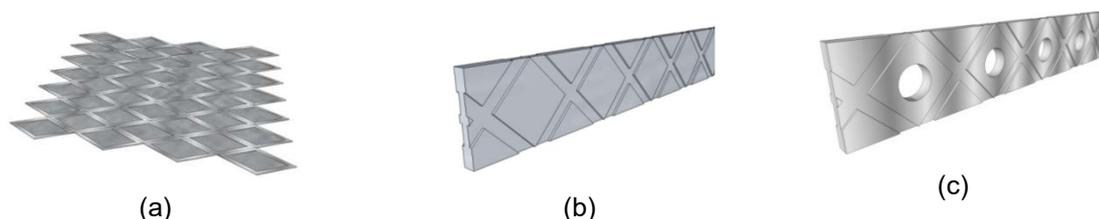


Figura 6 – Detalhe das ranhuras: (a) Utilizadas por Thomann (2005); (b) Conector R; (c) Conector RP

Não obstante, uma variação do conector tipo R foi proposta (Figura 6 – (c)). O conector do tipo RP (Figura 6 – (c)) é uma composição de dois outros, o Perfobond proposto por Leonhardt, Andr e e Harre (1987) e o conector do tipo R proposto neste estudo. A Figura 7 apresenta a geometria desse conector. A presença dos furos visou proporcionar um acr escimo na resistência pelo efeito pino criado pelo preenchimento do furo. I

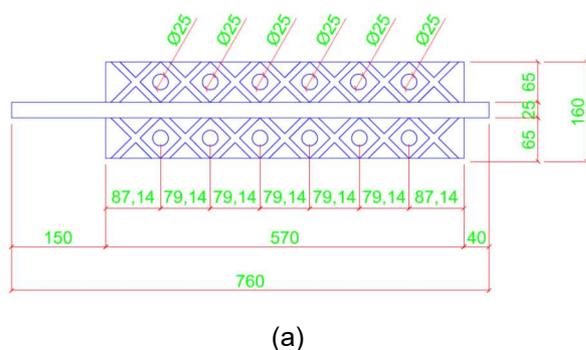


Figura 7 – F ormas do conector RP Push-out: a) Dimensões em mm; b) Conector RP + Placa de rea o

Uma vez realizado tratamento mecânico na superfície do aço, também foi idealizada uma rugosidade nos blocos de concreto, de maneira a melhorar a transferência de esforço entre as interfaces, já que sem a cria o de uma rugosidade nos blocos de concreto, a ruptura da liga o estaria fadada a acontecer na interface graute-concreto. Na Figura 8 – (a) pode-se observar a soluço adotada para obter a rugosidade pretendida. A colagem de uma manta plástica rugosa no fundo da f rma proporcionou a imprima o da rugosidade. A Figura 8 – (b) apresenta o resultado obtido com a manta nesta investiga o.



(a)



(b)

Figura 8 – Rugosidade utilizada nos blocos de concreto: (a) Fôrmas; (b) Detalhe da rugosidade.

A impressão de uma rugosidade visou proporcionar uma maior homogeneidade da superfície rugosa, uma vez que a utilização de retardadores de fornecem uma rugosidade superficial homogênea. A manta utilizada tem uma espessura nominal de 1,2 mm, o que caracteriza a superfície como uma “*smooth surface*” (superfície lisa), de acordo com a denominação do Eurocode 2 (2004).

Os protótipos experimentais descritos resumidamente acima, fazem parte do programa experimental piloto, desenvolvido na investigação de Diógenes (2013).

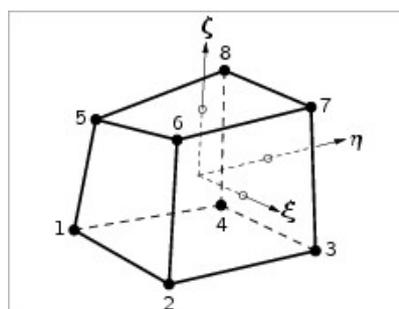
4 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

As simulações numéricas propostas no presente estudo serão realizadas utilizando o Método dos Elementos Finitos por meio do programa computacional Fx + DIANA® versão 9.4.4, registrada para o Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos. O pacote computacional DIANA® é um programa de Elementos Finitos baseado no método dos deslocamentos. Desenvolvido na Holanda desde 1972 por engenheiros civis da *TNO Building and Construction Research Company*. Já o Fx, foi desenvolvido pela empresa coreana Midas e integrado a plataforma do DIANA® em 2010 como pré e pós-processador.

A simulação numérica apresentada neste trabalho objetivou calibrar um modelo numérico que representasse os ensaios do tipo *Push-out*, realizados em nível piloto por Diógenes (2013) e avaliar a influência na presença de armadura no bloco de concreto na resposta do modelo numérico.

4.1 Elementos Finitos utilizados.

Os elementos finitos utilizados na simulação numérica estão disponíveis na biblioteca de elementos do DIANA®. Para a modelagem dos protótipos de *Push-out* foram utilizados elementos sólidos na modelagem dos componentes de aço e concreto e elementos de superfície na modelagem da interface aço – concreto. O elemento adotado foi o HX24L (Figura 9) para os sólidos, que é um elemento finito isoparamétrico com 8 nós e aproximação linear para os deslocamentos. Os graus de liberdade em cada nó desse elemento são os deslocamentos nas direções x, y e z.



(a)

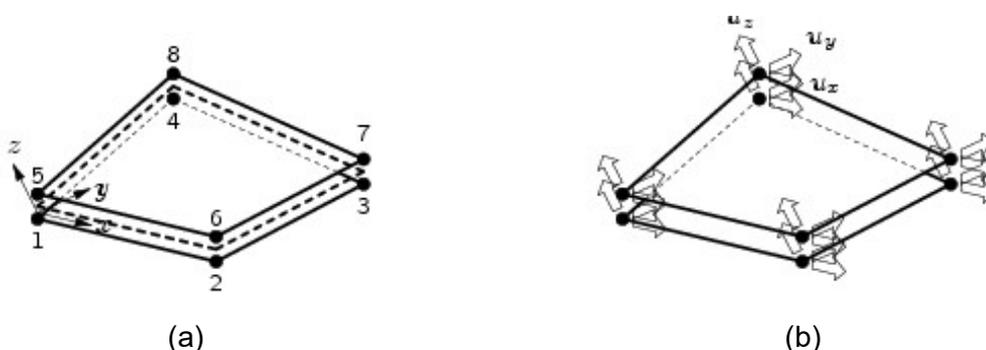
$$u_i(\xi, \eta, \zeta) = a_0 + a_1 \xi + a_2 \eta + a_3 \zeta + a_4 \xi \eta + a_5 \eta \zeta + a_6 \zeta \xi + a_7 \xi \eta \zeta$$

(b)

Figura 9 – (a): Elemento finito HX24L; (b) Função interpoladora (DIANA, 2012).

Por tratar-se de um elemento com aproximação linear para os deslocamentos, é necessária uma maior discretização da malha de elementos finitos. DIANA (2012) recomenda que, em análises não-lineares, sejam utilizados elementos com função aproximadora de segunda ordem (CHX60, por exemplo). Entretanto, o custo computacional inviabilizou o seu uso, haja vista a escala dos protótipos analisados, ainda que fosse possível utilizar uma malha menos refinada.

No tocante a modelagem da interface aço – concreto, foi utilizado o elemento finito de interface Q24IF (Figura 10). Este é um elemento de interface entre dois planos em uma configuração tridimensional que possui interpolação linear.



(a)

(b)

Figura 10 – Elemento finito de interface Q24IF: (a) Tipologia; (b) Deslocamentos (DIANA, 2012).

Para a modelagem das barras de aço das armaduras foi feito o uso de elementos chamados *reinforcements*. Esses elementos não possuem nós e funcionam como enrijecedores dos elementos finitos aos quais estão conectados, também conhecidos como *mother elements*. Os *reinforcements* não possuem graus de liberdade, porém têm seu comportamento habilitado na direção axial da barra. Nessa situação, a aderência entre o aço e o concreto é considerada perfeita.

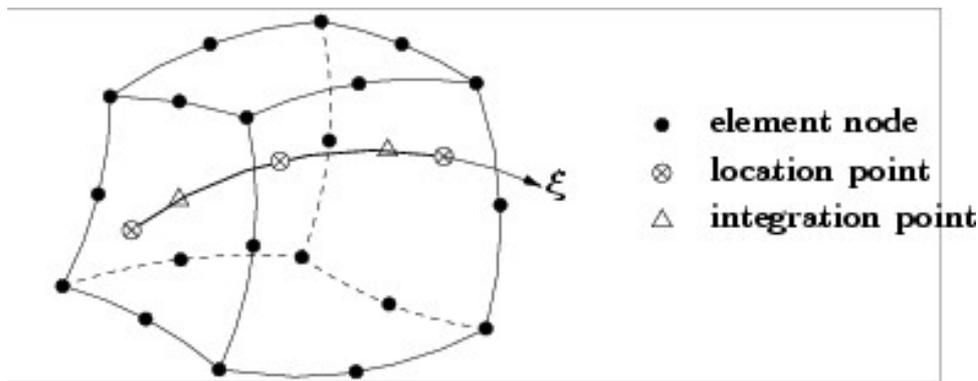


Figura 11 – Reinforcements em sólido (DIANA, 2012).

4.1.1 Modelo para a interface

Para a descrição do comportamento das interfaces, o DIANA® fornece alguns modelos para os vários tipos de elementos finitos planos de interface de sua biblioteca.

A partir da análise dos resultados experimentais dos ensaios o modelo de *Bond-slip* foi escolhido para simulação do comportamento da interface..

De acordo com DIANA (2012), as leis constitutivas para o *Bond-slip* são na sua maioria baseadas na teoria de deformação total, que expressa as trações em função dos deslocamentos relativos totais. No DIANA® a relação entre a tração normal e o deslocamento relativo normal é assumida como elástico linear, enquanto que a relação entre a tensão de cisalhamento (*Shear traction*) e o escorregamento (*slip*) é assumida como não-linear.

Existem três curvas do tipo Bond-slip (Figura 12): a *Cubic*, a *Power Law* e a *Multilinear*. Nesse trabalho a curva do tipo *Cubic* foi escolhida.

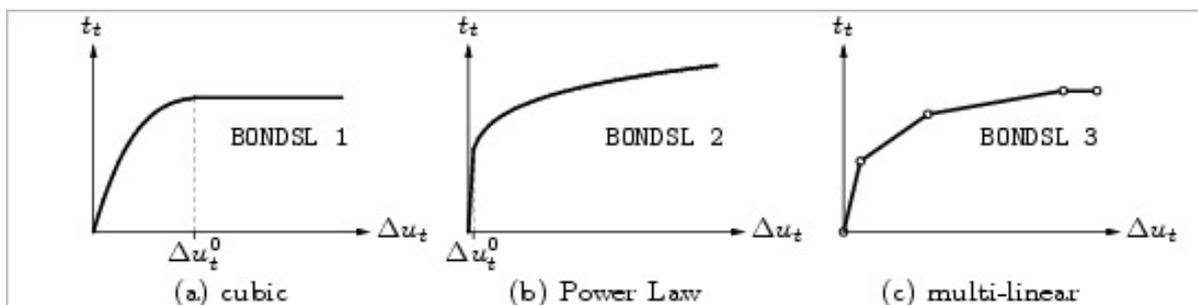


Figura 12 – Modelos de comportamento Bond-slip (DIANA, 2012).

Para descrever o comportamento da interface segundo a referida lei, se faz necessário estimar a constante \mathbf{C} e o d_{t0} . Como estimativa inicial, DIANA (2012) recomenda adotar \mathbf{C} igual ao valor da tensão de tração direta do concreto (f_t) e d_{t0} igual a 0,06mm. A adoção desses valores no contexto da presente investigação não foi satisfatória, portanto, a constante \mathbf{C} foi calculada analiticamente para cada tipo de protótipo *Push-out* e o valor do escorregamento limite estimado a partir do gráfico experimental tensão x escorregamento. Ainda é necessário entrar com a rigidez tangencial (K_t) e normal (K_n) iniciais. Foram adotados valores pequenos para o K_t e K_n a fim de permitir que a curva do tipo *Cubic* descreve-se o comportamento do protótipo experimental desde o início do experimento.

4.1.2 Modelo constitutivo para o concreto

Para a simulação do efeito de fraturamento nas estruturas de concreto armado foi feito o uso do modelo de fissuração distribuída (*smeared cracking*) *Total Strain*. Os modelos "*Total Strain*" descrevem o comportamento do material na tração e na compressão, baseados apenas numa relação tensão-deformação. De acordo com DIANA (2012), esses modelos representam de maneira satisfatória o estado limite último e de serviço de estruturas de concreto armado.

4.1.3 Modelo constitutivo para o aço

O modelo constitutivo adotado para o aço, barras e conectores foi o elasto-plástico perfeito com critério de ruptura de *Von Mises*. As curvas tensão versus deformação são normalmente obtidas de ensaios uniaxiais e o comportamento adotado é igual tanto na tração quanto na compressão.

4.1.4 O modelo numérico

Para a representação numérica dos protótipos de *Push-out* foi desenvolvido um modelo utilizando simetria, com a presença de apenas uma única interface que representaria o comportamento das demais presentes no modelo. Do contrário, apenas os resultados dos ensaios de *Push-out* não seriam suficientes para fomentar a avaliação numérica dos referidos protótipos.

Assim, o modelo numérico que representou o protótipo experimental de *Push-out* não apresentou a região da AAD (equivalente a região do graute na Figura 2), ou seja, a interface tem espessura nula e o bloco de concreto foi diretamente posicionado sobre o conector. Na Figura 13 são apresentados os componentes do modelo numérico em separado.

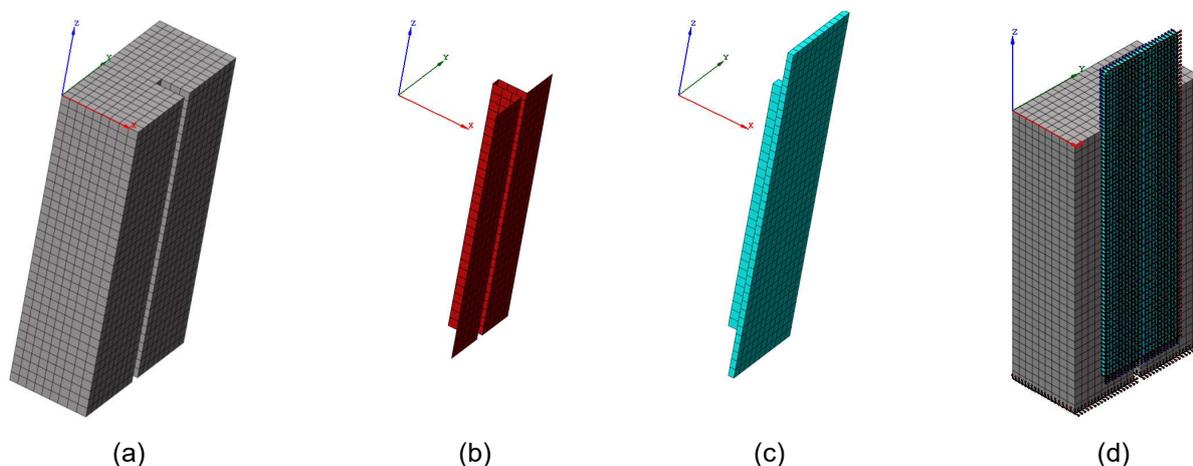


Figura 13 - Componentes do modelo numérico: (a) Bloco de concreto; (b) Interface; (c) Conector; (d) Aspecto final do modelo.

Com relação às condições de apoio, os nós da base do bloco de concreto tiveram sua translação em Z restringidas e os nós da placa de reação restringido as translações X e Y, a fim de aplicar a condição de simetria.

Para a avaliação da resposta do modelo numérico, optou-se pela prescrição de deslocamentos na direção do eixo Z, aplicados nos nós do topo da placa de reação, assim como no experimento.

Na Tabela 1 é apresentado os valores dos parâmetros necessários à implementação do modelo *Total Strain*, enquanto que na Tabela 2 são apresentados os parâmetros da interface para cada conector avaliado, L, R e RP as estimativas iniciais para os parâmetros da interface.

Tabela 1 – Parâmetros de entrada no DIANA – Concreto – *Push -out*.

Modelo <i>Total Strain</i>	FIXED
Módulo de elasticidade	45,99 GPa (tipo L); 42,95 GPa (tipo R); 35,32 GPa (tipo RP)
Poisson	0,2
Resistência à compressão	54,4 MPa (tipo L); 45,16 MPa (tipo R); 47,13 MPa (tipo RP)
Comportamento à compressão (curva)	PARABO
Resistência à tração	3,8 MPa (tipo L); 2,96 MPa (tipo R); 2,99 MPa (tipo RP)
Comportamento à tração (curva)	EXPONE
Energia de fratura à tração (Gf)	0,098 N.mm/mm ² (tipo L); 0,086 N.mm/mm ² (tipo R); 0,088 N.mm/mm ² (tipo RP)
Energia de fratura à compressão (Gc)	100 x Gf (Feenstra e Borst, 1993)
Redução da resistência à compressão devido à fissuração	VC1993 (Vecchio e Collins ,1993)
Retenção ao cisalhamento (curva)	CONSTA
β (coeficiente de retenção ao cisalhamento)	0,5

Tabela 2 – Parâmetros da interface.

Conector	K_t MPa/mm	K_n MPa/mm	Bond-slip	
			C	d_{t0}
L	1,0	0,0001	0,95	0,55
R			1,10	0,15
RP			1,25	0,55

Os valores apresentados na Tabela 2 para os parâmetros **C** e o d_{t0} foram calculados analiticamente de acordo com a formulação presente em DIANA (2012).

Para o aço, foi feito uso dos valores nominais das propriedades mecânicas de cada tipo utilizado, ASTM – A36 e CA-50, de acordo com os catálogos dos fabricantes, uma vez que nesta etapa não foi realizado ensaios de caracterização do referido material.

A estratégia de solução adota da foi a de *Newton-Raphson*, com critério de convergência em energia. A tolerância adotada a princípio foi de 10^{-3} . Para diminuir o tempo de processamento foi utilizado o algoritmo *Line Search*, que tem como função corrigir a solução encontrada nos métodos de solução tradicionais, de maneira a acelerar a taxa de convergência.

5 RESULTADOS

5.1 Calibração

Os valores apresentados para os parâmetros da interface na Tabela 2 necessitaram de calibração, portanto os valores efetivamente adotados para os parâmetros da interface são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros da interface efetivamente utilizados

Conector	K_t MPa/mm	K_n MPa/mm	Bond-slip	
			C	d_{t0}
L	1,0	0,0001	0,95	0,55
R			1,10	0,25
RP			1,45	0,55

O resultado da adoção dos parâmetros descritos na Tabela 3 é apresentado na Figura 14 de (a) a (c). Como pode ser percebido o modelo numérico aproxima relativamente bem à carga máxima, chegando até a apresentar boa aproximação do escorregamento em um dos casos avaliados, protótipo que utilizou o conector do tipo R. Entretanto, o modelo numérico não é capaz de reproduzir o trecho descendente da curva experimental, o que era previsto, uma vez que o *Bond-Slip* é um critério de ruptura.

Na Tabela 4 são apresentados os valores numéricos para a resistência máxima obtidos na simulação numérica. Na Tabela 4, ainda é apresentado o valor da coesão – entende-se como coesão a razão entre a resistência máxima do protótipo e a área da interface – e na Figura 15 as tensões de cisalhamento (equivalente à coesão) que ratificam a adoção dos parâmetros descritos na Tabela 3.

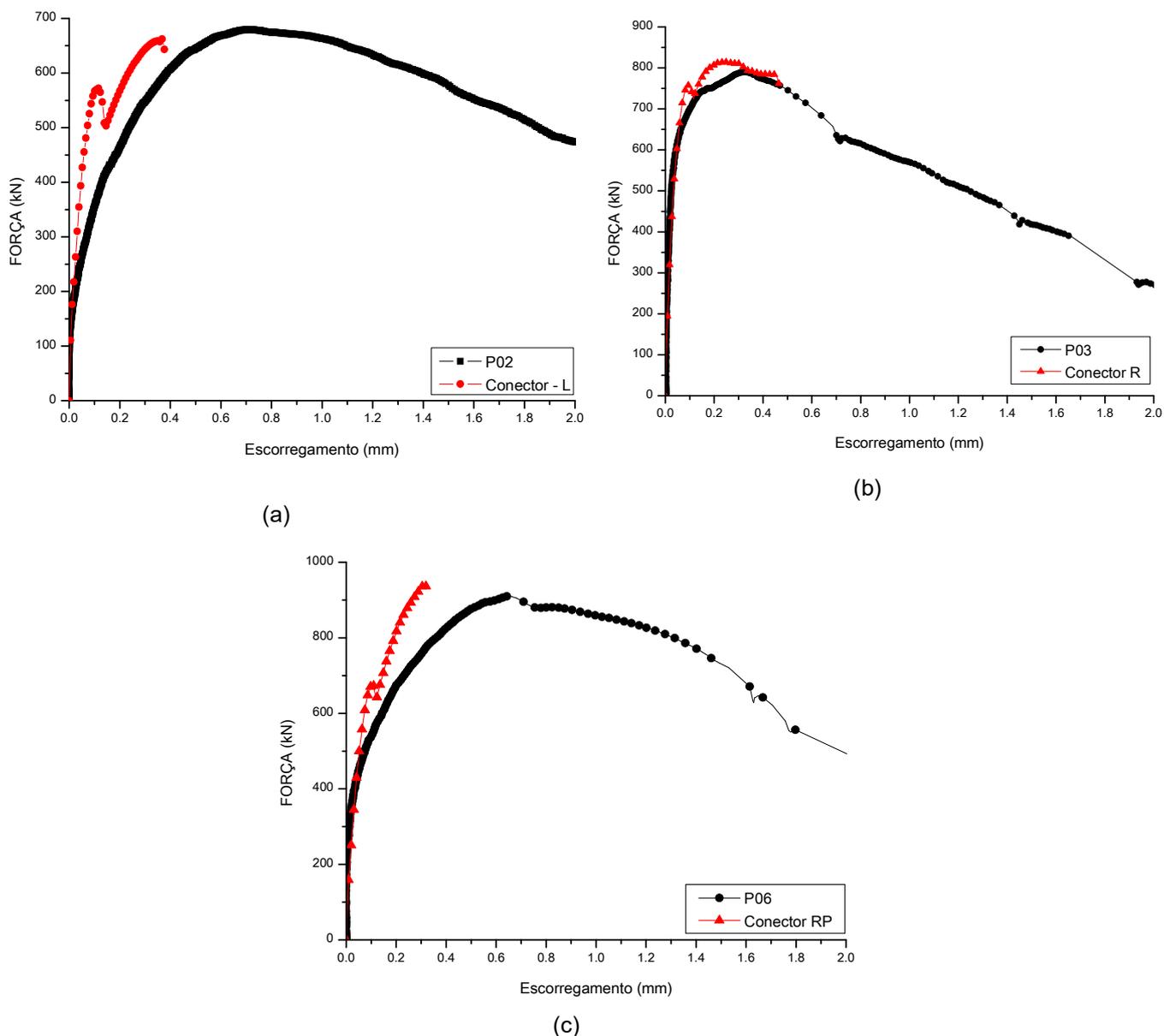


Figura 14 – Comparativo numérico x experimental: força x escorregamento.

Tabela 4 – Comparação – Força máxima – Experimental x Numérico.

Modelo	Resistência máxima			Coesão		
	Experimental* (kN)	Numérico (kN)	Variação (%)	Experimental* (MPa)	Numérico (MPa)	Variação (%)
L	680,14	658,81	+3,1	1,80	1,75	2,8
R	790,33	814,57	-3,1	2,09	2,16	-3,3
RP	911,20	936,30	-2,8	2,42	2,46	-1,7

*Referente aos modelos que não apresentaram assimetria

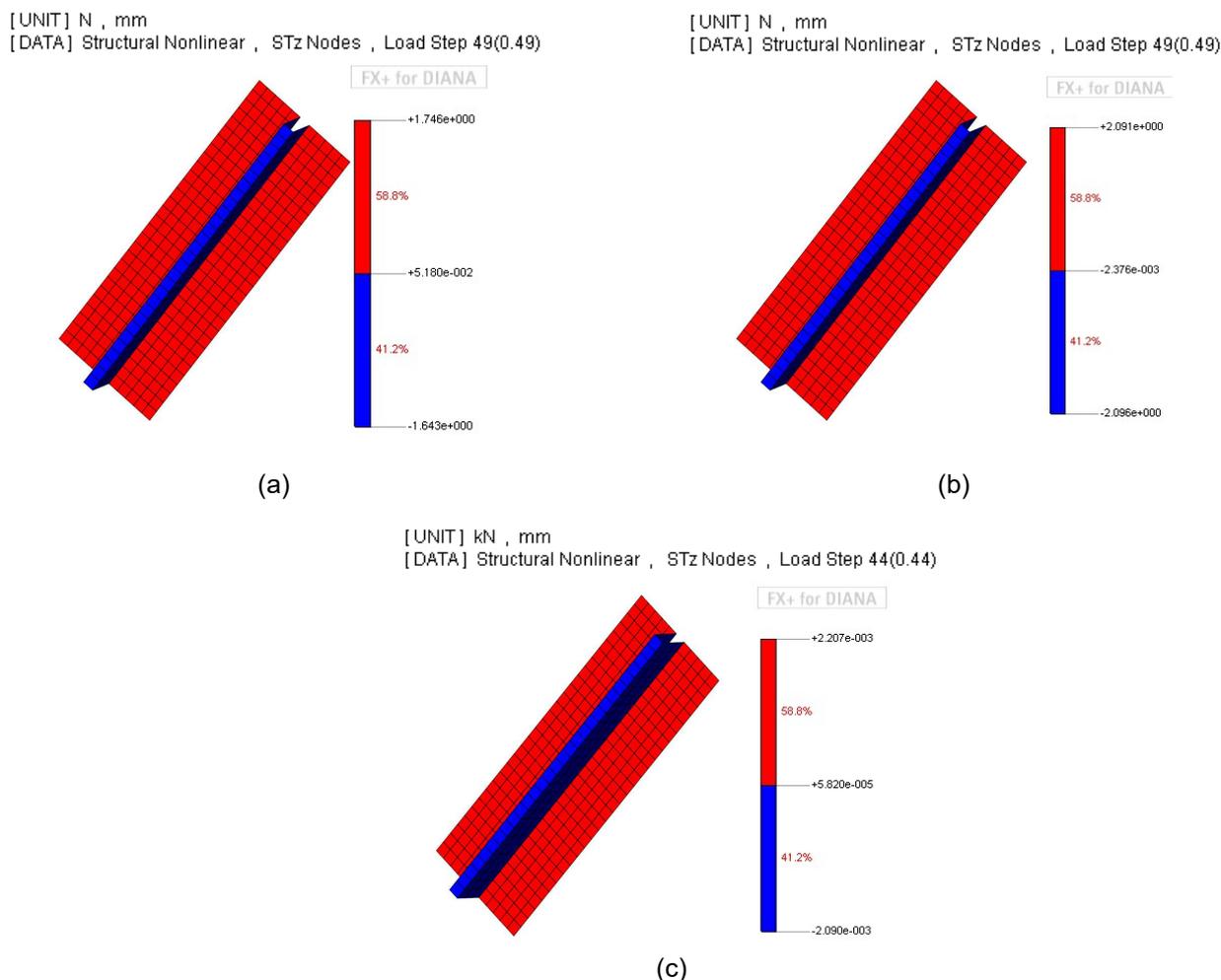


Figura 15 – Tensões na interface referente à carga máxima: (a) Conector do tipo L; (b) Conector do tipo R; (c) Conector do tipo RP.

5.2 Avaliação da presença de armadura

Em relação à avaliação da presença de armadura no bloco de concreto, na Tabela 5 é demonstrado que o reforço só foi significativo para o modelo que considerou o conector do tipo RP. Nesse modelo a maior resistência da interface solicita de maneira mais significativa o bloco, pois aumenta as tensões de confinamento no conector, o que proporciona um acréscimo na resistência do modelo.

Assim, entende-se que nos modelos pilotos desenvolvidos por Diógenes (2013) a interface comandou a ruptura nos conectores do tipo L e R, enquanto que a ruptura do bloco limitou a resistência do modelo do tipo RP.

Tabela 5 – Comparação – modelo numérico com e sem armadura no bloco.

Resistência máxima			
Modelo	Bloco de concreto simples (kN)	Bloco de concreto armado (kN)	Varição (%)
L	658,81	661,97	0,48%
R	814,57	818,05	0,42%
RP	936,30	1002,34	7,05%

*Referente aos modelos que não apresentaram assimetria.

Na Figura 16 de (a) a (c), são apresentadas as curvas experimentais e numéricas que ratificam o exposto na Tabela 5.

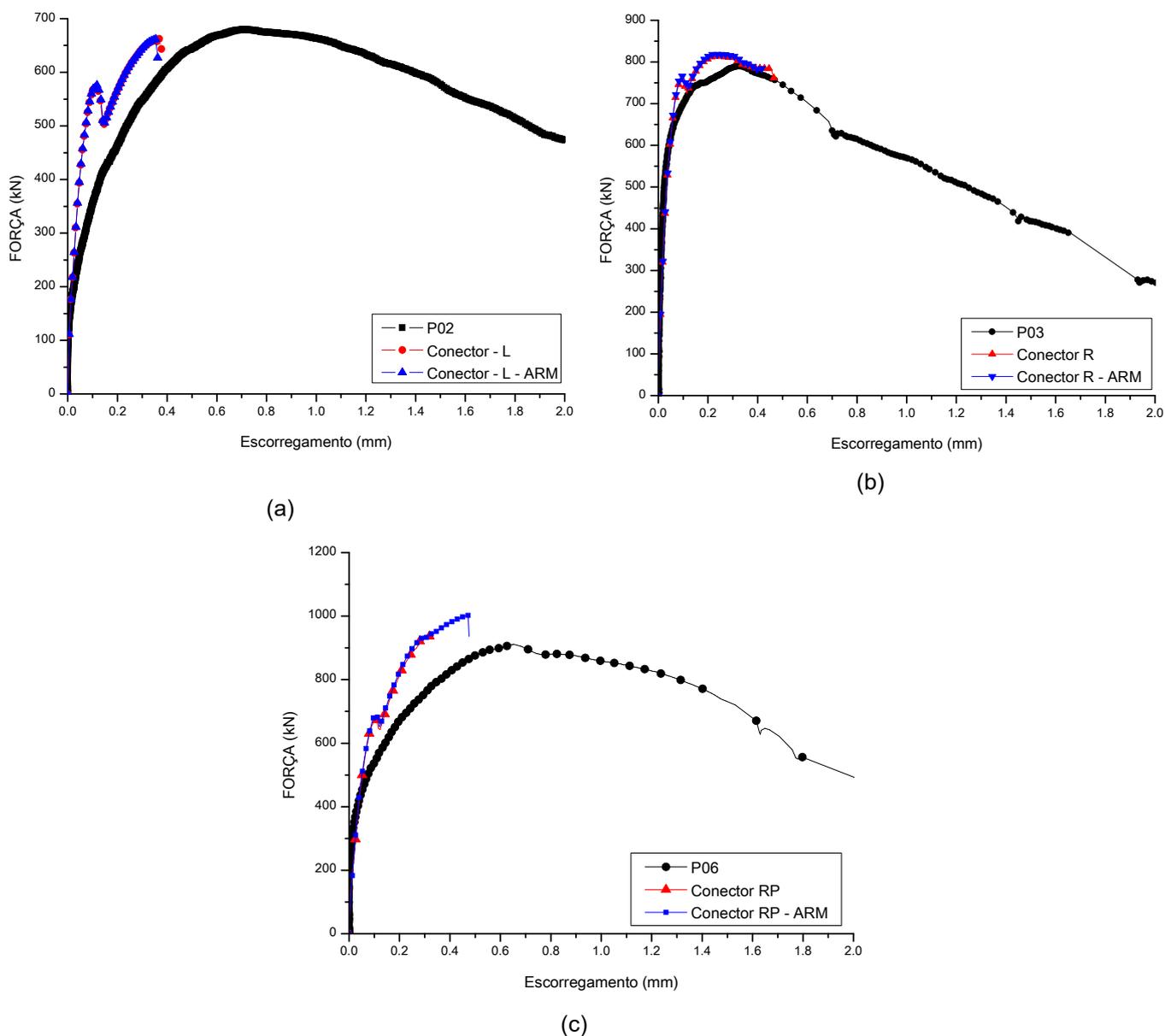


Figura 16 – Comparativo: bloco simples x bloco armado.

6 CONCLUSÕES

O modelo numérico desenvolvido neste trabalho se demonstrou adequado para descrever o comportamento da ligação, ainda que a mesma tenha sido simulada por uma única interface. Contudo, por se tratar de um modelo de ruptura, a obtenção do comportamento pós-ruptura não foi possível. Acredita-se que a não descrição do material de grauteamento no modelo deve estar associado os desvios em termos de escorregamento apresentados na resposta do modelo numérico.

Cabe ressaltar ainda, que os modelos numéricos apresentaram-se mais rígidos que os protótipos experimentais, o que talvez possa ser resolvido com a implementação de modelos multi-lineares que descrevam as interfaces envolvidas individualmente.

No tocante a influência da presença de armadura nos blocos de concreto, essa os resultados obtidos indicam que existiu.

Por fim acredita-se que as resistências obtidas por Diógenes (2013), em seus ensaios pilotos, poderiam ter sido superiores às obtidas, caso o mesmo tivesse optado pela utilização dos blocos armados.

7 AGRADECIMENTOS

Ao LE-EESC, a CAPES e a FAPESP pelo suporte a este trabalho.

8 REFERÊNCIAS

BECK, H. HEUNISCH, M. Zum Reibungsverbund zwischen Stahl und Betonfertigteilen bei dübellosen Verbundkonstruktionen. **Stahlbau**, v. 41, n. 2, p. 40-45, 1972.

BEZERRA, L. M. Estudo teórico-experimental da ligação entre pilares mistos preenchidos e vigas pré-moldadas de concreto. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2011.

CEB - Comité Euro-International Du Béton. **CEB MODEL CODE 1990**, 1990.

DIANA, T. DIANA Finite Element Analysis. User's manual release 9.4.4. Delft, Netherland, 2012.

DIÓGENES, H. J. F. *Análise Numérica e Experimental de Ligações por Aderência Aço – Concreto Aplicada a Estruturas Mistas*. 198 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

DAUNER, H. G. et al. **Ponts mixtes à construction rapide**. Département Fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication, Office fédéral des routes, 2002.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1: General rules and rules for buildings. Brussels, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels, 2004.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BETÓN. **fib Model Code 2010**, 2010.

FEENSTRA, P. H.; BORST, R. DE. Aspects of robust computational modeling for plain and reinforced concrete. **HERON**, v. 38, n. 4, p. 76, 1993.

LEONHARDT, F., ANDRÄ, W., ANDRÄ, H.-P., HARRE, W. Neues, vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit. **Beton und Stahlbetonbau**, v. 12, p. 325-331, 1987.

KITOH, H. SONODA, K. **Bond characteristics of embossed steel elements**. Composite Construction in Steel and Concrete III, Proceedings of an Engineering Foundation Conference. American Society of Civil Engineers, 1996.

THOMANN, M. (2005). **Connexions par adhérence pour les ponts mixtes acier-béton**. PhD. Thèse, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Faculté Environnement Naturel, Architectural et Construit, 2005.

PAPASTERGIOU, D. Connections by Adhesion, Interlocking and Friction for Steel-Concrete Composite Bridges under Static and Cyclic Loading. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2012.

VECCHIO, J. F.; COLLINS, M. P. ; Compression Response of Cracked Reinforced Concrete. **Journal of Structural Engineering**, v. 119, n. 12, p. 3590-3610, 1993.