

Influência do ângulo de inclinação no ensaio de cisalhamento inclinado na interface concreto convencional UHPC

DAVI PERETTA AQUINO - ENG. - <https://orcid.org/0009-0005-3488-5470> ;
ALEX MICHAEL DANTAS DE SOUSA - PROF. - <https://orcid.org/0000-0003-0424-4080> ;
JORGE LUÍS AKASAKI - PROF. - <https://orcid.org/0000-0003-1986-1196> – **UNESP/FEIS**

EMERSON FELIPE FÉLIX - PROF. - <https://orcid.org/0000-0002-8928-9474> ;

LISIANE PEREIRA PRADO - PROF.^a - <https://orcid.org/0000-0001-9803-4767> (lisiane.prado@unesp.br) – **UNESP/FEG**

RESUMO

O CONCRETO DE ALTÍSSIMO DESEMPENHO (ULTRA-HIGH PERFORMANCE CONCRETE — UHPC) TEM GANHADO DESTAQUE EM OBRAS DE ENGENHARIA, DEVIDO ÀS SUAS EXCELENTES PROPRIEDADES MECÂNICAS E ELEVADA DURABILIDADE. ESSE MATERIAL PODE SER UTILIZADO EM REPAROS ESTRUTURAIS, COMBINADO COM O CONCRETO DE RESISTÊNCIA NORMAL (NORMAL STRENGTH CONCRETE - NSC) PARA AUMENTAR A CAPACIDADE RESISTENTE DOS ELEMENTOS ESTRUTURAIS, FORMANDO UMA INTERFACE ENTRE OS DIFERENTES MATERIAIS. ESTE ARTIGO PROPÕE ANALISAR A INTERFACE DO UHPC/NSC E UHPC/UHPC NO ENSAIO DE CISALHAMENTO INCLINADO ATRAVÉS DA ANÁLISE DE DADOS EXPERIMENTAIS DISPONÍVEIS NA LITERATURA. OS DADOS FORAM ANALISADOS POR MEIO DE FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS (EXCEL E POWERBI), E ANALISADOS ESTATISTICAMENTE. OS RESULTADOS MOSTRARAM QUE A INTERFACE UHPC/UHPC APRESENTOU SENSIBILIDADE À VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO EM RELAÇÃO À VERTICAL, ENQUANTO A INTERFACE UHPC/NSC SE MOSTROU MENOS DEPENDENTE DESSA VARIÁVEL, APRE-

SENTANDO MAIOR DEPENDÊNCIA DAS CONDIÇÕES DE RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE.

PALAVRAS-CHAVE: ÂNGULO DE INCLINAÇÃO, CISALHAMENTO INCLINADO, CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPENHO, RESISTÊNCIA DE INTERFACE, TENSÃO DE CISALHAMENTO.

1. INTRODUÇÃO

Em diversas situações, obras de engenharia complexas necessitam de reparos estruturais, sendo o UHPC uma ótima alternativa por conta de suas excepcionais propriedades mecânicas e de durabilidade. Como grandes obras de engenharia são construídas em etapas, uma solução eficaz para melhorar o desempenho estrutural do conjunto é a aplicação de UHPC nas regiões de ligações entre diferentes elementos estruturais, proporcionando alta resistência e durabilidade otimizando o consumo de concreto convencional (Figura 1). Bem como, a aplicação de camadas de UHPC para reforçar pilares

deteriorados pela corrosão por carbonatação ou ataque de cloretos, além da substituição de coberturas danificadas por camadas de UHPC nos tabuleiros e lajes.

Entretanto, observa-se que, para um adequado comportamento dos elementos estruturais reforçados ou conectados por UHPC, deve-se garantir um desempenho satisfatório da interface entre o concreto existente com o UHPC. Na prática, o comportamento do conjunto e transferência dos esforços entre esses elementos dependem significativamente das propriedades mecânicas da interface. Por esta razão, diversos estudos têm buscado formas de estimar as propriedades mecânicas da interface entre diferentes concretos.

Neste contexto, o ensaio de cisalhamento inclinado é considerado um método prático para caracterizar o comportamento da interface de concretos, pois coloca a interface em um estado combinado de compressão e cisalhamento. Assim, esse ensaio permite a obtenção da tensão normal e de cisalhamento simultaneamente, além da determinação direta dos parâmetros de resistência de interface do corpo de prova. Com a variação do ângulo de inclinação em relação à vertical da interface, os resultados desse ensaio podem sofrer alterações. Portanto, compreender a influência do ângulo de inclinação utilizado na resistência da interface é importante para determinar como caracterizar a interface e obter parâmetros mais representativos para o

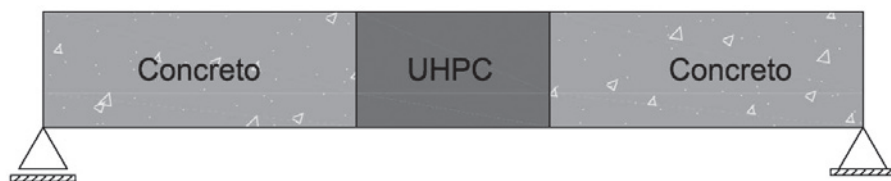


FIGURA 1

APLICAÇÃO DO UHPC NA REGIÃO CENTRAL DE VIGAS PRÉ-MOLDADAS SUJEITA AOS MAIORES ESFORÇOS SOLICITANTES

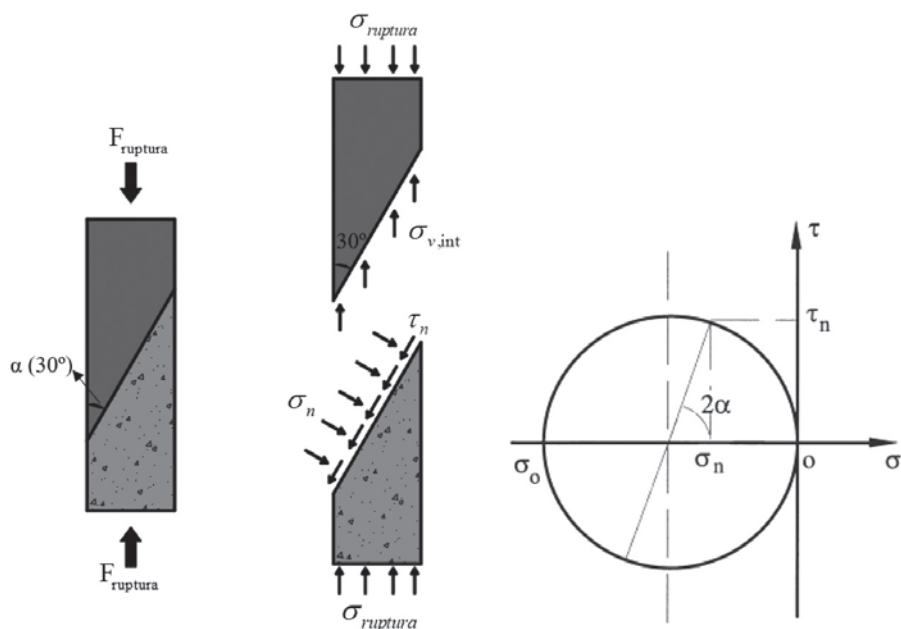


FIGURA 2

ESFORÇOS ENVOLVIDOS NO ENSAIO DE CISALHAMENTO INCLINADO E CÍRCULO DE MOHR

FONTE: ADAPTADO DE FENG, XIAO E LI (2020)

projeto de ligações ou reforço de estruturas utilizando o UHPC.

De acordo com Zanotti e Banthia (2016) o ensaio de cisalhamento inclinado consiste em um dos métodos de caracterização do estado de tensão da interface de dois materiais. O resultado fornecido pelo ensaio é uma combinação de ten-

sões de cisalhamento e compressão ao longo da interface (Figura 2). Conforme os autores, o ensaio de cisalhamento inclinado é considerado um ensaio de fácil execução. No entanto, as informações fornecidas pelo ensaio podem ser enganosas, porque podem não ser totalmente representativas em relação ao tipo de interface analisada, visto que a falha é dependente do ângulo de inclinação (α), impedindo que a mesma ocorra em um plano diferente (Zanotti e Banthia, 2016).

De acordo com a teoria de Coulomb, o critério de falha do material na interface por tensão de cisalhamento (τ_n) combinado com tensão normal (σ_n) ocorre quando a Equação (1) é satisfeita.

$$\begin{aligned} [1] \quad \tau_n &= c + \sigma_n \cdot \mu = c + tg(\phi) \cdot \sigma_n \\ \mu &= \frac{\tau_n - c}{\sigma_n} \end{aligned}$$

Onde:

c = coesão (MPa);

μ = coeficiente de atrito interno (adimensional);

ϕ = ângulo de atrito interno ($^\circ$).

Baseado na teoria de Coulomb usada para descrever o critério de falha por cisalhamento da ligação/interface, Austin, Robins e Pan (1999) desenvolveram um método analítico que correlaciona a tensão de cisalhamento (τ_n) e a tensão normal (σ_n) com o ângulo de inclinação entre a interface da ligação e o eixo longitudinal (α), Equações (2) e (3), respectivamente. Deste modo, a tensão aplicada para gerar a falha por cisalhamento ao longo da interface pode ser descrita pela Equação (4).

$$[2] \quad \tau_n = 0,5 \cdot \sigma_0 \cdot \sin 2\alpha$$

$$[3] \quad \sigma_n = \sigma_0 \cdot \sin^2 2\alpha$$

$$[4] \quad \sigma_0 = c[\cot \alpha + \tan(\phi + \alpha)]$$

Onde:

σ_0 = tensão vertical aplicada no ensaio para produzir ruptura no plano da ligação/interface (ou simplesmente resistência da interface) (MPa);

c = coesão (MPa);

ϕ = ângulo de atrito interno ($^\circ$).

A fim de maximizar a probabilidade de falha na ligação, Austin, Robins e Pan (1999) criaram uma expressão do ângulo crítico (α_{crit}) (Equação 5), que corresponde ao ângulo que provoca a tensão normal mínima σ_{min} e de cisalhamento crítica τ_{min} na interface para o ensaio de cisalhamento inclinado (Equações (6) e (7)).

$$[5] \quad \alpha_{crit} = 45 - \frac{\phi}{2}$$

$$[6] \quad \sigma_{min} = 2c \cdot \tan(45 + \frac{\phi}{2})$$

$$[7] \quad \tau_{min} = c(1 + \sin \phi)$$

Onde:

ϕ = ângulo de atrito interno ($^\circ$);

σ_{min} = tensão de resistência normal mínima na interface (MPa);

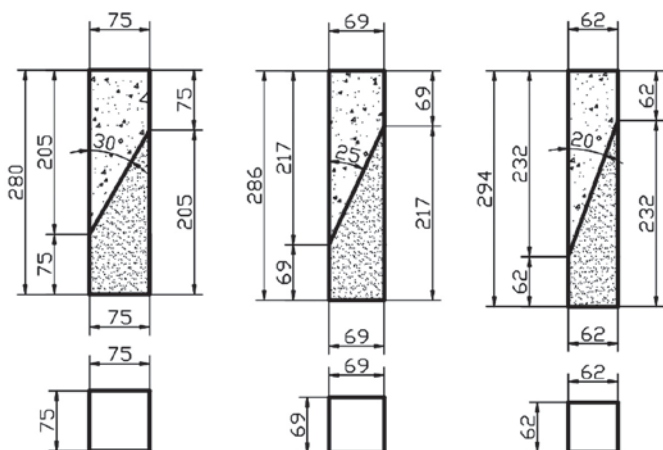


FIGURA 3

GEOMETRIA DOS PRISMAS PARA O ENSAIO DE CISALHAMENTO INCLINADO (MM)

FONTE: FENG, XIAO E LI (2020)

c = coesão (MPa);

$\tau_{\min}$ = tensão de resistência ao cisalhamento mínima na interface (MPa).

Feng, Xiao e Li (2020) analisaram a resistência da interface do concreto de resistência normal e o UHPC por meio do ensaio de cisalhamento inclinado, sob diferentes ângulos de inclinação da interface com a vertical: 20°, 25° e 30° (Figura 3), e diferentes tratamentos de rugosidade da interface, deixando o agregado exposto. Estes autores observaram um aumento da resistência medida conforme o crescimento do ângulo, com a ruptura se desenvolvendo predominantemente no concreto de menor resistência e não na interface, tornando os resultados imprecisos.

Austin, Robins e Pan (1999) indicaram que a resistência da ligação entre concretos é sensível ao ângulo de cisalhamento inclinado e menos sensível à condição de rugosidade da superfície de concreto, produzindo falhas na interface apenas em superfícies lisas, enquanto nas superfícies rugosas a falha pode não ocorrer na interface. Além disso, o ensaio é sensível a diferenças no módulo de elasticidade dos concretos da interface.

Prado (2022) realizou ensaios de cisalhamento inclinado para avaliar a resistência da interface entre concreto de alta resistência (CAR) e UHPC, variando a rugosidade superficial e mantendo a inclinação da interface em 30°. Foram observadas rupturas na interface com lascamento do CAR aderido ao UHPC.

Na prática, esta dispersão de resultados na literatura indica que o melhor

ângulo de inclinação pode variar em função de parâmetros como classe de resistência do substrato (NSC ou UHPC, por exemplo) e grau de rugosidade da interface. Portanto, dos trabalhos apresentados na literatura, observa-se que ainda existe uma lacuna em relação à definição do ângulo de interface para ser aplicado no ensaio de cisalhamento inclinado levando-se em consideração estes parâmetros, pois a melhor condição é aquela que fornece ruptura na interface para obter melhores resultados de coesão e atrito. Assim, o presente trabalho propõe analisar a interface do UHPC/NSC e UHPC/UHPC no ensaio de cisalhamento inclinado através da análise de dados experimentais disponíveis na literatura.

2. METODOLOGIA

A revisão bibliográfica para a busca e determinação do banco de dados utilizado no presente trabalho foi feita a partir de bases de dados acadêmicas digitais, abrangendo a literatura nacional e internacional. Foram priorizados os dados referentes a ensaios experimentais em que os corpos de prova foram testados aos 28 dias. Foram selecionados 16 estudos para compor o banco de dados, totalizando 138 dados amostrais. Os dados coletados nos artigos pesquisados foram: grau e classificação da rugosidade, ângulo de inclinação com a vertical da interface (α), tipo de concreto que forma a interface, resistência aos 28 dias dos concretos envolvidos, resistência de interface σ_0 (tensão vertical que provocou a ruptura na interface), tensão normal na

interface (σ_n) e tensão de cisalhamento na interface (τ_n). Realizou-se a classificação da rugosidade da superfície de acordo com o manual da *Fédération Internationale Du Béton* (FIB) de 2010 com base nos valores de rugosidade média.

Os dados coletados foram analisados utilizando o software PowerBI, principalmente para integrar, transformar, visualizar e analisar dados de diversas fontes. Com base nessa análise, determinaram-se os valores médios de resistência, bem como as tensões normal e cisalhante da interface, em relação ao ângulo de inclinação e ao tipo de rugosidade dos dados coletados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados apresentados a seguir demonstram as relações entre os dados da tensão vertical aplicada no ensaio para produzir ruptura no plano da ligação/interface (σ_0), tensão normal (σ_n) e tensão de cisalhamento (τ_n) de ruptura na interface em função do tipo de interface e do ângulo de inclinação do ensaio de cisalhamento inclinado.

3.1 Análise da influência da variação do ângulo de inclinação

As Figuras 4 e 5 ilustram a relação entre tensão e ângulo de inclinação em relação à vertical para a interface UHPC/UHPC com superfície lisa e muito rugosa, respectivamente. A partir da linha de tendência gerada, observa-se uma relação linear entre as tensões e o ângulo nesse tipo de interface. Os valores do

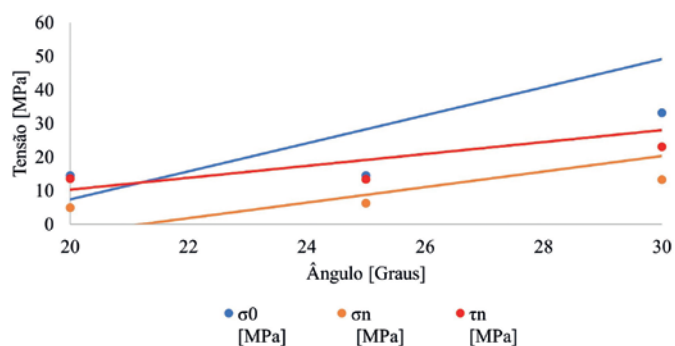


FIGURA 4

TENSÃO VERSUS ÂNGULO DE INCLINAÇÃO COM A VERTICAL DA INTERFACE – LISA – UHPC/UHPC

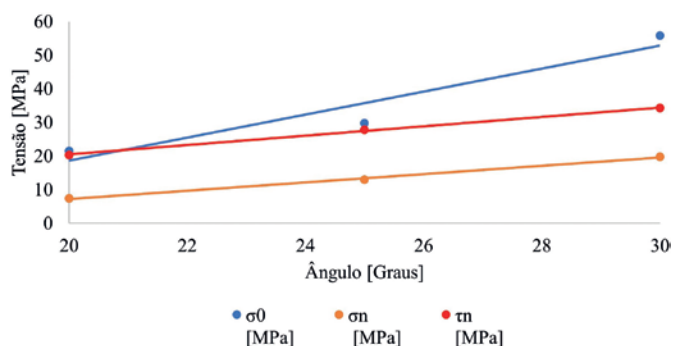


FIGURA 5

TENSÃO VERSUS ÂNGULO DE INCLINAÇÃO COM A VERTICAL DA INTERFACE – MUITO RUGOSA – UHPC/UHPC

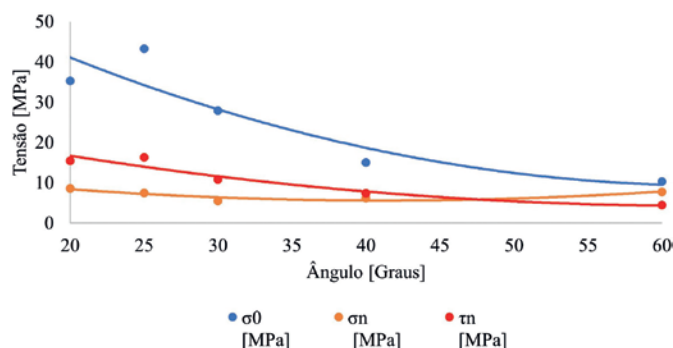


FIGURA 6

RELAÇÃO TENSÃO *VERSUS* ÂNGULO DE INCLINAÇÃO COM A VERTICAL DA INTERFACE – LISA – UHPC/NSC

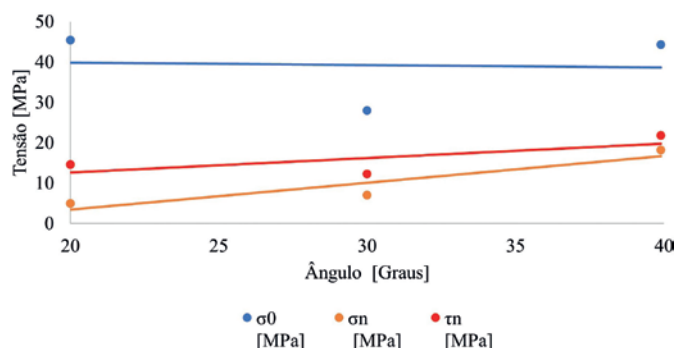


FIGURA 7

RELAÇÃO TENSÃO *VERSUS* ÂNGULO DE INCLINAÇÃO COM A VERTICAL DA INTERFACE – RUGOSA – UHPC/NSC

coeficiente de determinação (R^2) ficaram próximos a 0,9, indicando que a relação linear é direta, permitindo prever o comportamento das variáveis de tensão para qualquer ângulo variando de 20 a 30°. Os resultados mostram que um aumento do ângulo da interface resulta em acréscimo da resistência, bem como das tensões normal e de cisalhamento. Tal situação ocorre porque a interface UHPC/UHPC têm características mais rígidas, consequentemente os valores apresentados da resistência da interface são mais sensíveis às variações do ângulo de inclinação da interface (Austin e Robins, 1999; Feng, Xiao e Li, 2020). Por outro lado, as curvas das tensões normais e de cisalhamento apresentaram menores variações em função do ângulo de inclinação da interface, haja visto que elas estão vinculadas a característica de aderência do material.

A Figura 6 mostra a relação entre tensão e ângulo de inclinação da interface UHPC/NSC de superfície lisa, ajustada por um modelo polinomial de grau 2, com R^2 próximo a 1. A tensão σ_0 diminui com o aumento do ângulo e as curvas de tendência das tensões normal e cisalhante se cruzam em um ângulo de 47,60°. Além disso, a curva de resistência da interface UHPC/NSC com superfície lisa apresenta uma dependência da variação do ângulo, pois como não há

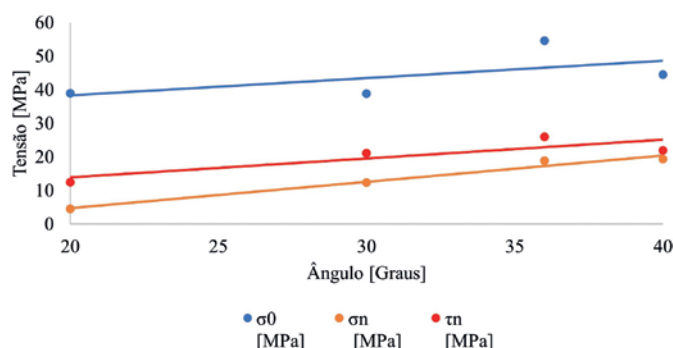


FIGURA 8

RELAÇÃO TENSÃO *VERSUS* ÂNGULO DE INCLINAÇÃO COM A VERTICAL DA INTERFACE – MUITO RUGOSA – UHPC/NSC

rugosidade da interface, essas características tornam-se predominante no comportamento da resistência. Referente à interface lisa, esse comportamento da interface UHPC/NSC mostra que as propriedades mecânicas do concreto de menor resistência têm influência em relação aos resultados obtidos. Austin, Robins e Pan (1999) corroboram que as propriedades mecânicas dos concretos envolventes têm influência no comportamento da interface, pois como as tensões de compressão são transmitidas pelas microfissuras, há diferença da distribuição das tensões em concretos com propriedades mecânicas diferentes. Ademais, as interações da interface também podem ser dependentes de fatores, como a rugosidade e adesão entre as superfícies, além do ângulo de inclinação.

As Figuras 7 e 8 apresentam relações lineares para superfícies rugosas

e muito rugosas na interface UHPC/NSC. Diferentemente da superfície lisa, os resultados mostram que a rugosidade na ligação entre esses concretos influencia na distribuição dos esforços. Feng, Xiao e Li (2020) sugerem que deve ser analisada a interferência de diferentes fatores na análise dos resultados, em especial o tipo de ruptura, pois caso a mesma não ocorrer na interface, e sim no concreto, o resultado pode ser conservador.

A Tabela 1 apresenta as equações obtidas para cada interface e rugosidade. Observa-se que, para a interface UHPC/UHPC, o ângulo de inclinação com a vertical tem uma influência significativa nas resistências e nas tensões, como evidenciado pelos coeficientes angulares das equações. Isso é ocasionado pela maior rigidez presente na interface UHPC/UHPC, apresentando maior variação em relação à inclinação da interface do que em relação a rugosidade da superfície. Em contrapartida, na interface UHPC/NSC, os coeficientes angulares das equações lineares para uma superfície rugosa são próximos de zero, indicando uma menor influência do ângulo em comparação com a interface UHPC/UHPC, e uma maior influência do grau de rugosidade. Conclui-se, portanto, que a interface UHPC/UHPC é mais sensível às variações do ângulo de inclinação com a vertical do que a interface UHPC/NSC.

TABELA 1

EQUAÇÕES OBTIDAS PARA CADA INTERFACE E RUGOSIDADE EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO COM A VERTICAL (α)

Interface	Classificação da rugosidade	Resistência da interface (σ_0)	Tensão normal (σ_n)	Tensão de cisalhamento (τ_n)
UHPC/UHPC	Lisa	$\sigma_0 = 4,1716(\alpha) - 76,005$	$\sigma_n = 2,3097(\alpha) - 48,912$	$\tau_n = 1,7722(\alpha) - 25,089$
UHPC/UHPC	Muito rugosa	$\sigma_0 = 3,426(\alpha) - 49,877$	$\sigma_n = 1,239(\alpha) - 17,575$	$\tau_n = 1,394(\alpha) - 7,3533$
UHPC/NSC	Lisa	$\sigma_0 = 0,0166(\alpha)^2 - 2,1187(\alpha) + 76,844$	$\sigma_n = 0,0062(\alpha)^2 - 0,513(\alpha) + 16,196$	$\tau_n = 0,0067(\alpha)^2 - 0,8478(\alpha) + 30,999$
UHPC/NSC	Rugosa	$\sigma_0 = -0,0596(\alpha) + 41,037$	$\sigma_n = 0,6641(\alpha) - 9,7929$	$\tau_n = 0,3608(\alpha) + 5,4111$
UHPC/NSC	Muito rugosa	$\sigma_0 = 0,5169(\alpha) + 27,969$	$\sigma_n = 0,7845(\alpha) - 10,908$	$\tau_n = 0,561(\alpha) + 2,7231$

3.2 Análise do tipo de interface no ensaio de cisalhamento inclinado

A Figura 9 apresenta a comparação dos valores de resistência de interface com rugosidade lisa em função do ângulo de inclinação com a vertical, para UHPC/UHPC e UHPC/NSC. Observa-se que a resistência da interface UHPC/NSC atingiu seu valor máximo para um ângulo de 25°, enquanto que, para a interface UHPC/UHPC, os maiores valores foram registrados para os ângulos de 40° e 50°. Nota-se uma similaridade nos valores de resistência das interfaces UHPC/UHPC e UHPC/NSC em ângulos baixos. No entanto, com o aumento do ângulo, os valores de resistência da interface UHPC/UHPC aumentam, enquanto os de UHPC/NSC diminuem. Dessa forma, conclui-se que a interface UHPC/NSC apresenta maior resistência para ângulos baixos (menores que 25°), enquanto a interface UHPC/UHPC se mostra mais resistente para ângulos elevados. Austin, Robins e Pan (1999) indicaram que a resistência da ligação entre concretos

é sensível ao ângulo de cisalhamento inclinado e menos sensível à condição de rugosidade da superfície de concreto, produzindo falhas na interface apenas em superfícies lisas, enquanto nas superfícies rugosas a falha pode não ocorrer na interface.

As Figuras 10a e 10b apresentam a comparação dos valores de resistência de interface em função do ângulo de inclinação com a vertical para superfícies rugosas e muito rugosas das interfaces UHPC/UHPC e UHPC/NSC. Observa-se que, para o ângulo de 30°, a resistência da interface UHPC/UHPC foi superior em ambos os casos. A resistência de UHPC/UHPC em relação à UHPC/NSC foi maior cerca de 2,8 e 1,4 vezes nas superfícies rugosa e muito rugosa, respectivamente,

evidenciando que a rugosidade da interface tem uma influência mais significativa no concreto de resistência normal do que a variação do ângulo de inclinação. Ademais, a resistência da interface UHPC/NSC em superfície muito rugosa apresentou pouca variação com o ângulo, enquanto a UHPC/UHPC aumentou 2,6 vezes ao passar de 20° para 30°.

4. CONCLUSÃO

Por meio da revisão bibliográfica e análise de dados destes trabalhos, as seguintes conclusões podem ser extraídas:

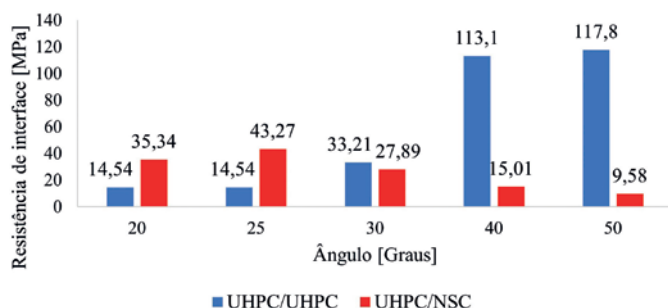


FIGURA 9

COMPARAÇÃO DOS VALORES DA RESISTÊNCIA DE INTERFACE σ_0 EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO COM A VERTICAL DA INTERFACE - LISA

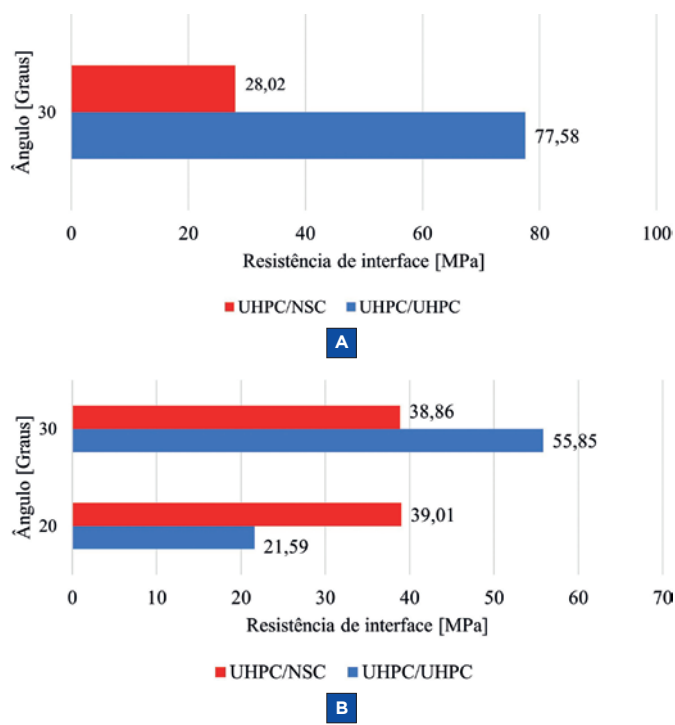


FIGURA 10

COMPARAÇÃO DOS VALORES DA RESISTÊNCIA DE INTERFACE EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE INCLINAÇÃO COM A VERTICAL DA INTERFACE - RUGOSA (A) E MUITO RUGOSA (B)

- a) A tensão na interface para a superfície lisa de UHPC/UHPC cresceu com o aumento do ângulo de inclinação, representada por uma equação linear. Por outro lado, para a superfície lisa de UHPC/NSC, a tensão sofreu uma redução com o aumento do ângulo;
- b) A interface UHPC/UHPC apresentou sensibilidade significativa à variação do ângulo de inclinação com a vertical da interface, enquanto a UHPC/NSC demonstrou inde-

pendência do ângulo. Na prática, observou-se que a resistência da interface UHPC/NSC é mais influenciada pelo tipo de rugosidade na superfície do substrato do que pelo ângulo de inclinação;

- c) Em relação a interface UHPC/UHPC, houve um aumento da resistência com o aumento do ângulo de inclinação da interface para todas as superfícies estudadas. Isso ocorre porque a interface UHPC/UHPC tem características mais rígidas, consequen-

temente os valores apresentados da resistência da interface são mais sensíveis as variações do ângulo de inclinação da interface do que a rugosidade da interface.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo fomento à pesquisa (processo N° 2023/04403-4) e a Pró-Reitoria de Pesquisa da UNESP (PROPe). ☺

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AUSTIN, S.; ROBINS, P.; PAN, Y. Shear bond testing of concrete repairs. *Cement and Concrete Research* 29, 1999. p. 1067-1076.
- [2] FENG, S.; XIAO, H.; LI, Y. Influence of interfacial parameters and testing methods on UHPC-NSC bond strength: Slant shear vs. Direct tensile testing. *Cement and Concrete Composites*, v. 131, 2022, 17p.
- [3] FIB - INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE. *Fib model code for concrete structures 2010 (MC-10)*. 1 ed. Berlin: Ernst & Sohn, 2013. 434 p. Corresponde aos boletins 65 e 66 d fib.
- [4] PRADO, L. P.; CARRAZEDO, R.; DEBS, M. K. EL. Interface strength of High-Strength concrete to Ultra-High-Performance concrete. *Engineering Structures*. v. 252, 2022, 16p.
- [5] ZANOTTI, C.; BANTHIA, N. Modified slant shear cylinder test for inherent characterization of bond in concrete repairs. *The Indian Concrete Journal*, 2016, v. 90.

Sistemas de Fôrmas para Edifícios

Recomendações para a melhoria da qualidade e da produtividade com redução de custos



ANTONIO CARLOS ZORZI

SISTEMAS DE FÔRMAS PARA EDIFÍCIOS: RECOMENDAÇÕES PARA A MELHORIA DA QUALIDADE E DA PRODUTIVIDADE COM REDUÇÃO DE CUSTOS

Autor: Antonio Carlos Zorzi

O livro propõe diretrizes para a racionalização de sistemas de fôrmas empregados na execução de estruturas de concreto armado e que utilizam o molde em madeira

As propostas foram embasadas na vasta experiência do autor, diretor de engenharia da Cyrela, sendo retiradas de sua dissertação de mestrado sobre o tema.

DADOS TÉCNICOS

ISBN 9788598576237
Formato: 18,6 cm x 23,3 cm
Páginas: 195
Acabamento: Capa dura
Ano da publicação: 2015

Patrocínio



Aquisição:
www.ibracon.org.br
(Loja Virtual)