



XIV Congresso Brasileiro
de Pontes e Estruturas

Estudo numérico da interface do Concreto Pré-Moldado e Concreto de Altíssimo Desempenho com Fibras

Lisiane Pereira Prado¹, Alex Micael Dantas de Sousa²

¹ Faculdade de Engenharia e Ciências - Câmpus de Guaratinguetá - UNESP / Departamento de Engenharia civil
/ lisiane.prado@unesp.br

² Escola de Engenharia de São Carlos - EESC/USP / Departamento de Engenharia de Estruturas /
alex_dantas@usp.br

Resumo

O concreto de alta resistência (CAR) tem sido muito utilizado na confecção de estruturas de concreto pré-moldado. Uma das dificuldades encontradas nesse sistema construtivo consiste em estabelecer uma ligação monolítica entre os elementos. A solução frequente consiste no preenchimento com moldagem no local utilizando o CAR. Atualmente, o concreto de altíssimo desempenho com fibras (UHPC – sigla em inglês), com propriedades mecânicas elevadas (resistência à tração e compressão), surge como opção de preenchimento da região da ligação destes elemento. O projeto consiste de uma validação numérica no Abaqus® dos parâmetros da interface do concreto pré-moldado (CAR) e o concreto de preenchimento (UHPC) em diferentes ensaios de aderência: tração na flexão, cisalhamento direto e cisalhamento inclinado. De modo geral os resultados obtidos no modelo numérico obtiveram boa resposta quando comparado com os resultados experimentais, tanto na simulação do ensaio de resistência à tração na flexão quanto no ensaio de cisalhamento direto e cisalhamento inclinado. Isso indica que os parâmetros obtidos do ensaio experimental conseguiram ter uma boa representatividade do modelo numérico.

Palavras-chave

Concreto de alta resistência (CAR); Concreto de altíssimo desempenho com fibras (UHPC); Interface; Modelo numérico.

Introdução

O advento e aprimoramento de aditivos e adições minerais na mistura de concreto permitiram uma evolução desse material ao longo dos anos, como o ganho nas propriedades mecânicas. Dentro desse cenário pode-se citar o concreto de alta resistência (CAR) e o concreto de altíssimo desempenho com fibras de aço (ultra-high-performance concrete - UHPC), no qual as fibras de aço são adicionadas à mistura para aumentar a resistência residual à tração por fissuração.

Quando utilizado na produção de elementos de concreto, o UHPC é inviável economicamente, devido ao seu elevado custo. Porém, se o mesmo é aplicado em regiões estruturais específicas, existe redução do volume de material, conferindo uma viabilidade econômica à sua utilização.

Poucos são os estudos sobre interfaces de concretos utilizando modelos numéricos, principalmente pela dificuldade de obter os parâmetros de caracterização da interface para calibração e posterior extrapolação. Esses geralmente são determinados através de ensaios experimentais ou são adotados valores sem embasamento experimental.

Para estudar o comportamento da interface do concreto normal (NC) e o concreto de altíssimo desempenho (UHPC), Yuan et al. (2022) propôs um modelo a ser implementado dentro do elemento finito no software Abaqus®. Para controlar a força de pico da interface considerou-se a tensão máxima de tração e tensão máxima de cisalhamento, na qual os efeitos desses parâmetros foram investigados no ensaio de tração direta e no ensaio de cisalhamento inclinado. Já o coeficiente de

atrito considerado no modelo influenciou à força última no ensaio de cisalhamento inclinado. Além disso, a tenacidade à fratura normal e a tenacidade à fratura tangencial foram os parâmetros usados para descrever a dissipação de energia da interface. Os parâmetros de viscosidade ξ_n e ξ_t , normal e tangencial respectivamente, serviram para controlar o comportamento pós-pico. De modo geral, os autores obtiveram resultados numéricos concordantes com os resultados experimentais. Porém os mesmos elucidaram que o comportamento da interface do UHPC e NC é complexo, pois é afetado por muitos fatores, dentre eles: a resistência do UHPC ou NC, condição de cura, rugosidade da superfície, retração e fluência.

Este estudo consiste de uma validação numérica no Abaqus® dos parâmetros da interface do concreto de alta resistência (CAR) e o concreto de altíssimo desempenho com fibras (UHPC) para os diferentes tratamentos superficiais.

Ensaio de caracterização e tipos de interfaces estudados

Para o estudo da interface do CAR e o UHPC foram considerados diferentes tipos de tratamentos superficiais no CAR: Chave de cisalhamento (SK), Agregado graúdo exposto (CA), Agregado fino exposto (FA), Lisa (S) (Tabela 1).

Tabela 1 – Descrição dos tratamentos superficiais feitos no CAR.

Imagem	Nome (abreviação)
	Chave de cisalhamento - Shear Keys (SK)
	Agregado graúdo exposto - Exposed coarse aggregate (CA)
	Agregado fino exposto - Exposed fine aggregate (FA)
	Lisa - Smooth (S)

Diferentes tipos de ensaios de resistência na interface do CAR e o UHPC foram executados experimentalmente: tração na flexão de acordo com a ABNT NBR 12142: 2010; tração por compressão diametral de acordo com a ABNT NBR 7222: 2011; cisalhamento direto (Push-off) e ensaio de cisalhamento inclinado. O esquema de aplicação da força nos ensaios realizados pode ser visto na Figura 1.

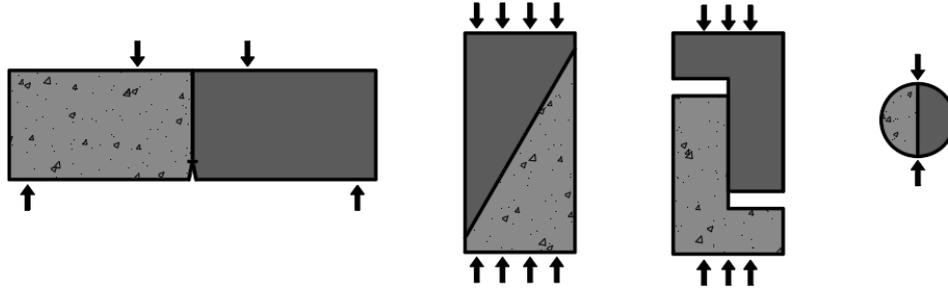


Figura 1 – Esquema de aplicação do carregamento: (a) ensaio de tração na flexão; (b) ensaio de cisalhamento inclinado; (c) ensaio de cisalhamento direto (push-off); (d) ensaio de tração por compressão diametral.

Propriedades da interface

No estudo da interface dos concretos no Abaqus® foi adotada a propriedade de interação superfície-superfície (surface-to-surface). No contato da superfície foi considerado o comportamento coesivo (cohesive behavior) em conjunto com o dano para representar o comportamento pós-pico da ligação das duas superfícies coesivas.

De acordo com o Guia de Usuário do Abaqus®, o comportamento coesivo é baseado no modelo de tração-separação elástico, assumindo um comportamento elástico inicialmente linear. O comportamento elástico é escrito em função de uma matriz constitutiva elástica que relaciona as tensões normais (t_n) e de cisalhamento (t_s, t_t) com os seus respectivos deslocamentos nessas direções ($\delta_n, \delta_s, \delta_t$) (Equação 1). Os coeficientes de rigidez na direção normal, K_{nn} , e nas direções tangenciais, $K_{tt} = K_{ss}$, são os parâmetros de entrada no modelo que relaciona as tensões e os deslocamentos (Equação 2).

Conforme o Guia de Usuário do Abaqus®, os coeficientes de rigidez normal e tangencial são desacoplados, na qual a separação normal pura não gera forças coesivas nas direções de cisalhamento e o deslizamento do cisalhamento puro não gera forças coesivas na direção normal (Equação 3). Caso o comportamento seja acoplado de tração-separação, os outros parâmetros de rigidez precisam ser definidos (Equação 1).

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{ns} & k_{nt} \\ k_{ns} & k_{ss} & k_{st} \\ k_{nt} & k_{st} & k_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} = K \delta \quad (1)$$

$$k_{nn} = \frac{\sigma}{\delta} \quad (2)$$

$$k_{ss} = k_{tt} = \frac{\tau}{\delta}$$

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & 0 & 0 \\ 0 & k_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & k_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} = K \delta \quad (3)$$

Os parâmetros de entrada para caracterização da interface no Abaqus® foram o coeficiente de rigidez na direção normal, K_{nn} , obtido do ensaio de resistência à tração na flexão por apresentar melhor representatividade (PRADO et al., 2022), e o coeficiente de rigidez na direção tangencial, K_{ss} e K_{tt} , determinado do ensaio de cisalhamento direto. No dano foi empregado o critério de máxima tensão nominal, com os valores de entrada obtidos dos resultados experimentais: resistência à tração na flexão ($f_{ct,f}$) e tensão de cisalhamento última (τ_{ultima}). O critério de evolução do dano foi o deslocamento

plástico e o parâmetro exponencial, cujos valores foram adotados, conforme apresentado na Tabela 2. Esse critério só foi empregado na modelagem do ensaio de resistência a tração na flexão, na qual foi possível obter o comportamento pós-pico.

Tabela 2 - Valores de entrada na caracterização da interface no critério tração-separação Abaqus®

Tratamentos superficiais	K_{nn} (N/mm ³)	$K_{ss} = K_{tt}$ (N/mm ³)	$f_{ct,f}$ (N/mm ²)	τ_{ultima} (N/mm ²)	$\delta_{plastico}$	Parâmetro exponencial
Lisa (S)	241,4	161,5	4,2	6,6	0,016	1,2
Agregado graúdo exposto (CA)	241,4	161,5	4,2	6,6	0,016	1,2
Agregado fino exposto (FA)	323,0	419,1	2,4	7,7	0,013	1,2
Shear Keys (SK)	99,3	161,5	2,0	7,0	0,008	1,2

Validação numérica dos parâmetros da interface

As estruturas no modelo numérico foram criadas em partes separadas, sendo uma parte constituída pelas propriedades dos materiais referente ao CAR e a outra parte com as propriedades dos materiais referentes ao UHPC. A associação das partes se deu pela interface (Figura 2). Para a criação da seção no Abaqus® foi considerado o elemento sólido homogêneo com espessura unitária no estado plano de tensões. Adotou-se uma malha quadrada com o tamanho do elemento finito de 10 mm (Figura 2), valor considerado com base no melhor resultado dos testes realizados. A ordem geométrica do elemento foi linear, considerando o estado plano de tensão com integração reduzida (CPS4R). A aplicação do carregamento foi através do controle de deslocamento e as condições de apoio utilizadas foram baseadas nos ensaios realizados.

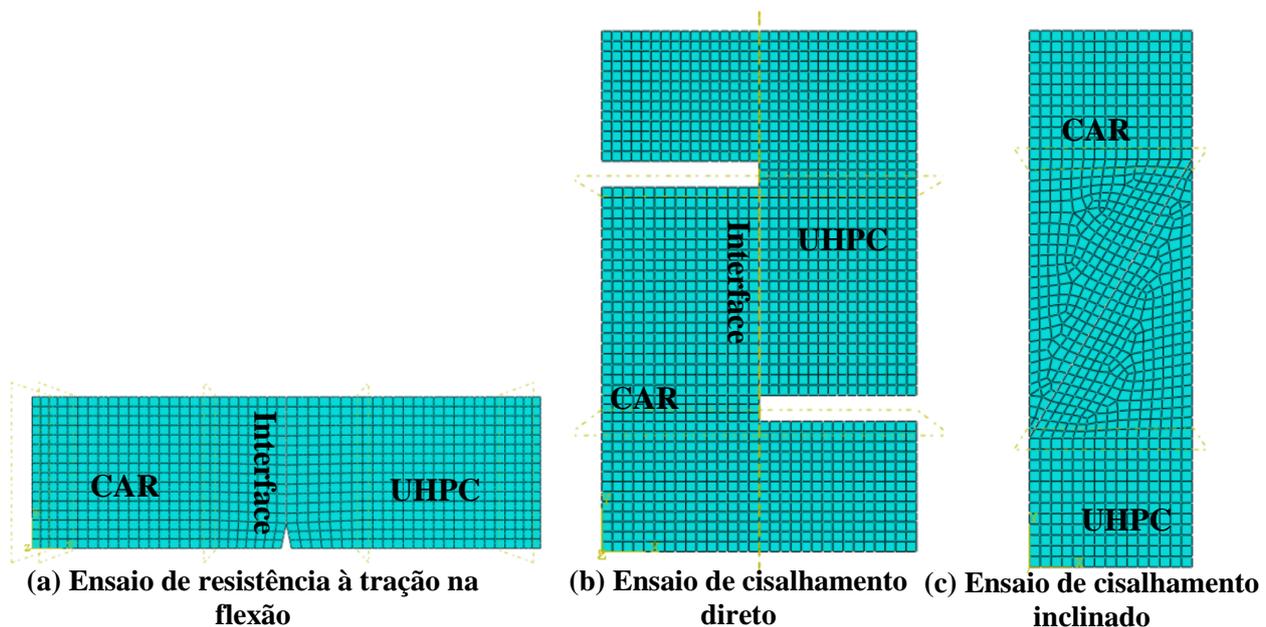
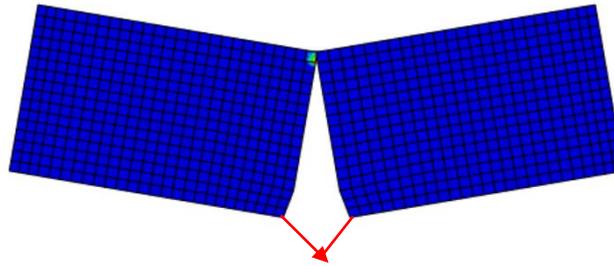


Figura 2 - Imagem da malha de elementos finitos para os ensaios modelados

Resistência à tração na flexão

A Figura 3 exibe a forma de ruptura obtida no modelo numérico para o ensaio de tração na flexão, indicando os nós analisados nos resultados dos deslocamentos.



Nós analisados para o deslocamento

Figura 3 - Modo de ruptura no modelo numérico para o ensaio de resistência à tração na flexão.

A Figura 4 apresenta os resultados das reações dos apoios versus deslocamento relativo horizontal dos nós analisados no modelo numérico comparado com os obtidos experimentalmente no ensaio de resistência à tração na flexão, mostrando o comportamento pós-pico e a evolução do dano exponencial das interfaces. Para as interfaces Agregado graúdo exposto (CA), as curvas obtidas numericamente foram similares as obtidas experimentalmente, tanto na fase linear quanto no comportamento pós-pico. Por outro lado, na interface Lisa (S), o pós-pico do modelo numérico foi diferente do comportamento experimental, indicando que o parâmetro do dano não foi representativo, em virtude da ruptura brusca (Figura 4-b).

Na interface chave de cisalhamento (SK), o trecho ascendente da curva representado pelo parâmetro de rigidez diferenciou do resultado experimental, bem como o comportamento pós-pico (Figura 4-c). No entanto, o comportamento linear numérico da interface agregado miúdo exposto (FA) assemelhou-se com o resultado experimental, já o trecho pós-pico do modelo numérico divergiu do experimental, conforme pode ser visto na Figura 4-d.

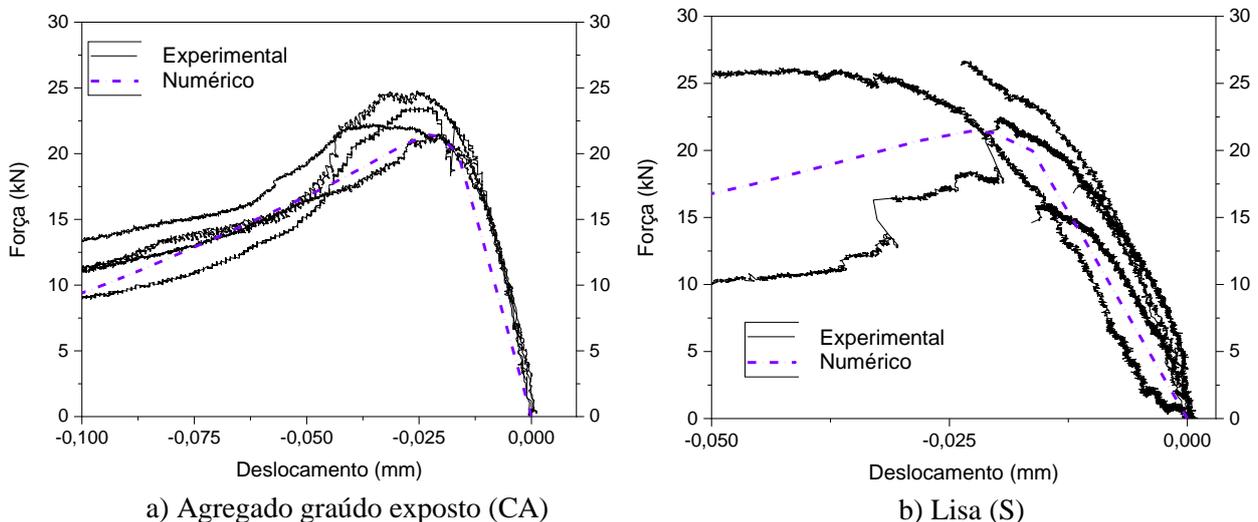


Figura 4 - Curva força versus deslocamento dos resultados experimentais e numéricos – resistência à tração na flexão das interfaces – Parte I

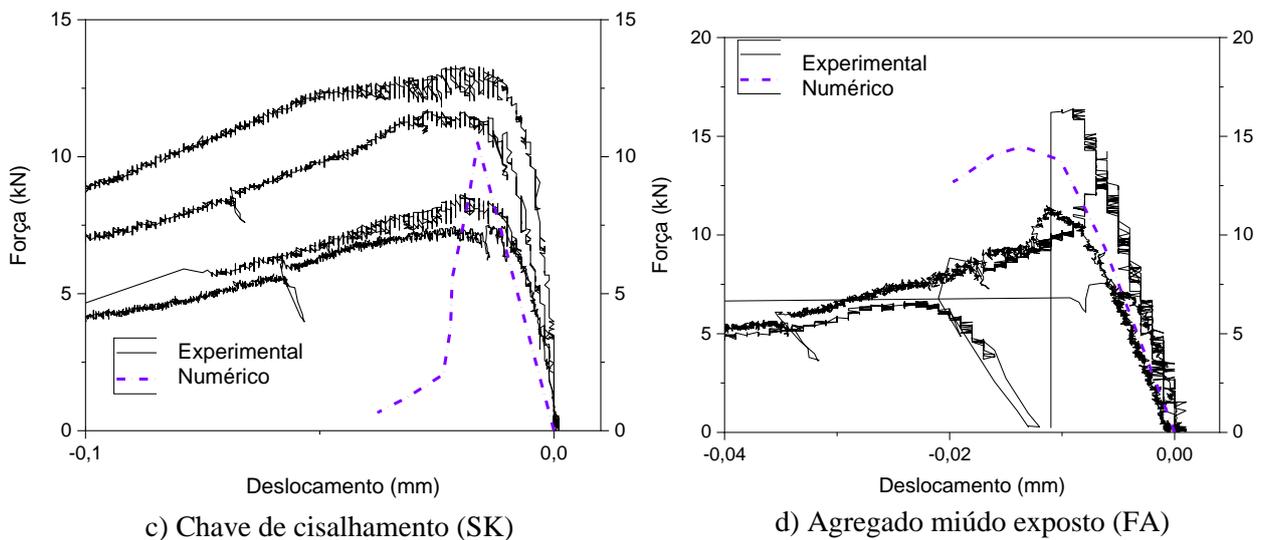


Figura 4 - Curva força versus deslocamento dos resultados experimentais e numéricos – resistência à tração na flexão das interfaces – Parte II

A Tabela 3 apresenta os resultados comparativos dos valores obtidos experimentalmente e numericamente para o ensaio de resistência à tração na flexão. As interfaces que obtiveram a melhor aproximação da força de ruptura do comportamento numérico em relação ao experimental foram a Agregado graúdo exposto (CA) e Chave de cisalhamento (SK), com uma variação máxima de 6%. A interface Agregado miúdo exposto (FA) foi a de menor representatividade. Em relação aos deslocamentos obtidos numericamente e experimentalmente, as interfaces CA e SK obtiveram a melhor aproximação entre o numérico e o experimental, e a interface FA obteve a menor aproximação entre o numérico e o experimental.

Tabela 3 - Comparação dos resultados numérico e experimental para o ensaio de resistência à tração na flexão.

Interface	$F_{ruptura} -$ experimental (kN)	$F_{ruptura} -$ numérico (kN)	$F_{numérico} /$ $F_{experimental}$	Deslocamento na ruptura experimental	Deslocamento na ruptura numérico	$D_{numérico} /$ $D_{experimental}$
CA	22,7	21,3	0,94	-0,02	-0,02	1,0
S	21,7	21,3	0,98	-0,017	-0,02	1,2
FA	12,5	14,4	1,15	-0,008	-0,013	1,6
SK	10,3	10,5	1,01	-0,02	-0,02	1,0

Resistência ao cisalhamento direto (Push-off)

A Figura 5 apresenta a forma de ruptura obtido no modelo numérico para o ensaio de resistência ao cisalhamento direto, indicando os nós analisados nos resultados dos deslocamentos.

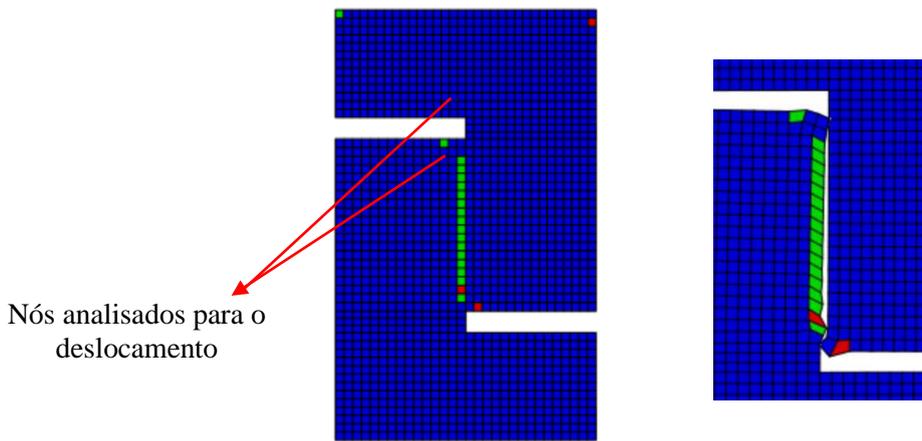


Figura 5 - Modo de ruptura no modelo numérico para o ensaio de cisalhamento direto.

Os resultados da reação de apoio versus deslocamento relativo dos nós analisados no modelo numérico comparado com os resultados experimentais são apresentados na Figura 6. Para todas as interfaces estudadas, Agregado graúdo exposto (CA), Lisa (S), Chave de cisalhamento (SK) e Agregado fino exposto (FA), as curvas obtidas numericamente conseguiram representar o resultado experimental no trecho ascendente.

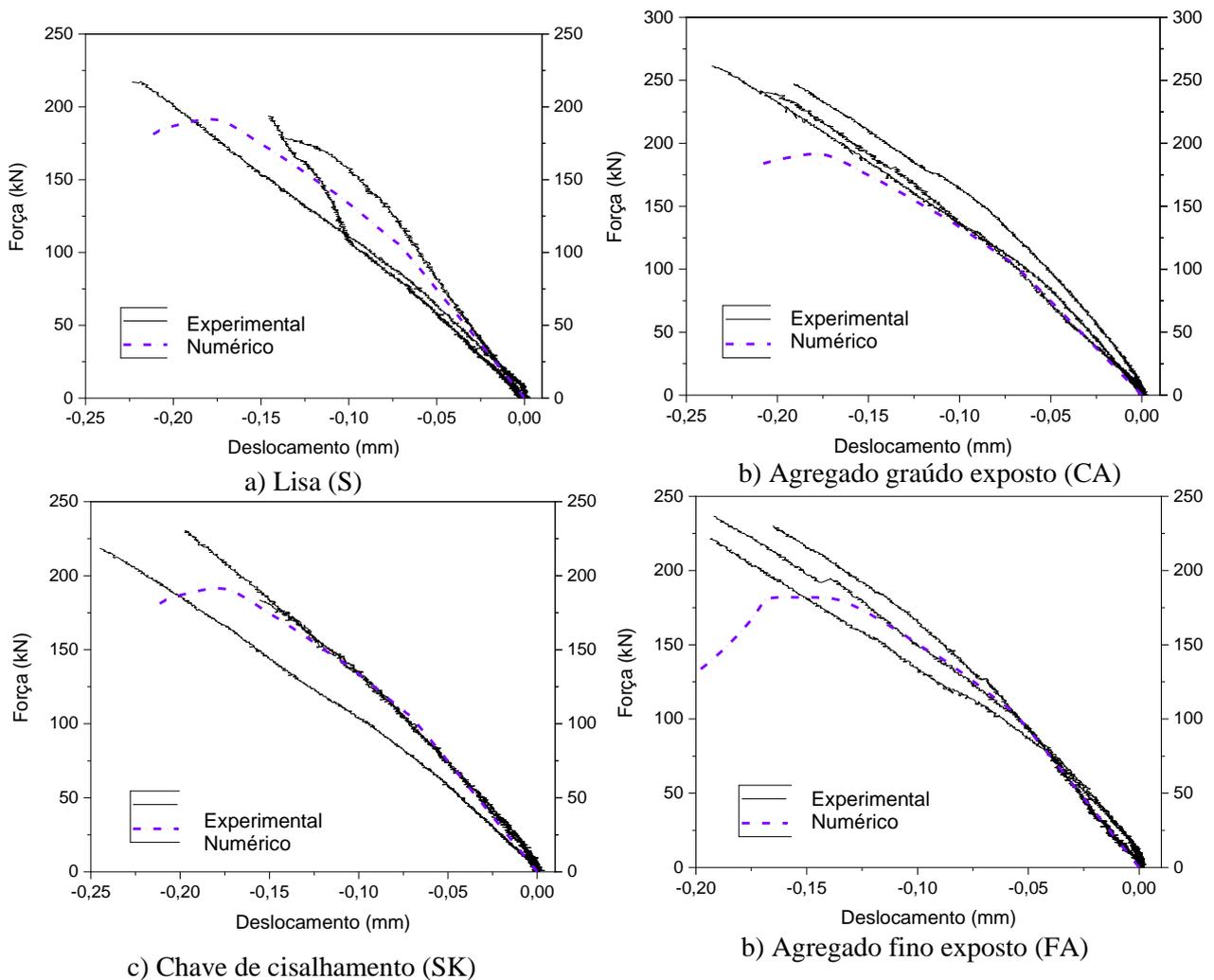


Figura 6 - Curva força versus deslocamento dos resultados experimentais e numéricos – resistência ao cisalhamento direto.

A Tabela 4 apresenta os resultados comparativos dos valores obtidos experimentalmente e numericamente para o ensaio de cisalhamento direto. As interfaces que obtiveram a melhor aproximação da força de ruptura do comportamento numérico em relação ao experimental foram a Lisa (S) e Chave de cisalhamento (SK), com uma variação máxima de 9%. A interface Agregado exposto (CA) foi a de menor aproximação do modelo numérico para o experimental em relação a força de ruptura, ou seja, 33%. Em relação aos deslocamentos numérica e experimental, as interfaces SK e FA tiveram uma boa correspondência.

Tabela 4 - Comparação dos resultados numérico e experimental para o ensaio de resistência ao cisalhamento direto

Interface	$F_{ruptura}$ - experimental (kN)	$F_{ruptura}$ - numérico (kN)	$F_{numérico} / F_{experimental}$	Deslocamento experimental	Deslocamento numérico	$D_{numérico} / D_{experimental}$
L	196,46	191,6	0,98	-0,169	-0,18	1,23
CA	249,60	191,6	0,77	-0,211	-0,18	1,5
SK	210,87	191,6	0,91	-0,199	-0,18	1
FA	229,60	182,0	0,80	-0,183	-0,16	1

Resistência ao cisalhamento inclinado

A Figura 7 apresenta o modo de ruptura obtido no modelo numérico para o ensaio de cisalhamento inclinado, indicando os nós analisados nos resultados das deformações.

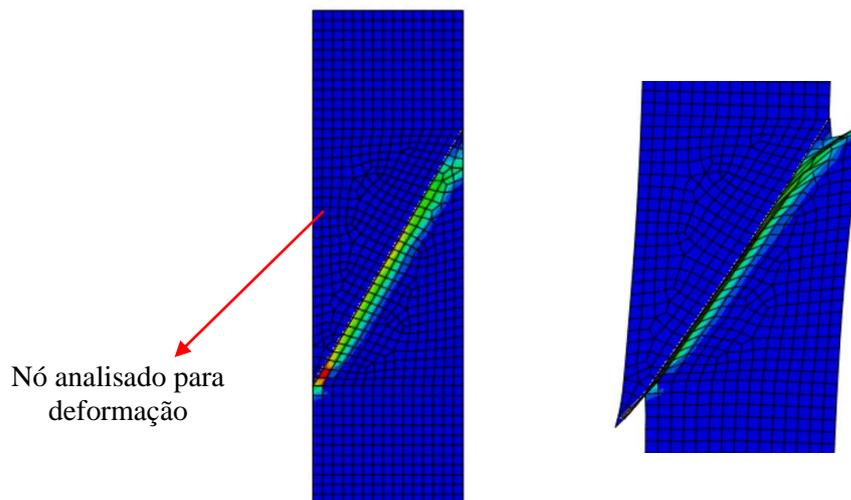


Figura 7 - Modo de ruptura no modelo numérico para o ensaio de cisalhamento inclinado

A Figura 8 mostra os resultados da reação do apoio versus deformação dos nós analisados no modelo numérico comparado com os resultados obtidos experimentalmente. As interfaces Agregado graúdo exposto (CA) e Lisa (S) descreveram comportamento numérico e experimental semelhantes. Em relação a interface Chave de cisalhamento (SK), as curvas experimentais destoaram entre si, deste modo, o comportamento da curva numérica foi intermediária ao comportamento das curvas experimentais. Por outro lado, a superfície com Agregado miúdo exposto (FA) obteve um comportamento de rigidez numérico diferente do modelo experimental.

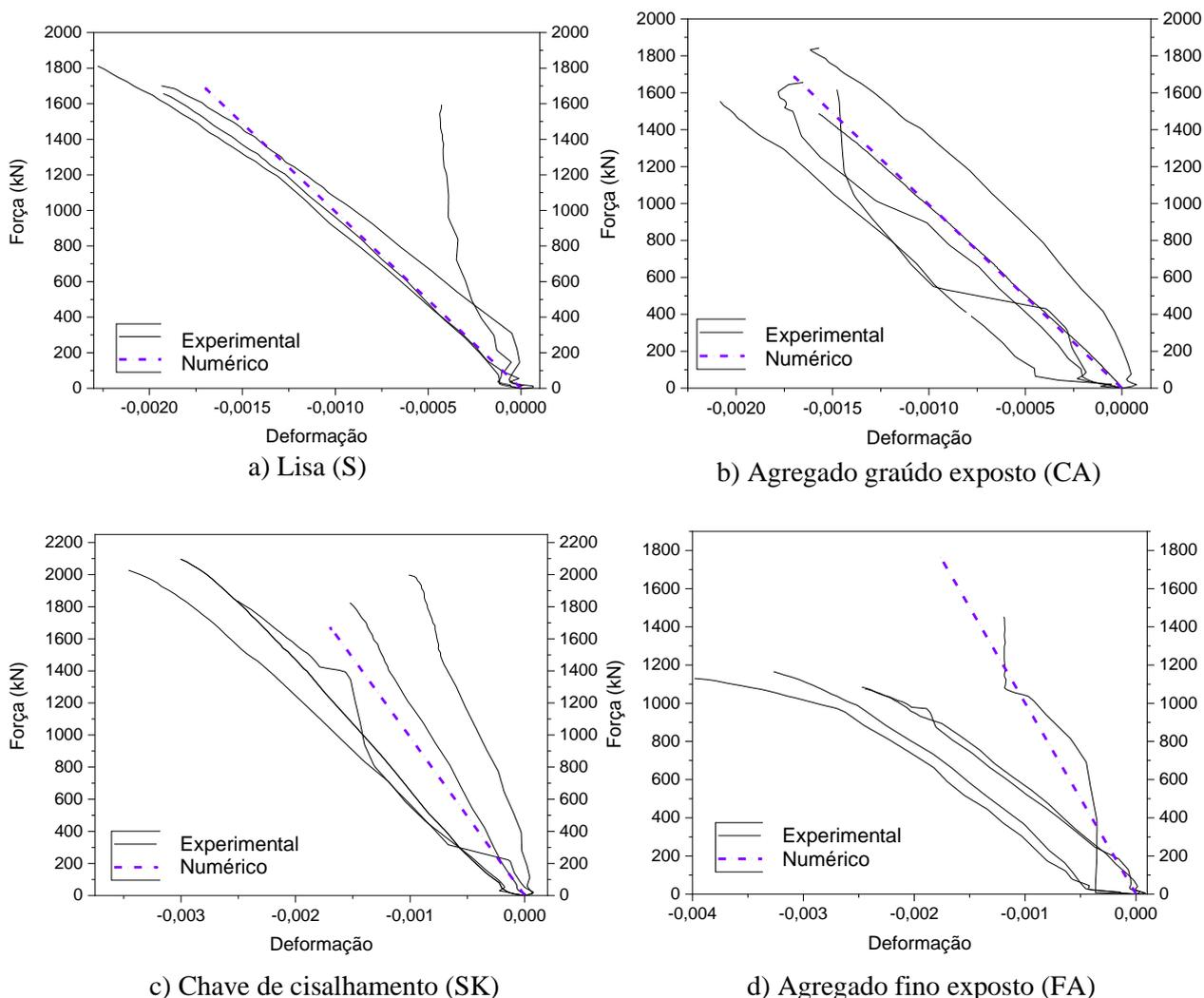


Figura 8 - Curva força versus deformação dos resultados experimentais e numéricos – resistência ao cisalhamento inclinado

A Tabela 5 apresenta os resultados comparativos dos valores obtidos experimentalmente e numericamente para o ensaio de cisalhamento inclinado. As interfaces que apresentaram o melhor comportamento em relação à força de ruptura do modelo numérico e experimental foi a interface Agregado graúdo exposto (CA), 5%, e a interface Lisa (S), 3%. A interface com menor aproximação da força de ruptura numérica e experimental foi a interface Chave de cisalhamento (SK), com uma diferença de 16%, e a interface Agregado fino exposto (FA), 57%.

Tabela 5 - Comparação dos resultados numérico e experimental para o ensaio de resistência ao cisalhamento inclinado

Interface	$F_{ruptura} - \text{experimental}$ (kN)	$F_{ruptura} - \text{numérico}$ (kN)	$\frac{F_{numérico}}{F_{experimental}}$
CA	1761,40	1679,9	0,95
S	1625,69	1679,9	1,03
SK	1998,32	1686,0	0,84
FA	1122,74	1764,4	1,57

Conclusões

A validação numérica no Abaqus® dos parâmetros da interface do concreto de alta resistência (CAR) e o concreto de altíssimo desempenho com fibras (UHPC) para os diferentes tratamentos superficiais geraram as seguintes conclusões:

De modo geral os resultados obtidos no modelo numérico obtiveram boa resposta quando comparado com os resultados experimentais, tanto na simulação do ensaio de resistência à tração na flexão quanto no ensaio de cisalhamento direto e cisalhamento inclinado. Isso indica que os parâmetros obtidos do ensaio experimental conseguiram ter uma boa representatividade do modelo numérico. As curvas numéricas obtiveram um comportamento linear até o trecho de pico devido ao comportamento coesivo baseado no modelo de tração separação elástico.

A validação dos parâmetros de rigidez na direção normal e tangencial nos ensaios de resistência à tração na flexão e cisalhamento direto (Push-off) expressou boa correlação do comportamento experimental no modelo numérico. Para todos os modelos estudados, a melhor representatividade da força de ruptura do modelo numérico com o modelo experimental foi de 101%, para a superfície Chave de cisalhamento (SK) no ensaio de tração na flexão. A menor representação da força de ruptura no modelo numérico com o experimental foi de 77%, obtida do ensaio de cisalhamento direto para a superfície Agregado graúdo exposto (FA).

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral por corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142**: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

GUIA DE USUÁRIO DO ABAQUS/CAE - Abaqus 6.13, Analysis User's Guide. “Disponível em: <http://dsk.ippt.pan.pl/docs/abaqus/v6.13/index.html>”. Acesso em: março de 2020.

PRADO LP, CARRAZEDO R, EL DEBS M. Interface strength of High-Strength concrete to Ultra-High-Performance concrete. Eng Struct. 2022; 252:16 p. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113591>.

PRADO, L. P. Estudo da interface do Concreto Pré-Moldado e Concreto de Altíssimo Desempenho Reforçado com Fibras. 2020. 291 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

YUAN S, LIU Z, TONG T, WANG Y. A coupled adhesive-frictional model tailored for interfacial behaviors between UHPC and NC materials. Structures 38 (2022) 1397–1410. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.02.061>