

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

VINICIUS BROTHER DOS SANTOS

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA LIGAÇÃO ENTRE
CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO E
CONCRETOS DE RESISTÊNCIA NORMAL E DE ALTA
RESISTÊNCIA**

MARINGÁ

2021

VINICIUS BROTHER DOS SANTOS

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA LIGAÇÃO ENTRE
CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO E
CONCRETOS DE RESISTÊNCIA NORMAL E DE ALTA
RESISTÊNCIA**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Maringá, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Romel Dias Vanderlei

MARINGÁ

2021

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá - PR, Brasil)

S237a

Santos, Vinicius Brother dos

Análise experimental da ligação entre concreto de ultra-alto desempenho e concretos de resistência normal e de alta resistência / Vinicius Brother dos Santos. -- Maringá, PR, 2021.

167 f.: il. color., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Romel Dias Vanderlei.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2021.

1. Concreto de alta resistência. 2. Concreto de ultra-alto desempenho. 3. Concreto - Resistência - Ligação. 4. Cisalhamento. I. Vanderlei, Romel Dias, orient. II. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 23.ed. 624.1834

VINICIUS BROTHER DOS SANTOS

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA LIGAÇÃO ENTRE CONCRETO DE
ULTRA-ALTO DESEMPENHO E CONCRETOS DE RESISTÊNCIA
NORMAL E DE ALTA RESISTÊNCIA**

Dissertação de Mestrado apresentada no dia 31/08/2021. Julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL e aprovada em sua forma final, como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Romel Dias Vanderlei

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Estadual de Maringá
Orientador



Profa. Dra. Fernanda Giannotti da Silva Ferreira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Federal de São Carlos



Prof. Dr. Vladimir José Ferrari
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Estadual de Maringá

Dedico este trabalho aos meus pais, Ivone e Osvanir, às minhas irmãs, Juliana e Pamela, e à minha namorada, Ana, sem vocês nada seria possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida e por me guiar em todos os meus caminhos.

Agradeço aos meus pais, Ivone e Osvanir, que nunca mediram esforços para me apoiar. À minha namorada, Ana Paula, que sempre esteve ao meu lado e que tanto contribuiu na execução deste trabalho. Às minhas irmãs, Juliana e Pamela, que sempre tornaram a minha vida mais completa.

Ao meu professor e orientador Romel Dias Vanderlei, que sempre agiu com respeito e paciência, dedicando seu tempo e conhecimento para tornar possível a realização deste trabalho.

Ao amigo Lucas Soares, pelas horas de viagens e parceria, durante todo o período de mestrado. Ao amigo Daniel William, pela ajuda na execução do programa experimental. Aos demais amigos de PCV em que tive o prazer de conhecer e compartilhar conhecimentos e experiências.

Ao professor José Wilson Assunção, que sempre se mostrou disposto a me ajudar e que tanto contribuiu na execução do programa experimental.

Ao professor Jeselay Hemetério Cordeiro dos Reis, pelas horas de conversas em tempos de desânimo, que me ajudaram a seguir em frente em busca dos meus objetivos.

Aos professores José Luiz Miotto e Vladimir José Ferrari, pela contribuição na etapa inicial deste trabalho.

A todos os professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual de Maringá que contribuíram para a minha formação.

Às empresas que tornaram possível a execução deste trabalho. À ZL Distribuidora de Cimentos e à InterCement Brasil, pela doação do cimento. À Mineração Jundu, pela doação da areia e do pó de quartzo. À Elkem *Materials South America*, pela doação da sílica ativa. À Mineração Mandaguari, pela doação da brita. À GCP Brasil Indústria e Comércio de Produtos Químicos, pela doação do aditivo superplastificante.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código de Financiamento 001, pela bolsa de mestrado concedida durante o período em que me dediquei ao programa experimental.

RESUMO

O concreto de ultra-alto desempenho (UHPC) é uma das inovações tecnológicas mais interessantes dos últimos 30 anos na área de tecnologia do concreto. Isso se deve as suas excelentes propriedades, como a alta resistência à compressão e durabilidade. No entanto, devido ao elevado consumo de cimento, o alto custo inicial desse material acaba por não viabilizar sua aplicação em novas construções. Todavia, pesquisas demonstram a eficácia da aplicação do UHPC em obras antigas, como material de reabilitação ou reparo, seja por reforço de pavimentos e vigas, ou encamisamento de pilares. Nesse sentido, atualmente estuda-se a ligação entre concretos de resistência normal (NSC) e UHPC, sendo os três parâmetros principais responsáveis por garantir uma boa ligação: o tratamento superficial do substrato (rugosidade), as condições de umedecimento e a resistência mecânica do substrato. Dessa forma, o objetivo do presente estudo foi investigar experimentalmente a ligação entre UHPC e concretos C25, C45 e C60. Três parâmetros foram avaliados: as condições de umedecimento, sendo substrato seco com superfície seca (ASD) e substrato saturado com superfície seca (SSD), a resistência do substrato e a resistência do material de reparo. Todos os modelos receberam o tratamento superficial através de escovação com escova de aço. Na primeira parte do programa experimental foi realizada a caracterização dos materiais, dos concretos e do UHPC. Na segunda parte foi analisada a ligação entre concretos, verificando seu comportamento mecânico e os modos de ruptura. Para isso, foram realizados os ensaios de resistência ao cisalhamento inclinado, ao cisalhamento direto e à tração por compressão diametral. A resistência da ligação entre concretos foi classificada e comparada a modelos analíticos de previsão de ruptura presentes em guias e normas internacionais e outras pesquisas. Os resultados demonstraram que ao alterar as condições de umedecimento do substrato de SSD para ASD, a resistência da ligação diminui em todos os modelos. Os ganhos mais expressivos de resistência aconteceram em modelos SSD com substratos de resistências mais baixas e UHPC como material de reparo. Ressalta-se o modelo SSD-C25-UHPC, com substrato em concreto C25 e condições de umedecimento SSD e reparo com UHPC, que recuperou cerca de 92% da sua resistência, em relação ao respectivo modelo monolítico. As maiores reduções de desempenho, no entanto, ocorreram em modelos ASD com substratos mais resistentes e reparos com concreto C60 ou UHPC. Destaca-se o modelo ASD-C60-UHPC, com substrato em concreto C60 com condições de umedecimento ASD e reparo com UHPC, que recuperou a resistência em torno de 41% em relação ao seu modelo monolítico. Ainda, os resultados demonstraram que nos modelos com reparo em NSC, quanto mais baixa a resistência do material, menor a influência das condições de umedecimento do substrato na resistência da ligação.

Palavras-chave: concreto de alta resistência; concreto de ultra-alto desempenho; UHPC; ligação; reparo; cisalhamento.

ABSTRACT

Ultra High Performance Concrete (UHPC) is one of the most interesting technological innovations of the last 30 years in the field of concrete technology. This is due to its excellent properties, such as high compressive strength and durability. However, due to the high cement consumption, the high initial cost of this material does not facilitate its application in new constructions. However, researches demonstrate the effectiveness of the application of UHPC in old structures, as rehabilitation or repair material, either by overlay in pavements and beams, or by jacketed columns. Therefore, the bond between normal strength concrete (NSC) and UHPC is currently being studied, the three main parameters being responsible for ensuring a good bond performance: the roughness surface of the substrate, the moisture conditions and the substrate strength. Thus, the aim of the present study was to experimentally investigate the bond between UHPC and concretes C25, C45 and C60. Three parameters were investigated: the moisture conditions of the substrate such as Air Surface Dry (ASD) and Saturated Surface Dry (SSD), the strength of the substrate and the strength of the repair material. All models received surface treatment through wire brushing. In the first part of the experimental program, the characterization of materials, concretes and UHPC was carried out. In the second part, the bond between concretes was analyzed, verifying their mechanical behavior and failure modes. In order to do so, slant shear, bi-surface shear and splitting tensile tests were carried out. The bond strength of concretes was classified and compared to analytical models of failure estimation specified in international guidelines and standards and other researches. The results demonstrated that by changing substrate moisture conditions from SSD to ASD, the bond strength decreases in all models. The most expressive strength gains occurred in SSD models with substrates with lower strengths and UHPC as the repair material. It is worth mentioning the SSD-C25-UHPC model, which recovered about 92% of its strength, compared to its monolithic model. The biggest performance reductions, however, occurred in ASD models with stronger substrates and C60 or UHPC as the repair material. The ASD-C60-UHPC model stands out, which recovered a strength decrease of around 41% compared to its monolithic model. Furthermore, the results showed that in models with NSC repair, the lower the material strength, the lower the influence of substrate moisture conditions on the bond strength.

Keywords: high strength concrete; ultra high performance concrete; UHPC; bond; repair; shear.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Passarela em UHPC em Sherbrooke Quebec – Canadá (1997)	37
Figura 2.2 – Ponte em UHPC com vigas duplo T protendidas em Bourg-Lès-Valence – França	38
Figura 2.3 – Curvas tensão-deformação pré-fissuração do UHPC e UHPFRC submetidos à tração direta	42
Figura 2.4 – Curvas tensão-deformação completas do UHPFRC submetidos à tração direta	42
Figura 2.5 – Curvas tensão-deformação do UHPC E UHPFRC submetidos à compressão axial.....	43
Figura 2.6 – Ensaio para avaliação da resistência da ligação entre concretos em diferentes estados de tensão.....	45
Figura 2.7 – Ensaio de resistência ao cisalhamento inclinado e à tração por compressão diametral	46
Figura 2.8 – Ensaio de resistência à tração direta.....	47
Figura 2.9 – Ensaio de resistência à tração na flexão, resistência ao cisalhamento direto e ao cisalhamento inclinado	47
Figura 2.10 – Micrografia MEV da zona de transição entre NSC e UHPC.....	49
Figura 2.11 – Tipos de tratamentos utilizados no substrato NSC por Carbonell Muñoz <i>et al.</i> (2014)	52
Figura 2.12 – Ensaio de resistência ao cisalhamento direto de duas faces realizado por Zhang, Yang; Zhang <i>et al.</i> (2020).....	54
Figura 2.13 – Tratamentos superficiais utilizados por Zhang, Yang; Zhang <i>et al.</i> (2020).....	54
Figura 2.14 – Modos de ruptura	62
Figura 2.15 – Típica envoltória de ruptura de rochas	62
Figura 2.16 – Ensaio de cisalhamento inclinado e círculo de Mohr.....	64
Figura 2.17 – Coeficiente de rugosidade média (Ra)	65
Figura 2.18 – Coeficiente de rugosidade de altura média crista-vale (Rz)	66
Figura 3.1 – Curva de distribuição granulométrica da Areia I.....	78
Figura 3.2 – Curva de distribuição granulométrica da brita.....	81
Figura 3.3 – Curva de distribuição granulométrica da sílica ativa.....	83

Figura 3.4 – Composição do UHPC através do Modelo de Andreasen e Andersen Modificado	85
Figura 3.5 – Aspecto final dos concretos no estado fresco	87
Figura 3.6 – Ensaio de abatimento do tronco de cone (<i>slump test</i>) dos concretos	88
Figura 3.7 – Mistura manual dos materiais secos	90
Figura 3.8 – Mistura dos materiais secos em misturador planetário	90
Figura 3.9 – Adição de superplastificante a mistura de UHPC	91
Figura 3.10 – Adição de água a mistura de UHPC	91
Figura 3.11 – Moldagem de corpos de prova com saco de confeiteiro	92
Figura 3.12 – Etapas de preparo do UHPC	93
Figura 3.13 – Adaptação do ensaio de Abatimento do tronco de cone (<i>Slump test</i>) para o UHPC	95
Figura 3.14 – Organograma do Programa Experimental	96
Figura 3.15 – Fluxograma da análise experimental da ligação entre concretos	99
Figura 3.16 – Confecção de modelos monolíticos	100
Figura 3.17 – Aspecto final dos corpos de prova dos modelos monolíticos	100
Figura 3.18 – Fôrmas com moldes de madeira para confecção de modelos mistos	100
Figura 3.19 – Adensamento de concretos nas fôrmas	101
Figura 3.20 – Aspecto final dos corpos de prova dos modelos mistos	101
Figura 3.21 – Confecção de reparos	102
Figura 3.22 – Aspecto final dos corpos de prova dos modelos mistos com respectivos reparos	102
Figura 3.23 – Armazenamento e condições de cura final dos modelos com reparos	103
Figura 3.24 – Concretagem de fôrmas cilíndricas para a caracterização do UHPC	103
Figura 3.25 – Equipamentos utilizados para o tratamento da superfície dos modelos mistos	104
Figura 3.26 – Tratamento superficial dos modelos mistos	104
Figura 3.27 – Condições de umedecimento da superfície dos substratos dos modelos mistos	105
Figura 3.28 – Secagem da superfície dos substratos saturados	106
Figura 3.29 – Ensaio de resistência da ligação por cisalhamento inclinado	109
Figura 3.30 – Ensaio de resistência da ligação por cisalhamento direto	110
Figura 3.31 – Ensaio de resistência da ligação à tração por compressão diametral	111
Figura 3.32 – Modo de ruptura A (falha adesiva)	112

Figura 3.33 – Modo de ruptura B (falha mista).....	112
Figura 3.34 – Modo de ruptura C (falha coesiva)	112
Figura 4.1 – Ensaio de resistência à compressão axial dos concretos.....	114
Figura 4.2 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral dos concretos	116
Figura 4.3 – Ensaio de módulo de elasticidade dos concretos	117
Figura 4.4 – Ensaio de resistência à compressão axial em UHPC.....	118
Figura 4.5 – Resistência à compressão axial do UHPC – Fase I.....	119
Figura 4.6 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral em UHPC	121
Figura 4.7 – Ensaio de módulo de elasticidade em UHPC	122
Figura 4.8 – Ensaio de resistência da ligação por cisalhamento inclinado	123
Figura 4.9 – Comportamento dos resultados dos ensaios de cisalhamento inclinado.....	125
Figura 4.10 – Ensaio de resistência da ligação por cisalhamento direto	127
Figura 4.11 – Comportamento dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto.....	129
Figura 4.12 – Configuração dos corpos de prova para ensaio de cisalhamento direto.....	130
Figura 4.13 – Ensaio de resistência da ligação à tração por compressão diametral.....	132
Figura 4.14 – Comportamento dos resultados dos ensaios de resistência da ligação à tração por compressão diametral	134
Figura 4.15 – Comportamento dos resultados dos ensaios de cisalhamento inclinado em relação as condições de umedecimento do substrato	136
Figura 4.16 – Comportamento dos resultados dos ensaios de tração por compressão diametral em relação as condições de umedecimento do substrato.....	137
Figura 4.17 – Comportamento dos resultados dos ensaios de cisalhamento inclinado em relação a resistência mecânica do substrato	138
Figura 4.18 – Comportamento dos resultados dos ensaios de tração por compressão diametral em relação a resistência mecânica do substrato	139
Figura 4.19 – Comportamento dos resultados dos ensaios de cisalhamento inclinado em relação a resistência mecânica do reparo	141
Figura 4.20 – Comportamento dos resultados dos ensaios de tração por compressão diametral em relação a resistência mecânica do reparo.....	141
Figura 4.21 – Típica envoltória de ruptura de rochas	142
Figura 4.22 – Envoltórias de Mohr-Coulomb para os modelos experimentais.....	144
Figura 4.23 – Comparação de envoltórias de Mohr-Coulomb para os modelos mistos C25 experimentais e referências.....	145

Figura 4.24 – Comparação de envoltórias de Mohr-Coulomb para os modelos mistos C45 experimentais e referências	147
Figura 4.25 – Comparação de envoltórias de Mohr-Coulomb para os modelos mistos C60 experimentais e referências	148

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Principais pesquisas desenvolvidas sobre a ligação NSC-UHPC	50
Quadro 2.2 – Comparativo de resultados de resistência de ligação NSC-UHPC	56
Quadro 2.3 – Coesão da ligação entre concretos adotado por pesquisas.....	64
Quadro 3.1 – Ensaio de caracterização de materiais.....	75
Quadro 3.2 – Detalhes dos ensaios a serem realizados	97
Quadro 3.3 – Nomenclatura dos modelos utilizados.....	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição típica do UHPFRC	39
Tabela 2.2 – Propriedades mecânicas típicas do UHPC e UHPFRC aos 28 dias	41
Tabela 2.3 – Requisitos mínimos de resistência de ligação para reparos de estruturas de concreto segundo o guia ACI 546.3R-14 (ACI, 2014).....	48
Tabela 2.4 – Classificação da ligação entre concretos em termos de resistência à tração segundo Sprinkel e Ozyildirim (2000).....	48
Tabela 2.5 – Classificação da rugosidade da superfície, conforme a fib MC 2010 (FIB, 2013)	66
Tabela 2.6 – Coeficientes para ligação adesiva (c_a), conforme a fib MC 2010 (FIB, 2013) ...	67
Tabela 2.7 – Valores de coeficiente de fricção de acordo em função da rugosidade da superfície para concretos \leq C50, de acordo com a fib MC 2010 (FIB, 2013)...	68
Tabela 2.8 – Valores de coeficiente para ligação adesiva e fricção de acordo com a rugosidade da superfície, de acordo com a Eurocode 2 (CEN, 2004).....	69
Tabela 2.9 – Valores de coesão e fricção em função da rugosidade da superfície, de acordo com a CSA S6-14 (CSA, 2014)	70
Tabela 2.10 – Valores de coesão e fricção de acordo com a rugosidade da superfície, de acordo com a AASHTO LRFD (AASHTO, 2012)	71
Tabela 2.11 – Valores de R_{vm} em função do tratamento superficial, de acordo com Santos e Júlio (2011)	72
Tabela 2.12 – Valores de R_{pm} em função do tratamento superficial, de acordo com Mohamad <i>et al.</i> (2015).....	73
Tabela 3.1 – Propriedades físicas e mecânicas do cimento.....	76
Tabela 3.2 – Análise química do cimento	76
Tabela 3.3 – Propriedades físicas da Areia I.....	77
Tabela 3.4 – Análise granulométrica da Areia I (NBR NM 248 (ABNT, 2003)).....	77
Tabela 3.5 – Análise química da Areia II	78
Tabela 3.6 – Análise granulométrica da Areia II.....	79
Tabela 3.7 – Propriedades físicas da brita	80
Tabela 3.8 – Análise granulométrica da brita (NBR NM 248 (ABNT, 2003))	80
Tabela 3.9 – Análise química do pó de quartzo.....	81
Tabela 3.10 – Análise granulométrica do pó de quartzo	82

Tabela 3.11 – Propriedades físicas da sílica ativa	82
Tabela 3.12 – Análise química da sílica ativa	82
Tabela 3.13 – Propriedades do aditivo plastificante CEMIX	84
Tabela 3.14 – Propriedades do aditivo superplastificante ADVA 458.....	84
Tabela 3.15 – Traços utilizados em massa	86
Tabela 3.16 – Consumo de materiais dos traços utilizados (kg/m ³).....	86
Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de abatimento dos concretos.....	114
Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial dos concretos	115
Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral dos concretos	116
Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade dos concretos.....	117
Tabela 4.5 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial do UHPC – Fase I	118
Tabela 4.6 – Resultados dos ensaios de espalhamento do UHPC – Fase II	120
Tabela 4.7 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial do UHPC – Fase II	120
Tabela 4.8 – Resultado dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral do UHPC – Fase II.....	121
Tabela 4.9 – Resultado dos ensaios de módulo de elasticidade do UHPC – Fase II	122
Tabela 4.10 – Resultados dos ensaios de cisalhamento inclinado.....	124
Tabela 4.11 – Classificação da ligação de acordo com os resultados dos ensaios de cisalhamento inclinado.....	126
Tabela 4.12 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto	128
Tabela 4.13 – Classificação da ligação de acordo com os resultados dos ensaios de cisalhamento direto.....	131
Tabela 4.14 – Resultados dos ensaios de resistência da ligação à tração por compressão diametral.....	133
Tabela 4.15 – Classificação da ligação de acordo com os resultados dos ensaios de resistência da ligação à tração por compressão diametral	135
Tabela 4.16 – Valores de previsão de resistência de ligação entre concretos.....	143

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ASD	<i>Air Surface Dry</i> (Substrato seco ao ar com superfície seca)
ASW	<i>Air Surface Wet</i> (Substrato seco ao ar com superfície úmida)
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
CEN	Comité Européu de Normalização / <i>European Committee for Standardization</i>
CSA	<i>Canadian Standards Association</i>
EN	<i>European Standard</i>
FIB	<i>Fédération internationale du béton / International Federation for Structural Concrete</i>
HSC	<i>High Strength Concrete</i> (Concreto de alta resistência)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LRFD	<i>Load and Resistance Factor Design</i>
MC	<i>Model Code</i>
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
NSC	<i>Normal Strength Concrete</i> (Concreto de resistência normal)
SSD	<i>Saturated Surface Dry</i> (Substrato saturado com superfície seca)
UHPC	<i>Ultra High Performance Concrete</i> (Concreto de ultra-alto desempenho)
UHPRC	<i>Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete</i> (Concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras)

LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS ROMANAS MINÚSCULAS

c	Coesão
c_a	Coefficiente de coesão
f_c	Resistência à compressão do concreto
f_{cd}	Resistência de cálculo à compressão do concreto
f_{cj}	Resistência à compressão do concreto aos j dias
f_{ck}	Resistência característica à compressão do concreto
f_{cm}	Resistência média à compressão do concreto
f_{ct}	Resistência do concreto à tração direta
f_{ctm}	Resistência média à tração do concreto
$f_{ct,sp}$	Resistência do concreto à tração indireta
f_{ctd}	Resistência de cálculo à tração do concreto
f_{ctk}	Resistência característica à tração do concreto
$f_{ctk,0,05}$	Resistência característica na fração de 5% à tração do concreto
$f_{ctk,inf}$	Resistência característica inferior à tração do concreto
$f_{ctk,sup}$	Resistência característica superior à tração do concreto
f_n	Resistência da ligação por cisalhamento inclinado
f_y	Resistência ao escoamento do aço de armadura passiva
f_{yd}	Resistência de cálculo ao escoamento do aço de armadura passiva
f_{yk}	Resistência característica ao escoamento do aço de armadura passiva
sd	Desvio padrão da dosagem

LETRAS ROMANAS MAIÚSCULAS

A_{cv}	Área de concreto da interface de cisalhamento
A_{vf}	Área de armaduras cruzando a interface de cisalhamento
A_n	Área da seção transversal no plano inclinado
COV	Coefficiente de variação
$D_{máx}$	Dimensão máxima característica
E	Módulo de elasticidade longitudinal
E_{ci}	Módulo de elasticidade longitudinal inicial do concreto
P_c	Força normal atuando na interface de cisalhamento
R_a	Parâmetro de rugosidade (desvio médio de um perfil a partir de uma linha média)
R_{pm}	Parâmetro de rugosidade (altura média da crista)
R_t	Parâmetro de rugosidade (altura total crista-vale)
R_{vm}	Parâmetro de rugosidade (profundidade máxima do vale)
R_z	Parâmetro de rugosidade (altura média crista-vale de um perfil com um número definido de segmentos de comprimento)
V	Força cortante
V_{bv}	Máxima força cortante da ligação NSC-UHPC
V_n	Máxima força cortante atuante na interface de cisalhamento

LETRAS GREGAS MINÚSCULAS

α	Ângulo de inclinação
α_{ct}	Coefficiente que leva em conta os efeitos a longo prazo na resistência à tração do concreto e efeitos desfavoráveis
β	Coefficiente de rugosidade interfacial
γ_c	Fator de segurança parcial para o concreto
κ	Fator de interação (eficiência) das armaduras
λ_1	Parâmetro de ponderação dependente da massa específica do concreto
μ	Coefficiente de fricção ou atrito
π	Pi
σ	Tensão normal
σ_c	Tensão normal de compressão
σ_n	Tensão normal resultante da menor força normal externa aplicada na interface
σ_s	Tensão normal no aço de armadura passiva
τ	Tensão de cisalhamento
τ_c	Resistência ao cisalhamento direto de um concreto de resistência normal
τ_u	Resistência ao cisalhamento da interface
ϕ	Ângulo de atrito interno
ϕ_c	Fator de redução de resistência do concreto

SÍMBOLOS MATEMÁTICOS

\emptyset	Diâmetro
$\%$	Por cento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	31
1.1	JUSTIFICATIVA.....	33
1.2	OBJETIVOS.....	34
1.2.1	Objetivo geral.....	34
1.2.2	Objetivos específicos.....	34
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	35
2.1	CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO (UHPC).....	35
2.1.1	Composição do UHPC.....	38
2.1.2	Propriedades mecânicas do UHPC.....	40
2.2	UTILIZAÇÃO DO UHPC COMO MATERIAL PARA REABILITAÇÃO ESTRUTURAL.....	43
2.3	INVESTIGAÇÃO DA LIGAÇÃO ENTRE UHPC E CONCRETOS DE RESISTÊNCIA NORMAL.....	44
2.3.1	Rugosidade do substrato.....	51
2.3.2	Condições de umedecimento do substrato.....	57
2.3.3	Resistência mecânica do substrato.....	58
2.3.4	Condições de cura do UHPC.....	59
2.3.5	Idade do UHPC.....	60
2.3.6	Natureza da ligação.....	60
2.4	MODOS DE RUPTURA E MODELOS DE PREVISÃO DA RESISTÊNCIA DA LIGAÇÃO ENTRE CONCRETOS.....	61
2.4.1	Critério de ruptura de Mohr-Coulomb.....	62
2.4.2	Modelos de previsão da resistência da ligação entre concretos.....	65
2.4.2.1	fib <i>Model Code for Concrete Structures</i> 2010 (2013).....	65
2.4.2.2	EN 1992-1-1: Eurocode 2: <i>Design of concrete structures</i> (2004).....	68
2.4.2.3	CSA S6-14: <i>Canadian Highway Bridge Design Code</i> (2017).....	70
2.4.2.4	AASHTO LRFD <i>Bridge Design Specifications</i> (2012).....	70
2.4.2.5	Santos e Júlio (2011, 2010).....	71
2.4.2.6	Mohamad <i>et al.</i> (2015).....	72
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	75
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS E SUAS PROPRIEDADES.....	75
3.1.1	Cimento.....	76

3.1.2	Areias	77
3.1.3	Brita	79
3.1.4	Pó de quartzo.....	81
3.1.5	Sílica ativa.....	82
3.1.6	Água.....	83
3.1.7	Aditivos.....	83
3.2	DOSAGEM DOS CONCRETOS E DO UHPC	84
3.3	PRODUÇÃO DOS CONCRETOS	87
3.4	PRODUÇÃO DO UHPC	88
3.4.1	Produção do UHPC em argamassadeira (Fase I).....	89
3.4.2	Produção do UHPC em betoneira de eixo horizontal (Fase II)	92
3.5	INVESTIGAÇÃO DA LIGAÇÃO ENTRE UHPC E OS CONCRETOS	96
3.5.1	Parâmetros avaliados.....	103
3.5.1.1	Tratamento superficial do substrato	104
3.5.1.2	Condições de umedecimento do substrato.....	105
3.5.1.3	Resistência mecânica do substrato	106
3.5.1.4	Resistência mecânica do reparo.....	106
3.5.2	Nomenclatura dos modelos	106
3.5.3	Resistência da ligação por cisalhamento inclinado (<i>Slant Shear</i>).....	108
3.5.4	Resistência da ligação por cisalhamento direto (<i>Bi-surface Shear</i>)	109
3.5.5	Resistência da ligação à tração por compressão diametral (<i>Splitting Tensile</i>)	110
3.5.6	Modos de ruptura	111
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	113
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS E UHPC	113
4.1.1	Concretos	113
4.1.1.1	Consistência	113
4.1.1.2	Resistência à compressão axial.....	114
4.1.1.3	Resistência à tração por compressão diametral.....	115
4.1.1.4	Módulo de elasticidade	116
4.1.2	UHPC – Fase I.....	117
4.1.2.1	Resistência à compressão axial.....	117
4.1.3	UHPC – Fase II	119
4.1.3.1	Consistência.....	119
4.1.3.2	Resistência à compressão axial.....	120
4.1.3.3	Resistência à tração por compressão diametral.....	121
4.1.3.4	Módulo de elasticidade	121

4.2	INVESTIGAÇÃO DA LIGAÇÃO NSC-NSC E NSC-UHPC	123
4.2.1	Resistência da ligação por cisalhamento inclinado (<i>Slant Shear</i>)	123
4.2.2	Resistência da ligação por cisalhamento direto (<i>Bi-surface Shear</i>)	127
4.2.3	Resistência da ligação à tração por compressão diametral (<i>Splitting Tensile</i>)	132
4.2.4	Influência das condições de umedecimento do substrato	136
4.2.5	Influência da resistência mecânica do substrato	138
4.2.6	Influência da resistência mecânica do reparo	140
4.2.7	Modelos de previsão da resistência da ligação entre concretos	142
5	CONCLUSÕES	151
	REFERÊNCIAS	155

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Pesquisadores em todo o mundo buscam desenvolver e analisar a aplicação de materiais que possuam características necessárias para um perfeito reparo estrutural, dentre eles, o concreto de pós reativos (CPR), atualmente nomeado como *Ultra High Performance Concrete* (UHPC), ou simplesmente concreto de ultra-alto desempenho, considerado como um dos materiais de engenharia estrutural mais inovadores desenvolvidos nos últimos 30 anos (ZHOU *et al.*, 2018).

No entanto, a utilização do UHPC como material estrutural em novas construções é limitada devido ao seu alto consumo de cimento, que faz com o que ele tenha um elevado custo inicial, sem levar em consideração o custo ao longo do tempo, em relação ao *Normal Strength Concrete* (NSC) ou concreto de resistência normal.

O cimento, além de possuir um alto custo, gera um impacto ambiental significativo, sendo responsável por aproximadamente 8% da emissão global de gás carbônico (CO₂) na atmosfera (ANDREW, 2018; LE QUÉRÉ *et al.*, 2018). De modo que cerca de 90% do gás carbônico é emitido ainda na fase de produção do cimento (XI *et al.*, 2016).

Dessa forma, diversas pesquisas têm sido desenvolvidas com o intuito de encontrar formas eficientes de aplicação do UHPC na engenharia estrutural. Uma das alternativas é a aplicação do material em estruturas de pontes, que durante toda a vida útil da estrutura pode reduzir custos com manutenções e conseqüentemente a diminuição emissão de CO₂ quando comparado a estruturas convencionais (DONG, 2018). Outra aplicação eficiente do UHPC é a reabilitação ou o reforço de estruturas de concreto existentes (BRÜHWILER; DENARIÉ, 2013, 2008; TAYEH *et al.*, 2013).

Na engenharia de pontes, o UHPC pode ser utilizado em elementos estruturais, como pilares, longarinas e lajes, e ainda no próprio pavimento, trazendo diversas vantagens, como a melhoria do desempenho mecânico, aumento da durabilidade e a redução do peso da estrutura (XUE *et al.*, 2020; ZHOU *et al.*, 2018). Ainda, a aplicação do UHPC como material de reabilitação estrutural em pontes está entre um dos principais interesses de pesquisas atuais, devido ao UHPC proporcionar melhores condições a essas construções, que são comumente deterioradas ao longo do tempo, devido aos efeitos das cargas dinâmicas do tráfego de veículos. Além disso, em países com invernos rigorosos, o ciclo de gelo-degelo e a exposição aos sais estão entre os fatores principais que levam a deterioração de tabuleiros de pontes (AALETI; SRITHARAN, 2019).

Outras pesquisas mostram a eficiência da aplicação do UHPC como material de reabilitação em estruturas de concreto armado de edificações, seja por reforço à flexão em vigas e lajes, reforço de pilares por encamisamento, ou ainda, como material de reparo em estruturas deterioradas (AL-OSTA *et al.*, 2017; CARBONELL MUÑOZ *et al.*, 2014; FARZAD; SHAFIEIFAR; AZIZINAMINI, 2019; RAMACHANDRA MURTHY; KARIHALOO; PRIYA, 2018; XIE; FU; YAN, 2019; ZHU *et al.*, 2020).

O sucesso do concreto de ultra-alto desempenho com ou sem fibras como material de reabilitação estrutural se dá devido às suas características, como a alta resistência à compressão e a sua baixíssima permeabilidade a agentes externos, que proporcionam à estrutura reabilitada melhores condições mecânicas e de durabilidade (TAYEH; ABU BAKAR; MEGAT JOHARI, 2013).

Em todo o mundo, inúmeras estruturas de concreto existentes necessitam urgentemente de reparos eficazes e duráveis. No entanto, a maior dificuldade encontrada ao reparar estruturas existentes está em definir adequadamente a ligação entre os materiais, sendo que boa parte desses reparos falham na zona de transição interfacial, a parte mais fraca entre o novo e o velho concreto (ALHALLAQ; TAYEH; SHIHADA, 2017; ESPECHE; LEÓN, 2011; JÚLIO *et al.*, 2010; RAHMAN *et al.*, 2017; SANCHEZ-SILVA; KLUTKE; ROSOWSKY, 2011). Dessa forma, torna-se imprescindível a investigação da ligação entre concretos e UHPC para a consagração deste como um material com potencial para utilização em reabilitação ou reparo de estruturas.

Em quantidade de pesquisas, os principais parâmetros avaliados na ligação entre NSC e UHPC são a rugosidade da superfície do substrato e as suas condições de umedecimento (ALHALLAQ; TAYEH; SHIHADA, 2017; CARBONELL MUÑOZ *et al.*, 2014; FARZAD; SHAFIEIFAR; AZIZINAMINI, 2019; TAYEH *et al.*, 2012; VALIKHANI *et al.*, 2020). Outros parâmetros menos estudados e com grande relevância são a resistência mecânica do substrato e do reparo (ZHANG, Yang; ZHANG; *et al.*, 2020; ZHANG, Yang; ZHU; LIAO; *et al.*, 2020; ZHANG, Yang; ZHU; WANG; *et al.*, 2020). Um dos poucos estudos que investigaram a ligação entre UHPC e *High Strength Concretes* (HSC) ou concretos de alta resistência (resistência à compressão superior a 50 MPa), foi a pesquisa de Zhang, Yang; Zhu; Liao; *et al.* (2020).

Nesse sentido, o presente trabalho investiga experimentalmente a ligação entre concretos de resistência normal e alta resistência e UHPC. Foram realizados ensaios para avaliar a ligação em diferentes estados de tensão, tais como, cisalhamento, compressão e tração. Os parâmetros estudados foram as condições de umedecimento do substrato e a resistência mecânica do material de substrato e de reparo, de modo a verificar o desempenho e o modo de ruptura da ligação. O parâmetro de tratamento superficial do substrato não foi avaliado, onde todas as amostras passaram por um mesmo tratamento superficial através de escovação.

1.1 JUSTIFICATIVA

Devido à necessidade atual de se obter ligações eficientes em reparo e reabilitação de estruturas de concreto, propõe-se em pesquisas atuais a análise da ligação entre concretos de resistência normal e UHPC. Justifica-se a presente pesquisa pelos seguintes aspectos:

- Em quantidade de pesquisas, o parâmetro mais estudado na ligação entre NSC e UHPC é a rugosidade do substrato, chegando a um consenso de que geralmente, quanto maior a rugosidade, melhor o desempenho da ligação;
- Outros parâmetros avaliados foram as condições de cura, idade e a aplicação do UHPC em diferentes estados, no estado fresco ou no estado endurecido com agente adesivo. No entanto, não apresentaram melhorias significativas em

relação aos padrões usuais: cura do UHPC a temperatura ambiente, idade de 28 dias e aplicação do UHPC no estado fresco sem agente adesivo;

- Além da rugosidade da superfície do substrato, outros dois parâmetros pouco estudados são essenciais para a análise da ligação entre esses materiais: as condições de umedecimento e a resistência à compressão do substrato;
- Existem poucas pesquisas que analisaram a influência das condições de umedecimento do substrato na ligação entre concretos com diferentes resistências e com reparo cem UHPC;
- Poucos estudos investigaram a ligação entre UHPC e concretos de alta resistência (>50 MPa).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Analisar experimentalmente a ligação entre concreto de ultra-alto desempenho e concretos de resistência normal e de alta resistência submetida a diferentes estados de tensão.

1.2.2 Objetivos específicos

- i. Verificar a influência da resistência à compressão do concreto do substrato na resistência da ligação submetida a diferentes estados de tensão, tais como, cisalhamento, compressão e tração;
- ii. Investigar a influência da resistência à compressão do material de reparo na resistência da ligação submetida a diferentes estados de tensão;
- iii. Analisar a influência das condições de umedecimento do substrato na resistência da ligação submetida a diferentes estados de tensão;
- iv. Comparar modelos analíticos existentes de previsão da resistência da ligação aos resultados obtidos experimentalmente.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

Nesta seção será discorrida uma revisão da literatura sobre o material UHPC, seu histórico, propriedades e principais aplicações na engenharia estrutural. Ainda, serão apresentadas as principais pesquisas desenvolvidas sobre a ligação entre UHPC e concretos de resistência normal e de alta resistência.

2.1 CONCRETO DE ULTRA-ALTO DESEMPENHO (UHPC)

Nos últimos anos, pesquisadores em todo o mundo buscam desenvolver ou aprimorar materiais compósitos de matrizes cimentícias, como concretos de alto e ultra-alto desempenho, que podem apresentar resistências à compressão acima de 50 MPa, e entre 120 MPa e 800 MPa, respectivamente (RICHARD; CHEYREZY, 1995; SHI *et al.*, 2015; VANDERLEI, 2004).

Em 1930, Andreasen e Andersen estabeleceram o modelo matemático da teoria da densidade máxima de empacotamento (ANDREASEN; ANDERSEN, 1930). A primeira geração de concretos de ultra-alto desempenho confeccionada a partir deste modelo, chamada *Compact Reinforced Composite* (CRC), nasceu em Aalborg, na Dinamarca e utilizava a bauxita como agregado e fibras de aço para melhorar a resistência do material. No entanto, devido à limitação do superplastificante desenvolvido na época, o CRC não alcançava uniformidade satisfatória quando submetido a vibração (ZHOU *et al.*, 2018).

A partir de 1990, por meio de pesquisas desenvolvidas inicialmente na França e no Canadá, com a introdução de uma nova geração de aditivos superplastificantes baseados em ácido policarboxílico, desenvolveu-se os *Reactive Powder Concretes*

(RPC), ou concretos de pós reativos (CPR), atualmente nomeados como *Ultra High Performance Concretes* (UHPC), ou simplesmente concretos de ultra-alto desempenho (VANDERLEI, 2004; ZHOU *et al.*, 2018).

O UHPC mostrou ser superior aos concretos de alta resistência (HSC), podendo apresentar valores de resistência à compressão até vinte vezes maiores e até dez vezes superiores para resistência à tração, em relação ao NSC. A popularidade do UHPC se deu em razão da sua alta resistência à compressão, com valores superiores a 150 MPa. Entretanto, existe um consenso entre autores de que para ser classificado como ultra-alto desempenho, sem a utilização de fibras, o material deve possuir resistência à compressão superior a 120 MPa (GRAYBEAL, 2007; HASSAN; JONES; MAHMUD, 2012).

Além de seu excelente comportamento mecânico, o UHPC também possui outras propriedades, como a altíssima durabilidade, devido à sua microestrutura densa. Embora seu teor de cimento seja alto, o material também apresenta resistência à retração, devido à baixa quantidade de água, e alta resistência à abrasão (AHMAD *et al.*, 2019).

Os materiais compósitos de matrizes cimentícias com alta resistência, como o UHPC, apresentam ruptura frágil logo após as primeiras aberturas de fissuras. Uma alternativa para a melhoria desta característica é a adição de fibras de aço na mistura, que contribui para o comportamento mecânico em relação à ductilidade. Dessa forma, quando há o aparecimento de microfissuras no concreto, ocorre a redistribuição de tensões entre as fibras e a matriz. Outra contribuição das fibras de aço às propriedades do concreto é a retardação da interconexão entre as microfissuras, promovendo a aceleração do aumento da resistência mecânica logo nas primeiras idades (VANDERLEI, 2004). Nesse sentido, estuda-se o UHPC com adição de fibras, denominado *Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete* (UHPFRC).

Dessa forma, o UHPC começou a ser aplicado em obras na década de 90, onde a primeira passarela para pedestres e ciclistas em UHPC do mundo foi construída em 1997 na cidade de Sherbrooke Quebec, no Canadá, ilustrada na Figura 2.1, marcando oficialmente o início da aplicação do UHPC na engenharia de pontes. Ela possui comprimento de 60 metros divididos em seis segmentos pré-moldados. Os segmentos pré-moldados têm a forma de treliças com 3 metros de altura e um tabuleiro de concreto com nervuras, forma o banzo superior. Os elementos diagonais da treliça, formados por

tubos de aço inoxidável preenchidos com UHPC, podem suportar uma tensão de compressão de até 350 MPa. O banzo inferior é composto por duas vigas protendidas. Os segmentos pré-moldados são conectados por meio de protensão externa. A resistência à compressão do concreto para os banzos superior e inferior foi de 200 MPa (BLAIS; COUTURE, 1999; FEHLING *et al.*, 2014; ZHOU *et al.*, 2018).

Figura 2.1 – Passarela em UHPC em Sherbrooke Quebec – Canadá (1997)



Fonte: Adaptado de Blais e Couture (1999)

Na França, a primeira ponte construída em UHPC foi na cidade de Bourg-lès-Valence, conforme a Figura 2.2. Esta ponte possui dois vãos: 20,5 e 22 m. É montado a partir de vigas em duplo T, com profundidade de 90 cm, largura de 220 cm e espessura de 15 cm. O uso de 3% em volume de fibras de aço e cordoalhas protendidas tornaram praticamente desnecessária as armaduras passivas. As armaduras passivas foram usadas apenas nas junções entre os segmentos pré-moldados e na junção de cada passarela. Comparada a um projeto usando concreto de resistência normal, que exigiria 39 toneladas de aço, a solução adotada com UHPC com resistência à compressão característica de 175 MPa, precisou de apenas 4 toneladas de barras e malhas de aço, juntamente com 28 toneladas de fibras; e foi possível reduzir o peso das cordoalhas protendidas de 17,4 para 6 toneladas. O peso da superestrutura é de apenas 328 toneladas, ao invés de 975 toneladas para uma ponte com concreto de resistência normal (FEHLING *et al.*, 2014; THIBAUX; TANNER, 2002).

Figura 2.2 – Ponte em UHPC com vigas duplo T protendidas em Bourg-Lès-Valence – França



Fonte: Adaptado de Fehling *et al.* (2014)

No entanto, com o avanço dos estudos, a aplicação do UHPC se estendeu a diversas outras obras de grande impacto em diversos países, como a Alemanha, Áustria, China, Coreia do Sul, Estados Unidos, Japão, Holanda e Suíça (FEHLING *et al.*, 2014; ZHOU *et al.*, 2018).

2.1.1 Composição do UHPC

O UHPC é composto de pós finos (cimento Portland, pó de quartzo e sílica ativa), aditivo superplastificante e água (SHI *et al.*, 2015). A produção do UHPC é semelhante à do concreto de resistência normal, todavia, possui baixíssima relação água/cimento (a/c), em alguns casos com valores menores que 0,20. Para melhores resultados, recomenda-se a cura térmica do UHPC, de modo a melhorar as reações químicas da mistura (GRAYBEAL, 2007).

A dosagem do UHPC é realizada partindo do princípio de se obter uma distribuição otimizada das partículas, com o mínimo de espaços vazios (VANDERLEI, 2004). Esse método é chamado de Empacotamento de Partículas, que possui teorias estabelecidas por diversos autores, sendo para o UHPC, um dos principais métodos utilizados, o Modelo Andreasen e Andersen Modificado, criado por Andreasen e Andersen (1930) e posteriormente modificado com a contribuição de Funk e Dinger (1994). Este modelo consiste em uma equação que descreve uma curva teórica “ideal” de distribuição de partículas. A composição do UHPC é definida de modo a aproximar

a curva de distribuição das partículas tanto quanto possível da curva teórica, conforme a Equação (2.1).

$$CPFT = 100 \left(\frac{D^q - D_{min}^q}{D_{max}^q - D_{min}^q} \right) \quad (2.1)$$

Onde $CPFT$ é a porcentagem volumétrica de partículas menores que o diâmetro D ; D é o diâmetro da partícula (μm), D_{min} é o diâmetro da menor partícula (μm); D_{max} é o diâmetro da maior partícula do conjunto (μm) e q é o coeficiente de distribuição.

Vanderlei (2004) sugere adotar um valor de “ q ” entre 0,20 e 0,37, onde para valores iguais ou menores que 0,20 geram um concreto autoadensável, pelo aumento da quantidade de finos na mistura, e valores acima de 0,37 torna a mistura porosa, não alcançando o empacotamento ideal para o UHPC.

Alguns autores definem composições típicas para o UHPC e UHPFRC, que podem variar dependendo dos materiais disponíveis para confecção. Uma composição comum do UHPFRC pode ser observada na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Composição típica do UHPFRC

Material	Quantidade (kg/m ³)	Porcentagem por massa (%)
Cimento Portland	710	28,5
Areia fina	1020	40,8
Sílica ativa	230	9,3
Pó de quartzo	210	8,4
Aditivo superplastificante	31	1,2
Aditivo acelerador	30	1,2
Fibras de aço	156	6,2
Água	110	4,4

Fonte: Adaptado de Graybeal (2007)

Para a confecção do UHPFRC, Vanderlei (2004) recomenda o limite de adição de fibras de 3% em relação ao volume total da mistura, pois acima deste valor a tendência é que o concreto tenha perdas de resistência mecânica, devido à incorporação de vazios resultantes da dificuldade de trabalhabilidade e adensamento ao confeccionar o material.

2.1.2 Propriedades mecânicas do UHPC

Para a classificação de concretos como “alto” desempenho deve-se levar em consideração algumas características importantes, como a trabalhabilidade, a alta resistência mecânica e a durabilidade do material (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Nesse sentido, o UHPC apresenta as propriedades de resistência à compressão e à tração e durabilidade muito superiores aos concretos de resistência normal. Ainda, quando adicionadas fibras de aço em sua composição, o UHPC tem um aumento considerável de ductilidade, que faz com que o material passe a não apresentar ruptura frágil, uma característica não desejável presente em concretos de alta resistência (ABBAS; NEHDI; SALEEM, 2016; GU; YE; SUN, 2015; HABEL *et al.*, 2006; KHAYAT *et al.*, 2019; MÁCA; SOVJÁK; VAVŘINÍK, 2013; PASCHALIS; LAMPROPOULOS; TSIIOULOU, 2018; SHAFIEIFAR; FARZAD; AZIZINAMINI, 2017).

O UHPC também possui altíssima durabilidade, devido à sua microestrutura densa, minimizando a sua permeabilidade aos agentes externos, responsáveis pela corrosão das armaduras e pela carbonatação do concreto. Ainda, embora seu teor de cimento seja alto, devido ao baixo teor de água da mistura, o material também apresenta alta resistência à retração e elevada resistência à abrasão, características especialmente importantes para tabuleiros de pontes e pisos industriais (AHMAD *et al.*, 2019).

As propriedades mecânicas típicas do UHPC e UHPFRC encontradas na literatura estão representadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Propriedades mecânicas típicas do UHPC e UHPFRC aos 28 dias

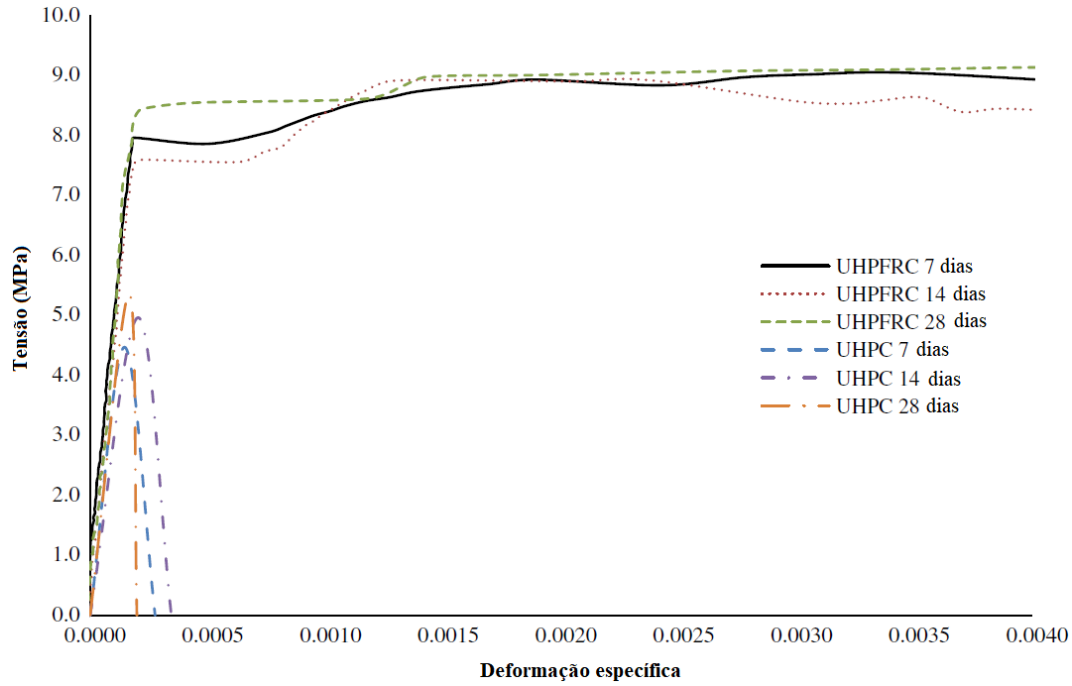
Referências	Material	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Habel <i>et al.</i> (2006)	UHPFRC	175	10–13	45–51
Graybeal (2007)	UHPFRC	126–193	–	42–53
Máca, Sovják e Vavříník (2013)	UHPFRC	>150	10	47
Shafieifar, Farzad e Azizinamini (2017)	UHPFRC	133–171	9–22	60
Pourbaba <i>et al.</i> (2018)	UHPC	110	–	42
	UHPFRC	111–138	–	42–47
Raheem, Mahdy e Mashaly (2019)	UHPC	<120	–	–
	UHPFRC	<150	–	–
Arora <i>et al.</i> (2019)	UHPC	130–153	8–12	–
	UHPFRC	138–142	10	–

Para a determinação do comportamento da curva tensão-deformação pré e pós-fissuração na tração e na compressão do UHPC e UHPFRC, Hassan, Jones e Mahmud (2012) realizaram uma série de ensaios de tração direta utilizando corpos de prova em formato de “osso”, e ensaios de compressão axial utilizando corpos de prova cilíndricos. Por meio de prensas com sistema hidráulico servo controlado de circuito fechado e transdutores de deslocamento variável linear (LVDTs) foram investigados os efeitos das fibras de aço sobre a resistência à tração e à compressão e o comportamento pós-fissuração em diferentes idades. Percebe-se na Figura 2.3, Figura 2.4 e Figura 2.5, a contribuição das fibras para o aumento da ductilidade, da máxima resistência à tração e à compressão, e ainda para o aumento da resistência à compressão nas primeiras idades, apresentando resultados de resistência aos 7 dias semelhantes aos valores aos 28 dias.

A contribuição das fibras de aço para o aumento da ductilidade do material ocorre devido à redistribuição de tensões entre as fibras e a matriz ao iniciar o aparecimento de microfissuras no concreto (pós-fissuração). Outra contribuição das

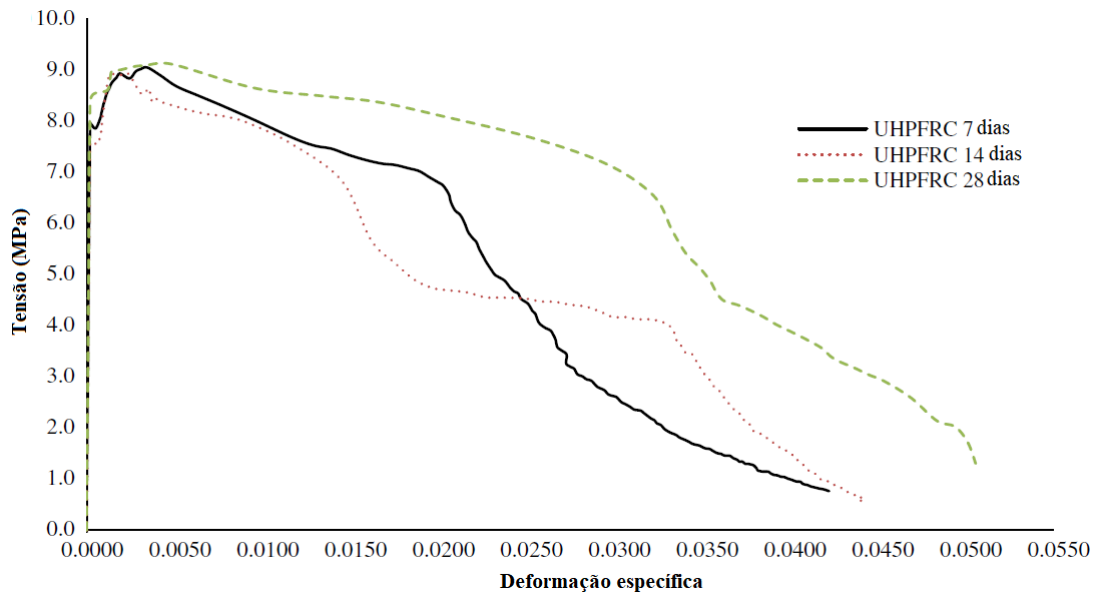
fibras de aço às propriedades do concreto é a retardação da interconexão entre as microfissuras do concreto, promovendo assim a aceleração do aumento da resistência mecânica logo nas primeiras idades (VANDERLEI, 2004).

Figura 2.3 – Curvas tensão-deformação pré-fissuração do UHPC e UHPFRC submetidos à tração direta



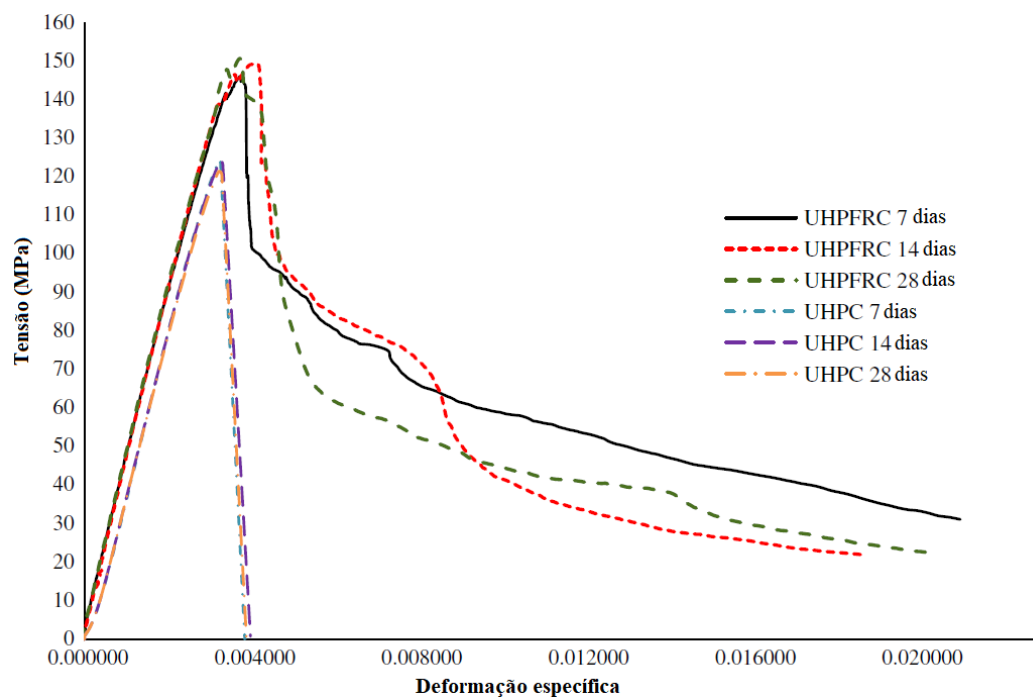
Fonte: Adaptado de Hassan, Jones e Mahmud (2012)

Figura 2.4 – Curvas tensão-deformação completas do UHPFRC submetidos à tração direta



Fonte: Adaptado de Hassan, Jones e Mahmud (2012)

Figura 2.5 – Curvas tensão-deformação do UHPC E UHPFRC submetidos à compressão axial



Fonte: Adaptado de Hassan, Jones e Mahmud (2012)

2.2 UTILIZAÇÃO DO UHPC COMO MATERIAL PARA REABILITAÇÃO ESTRUTURAL

Em circunstâncias normais, as estruturas de concreto armado apresentam excelente desempenho em termos de durabilidade e comportamento estrutural, exceto quando sujeitas a cargas dinâmicas severas e condições ambientais agressivas. Os métodos de reabilitação ou reparo das regiões sujeitas a essas condições, devem ser confiáveis, eficientes e econômicos (TAYEH *et al.*, 2013).

Segundo Alhallaq, Tayeh e Shihada (2017), diversas estruturas de concreto existentes em todo o mundo necessitam urgentemente de reparos eficazes e duráveis. A falta de uma perfeita ligação, faz com que comumente a zona de transição interfacial seja a parte mais fraca da ligação entre o substrato e o novo concreto (ESPECHE; LEÓN, 2011; JÚLIO *et al.*, 2010; RAHMAN *et al.*, 2017; SANCHEZ-SILVA; KLUTKE; ROSOWSKY, 2011).

As estruturas de concreto sustentáveis do futuro serão aquelas em que as intervenções serão apenas devido às manutenções preventivas, com pouca ou nenhuma

interrupção de serviço (BRÜHWILER; DENARIÉ, 2008). Nesse sentido, diversos pesquisadores confirmam a eficiência do UHPC como material de reparo e ou reabilitação estrutural, devido às características de impermeabilidade e alta resistência à compressão, proporcionando ligações com excelente comportamento mecânico e durabilidade, evitando principalmente a penetração de agentes externos prejudiciais, como a água e cloretos (TAYEH *et al.*, 2013; TAYEH; ABU BAKAR; MEGAT JOHARI, 2013).

As vantagens de utilizar a tecnologia do UHPC na reparação de estruturas incluem diminuir o tempo de trabalho necessário para as obras de reabilitação e aumentar a durabilidade de forma que as estruturas reparadas possam atender à vida útil prevista em projeto, com pequenas medidas preventivas (TAYEH *et al.*, 2013).

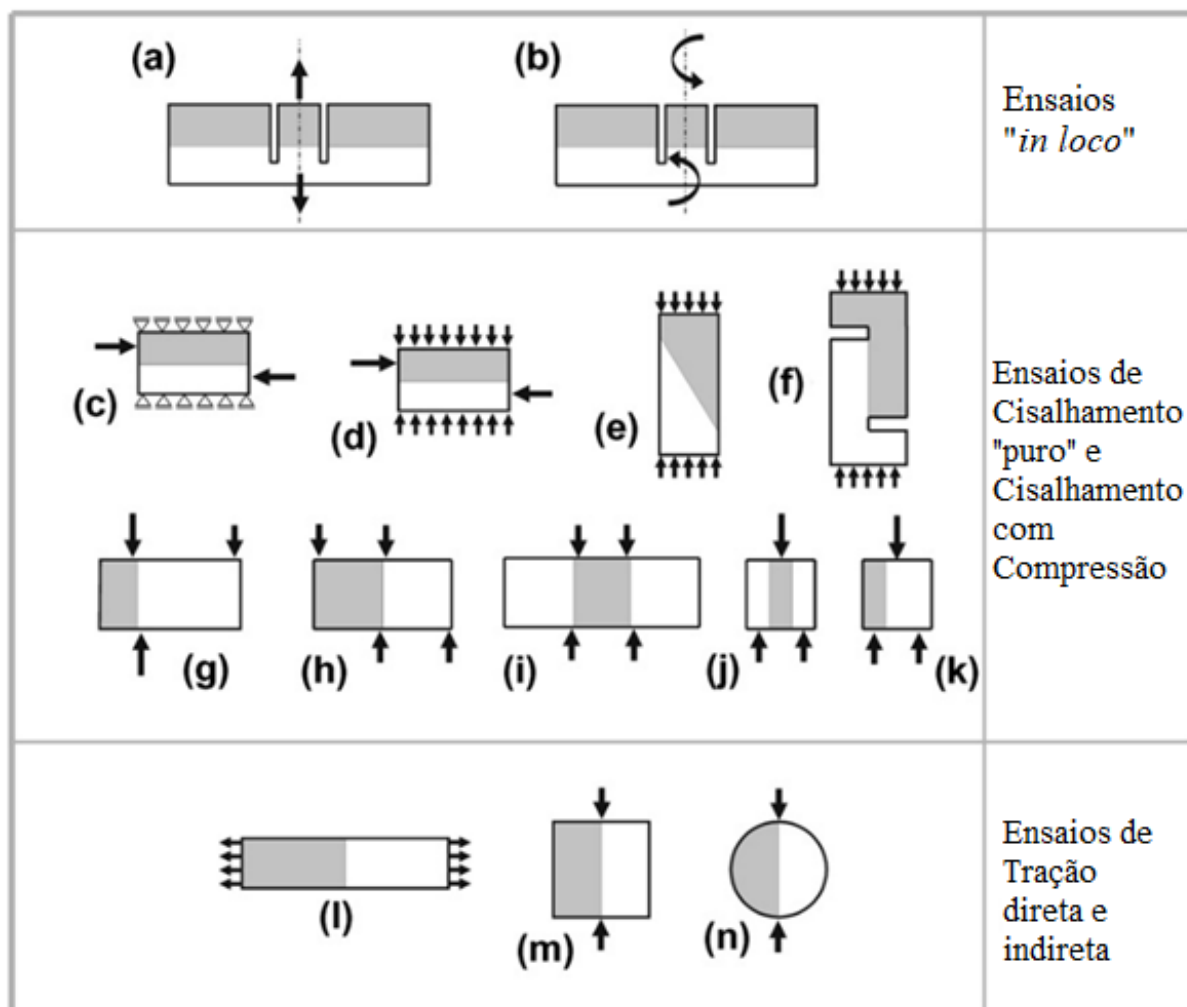
Dessa forma, o UHPC é aplicado estruturas existentes de concreto de resistência normal, seja para reforço à flexão em vigas e pavimentos, reforço de pilares por encamisamento, ou ainda como material de reparo de outros elementos estruturais (AL-OSTA *et al.*, 2017, 2021; CARBONELL MUÑOZ *et al.*, 2014; FARZAD; SHAFIEIFAR; AZIZINAMINI, 2019; RAMACHANDRA MURTHY; KARIHALOO; PRIYA, 2018; XIE; FU; YAN, 2019; ZHANG, Youyou; CHAI, 2021; ZHU *et al.*, 2020).

2.3 INVESTIGAÇÃO DA LIGAÇÃO ENTRE UHPC E CONCRETOS DE RESISTÊNCIA NORMAL

Quando utilizado um material de reabilitação ou reforço de estruturas de concreto, um dos fatores mais importantes a ser avaliado é o comportamento mecânico da ligação entre os dois materiais, sendo imprescindível a utilização de uma técnica que garanta a sua eficiência.

Para a investigação do comportamento da ligação entre compósitos cimentícios, diversos ensaios em diferentes estados de tensão são avaliados, sendo os mais utilizados: tração direta, cisalhamento puro e cisalhamento com compressão. Os ensaios e os respectivos estados de tensão mais utilizados na avaliação da ligação entre concretos estão apresentados na Figura 2.6.

Figura 2.6 – Ensaio para avaliação da resistência da ligação entre concretos em diferentes estados de tensão



Legenda: (a) aderência à tração (*Pull-off*); (b) cisalhamento por torção (*Torsion bond*); (c) cisalhamento direto (*Direct Shear*); (d) cisalhamento com compressão (*Shear-compression*); (e) cisalhamento inclinado (*Slant Shear*); (f) cisalhamento vertical modificado ou cisalhamento compacto (*Modified Vertical Shear Bond or Compact Shear*); (g, h, i) cisalhamento guilhotina (*Guillotine*); (j) cisalhamento direto de duas faces (*Push-out or Push-through or Double-sided Shear*); (k) cisalhamento direto (*Bi-surface Shear*); (l) tração direta (*Direct Tension*); (m, n) tração por compressão diametral (*Splitting Tensile or Brazilian Test*).

Fonte: Adaptado de Espeche e León (2011)

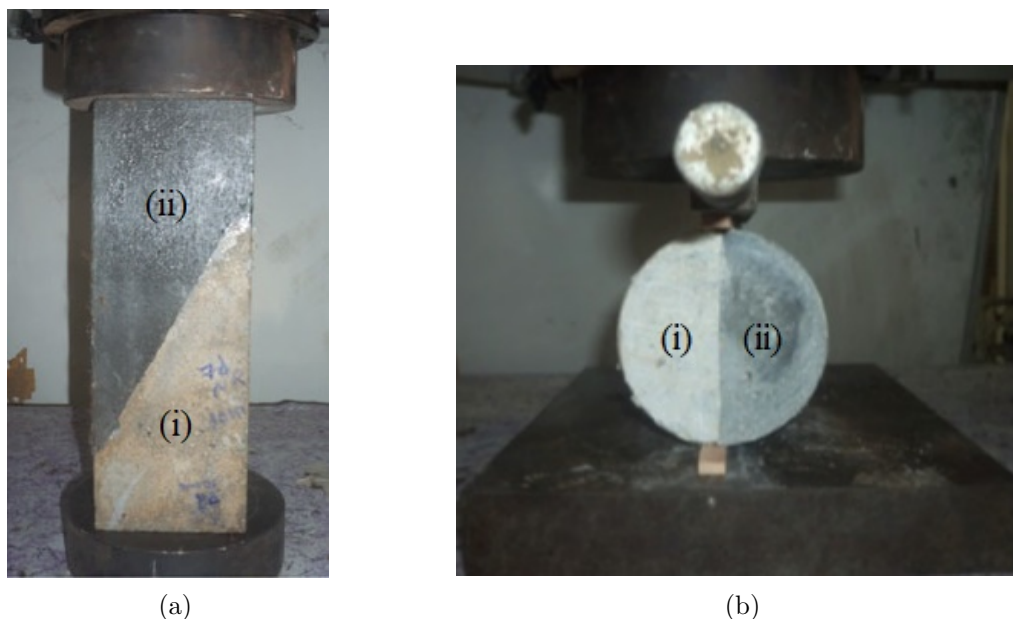
No entanto, para a análise da ligação entre concretos de resistência normal e concretos de ultra-alto desempenho, baseado no guia ACI 546.3R-14 (ACI, 2014) entre outras pesquisas desenvolvidas, os ensaios comumente empregados são:

- i. Cisalhamento inclinado (*Slant Shear*), que combina as tensões de compressão e cisalhamento no plano de atuação das forças, tendo como principal referência a norma técnica ASTM C882 (ASTM, 2013b);

- ii. Tração direta (*Direct Tensile*), atuando somente a tensão de tração, tendo como principal referência a norma técnica ASTM C1404 (ASTM, 1998);
- iii. Aderência à tração (*Pull-off*), atuando somente a tensão de tração, tendo como principal referência a norma técnica ASTM C1583 (ASTM, 2013a);
- iv. Tração na flexão com 3 ou 4 pontos, atuando uma tensão indireta de tração, tendo como principal referência a norma técnica ASTM C78 (ASTM, 2018b);
- v. Cisalhamento direto (*Bi-surface Shear*), atuando apenas a tensão de cisalhamento, introduzido por (MOMAYEZ *et al.*, 2005);
- vi. Tração por compressão diametral (*Splitting Tensile or Brazilian Test*), atuando uma tensão indireta de tração, tendo como principal referência a norma técnica ASTM C496 (ASTM, 2017).

A configuração mais comum de alguns deles pode ser observadas na Figura 2.7, Figura 2.8 e Figura 2.9.

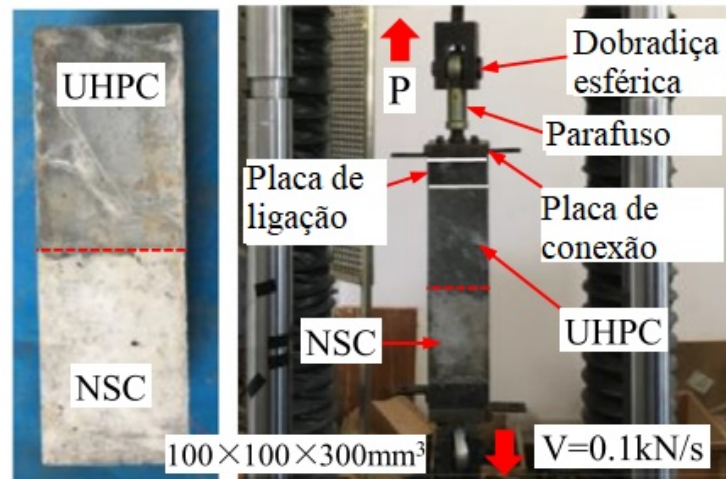
Figura 2.7 – Ensaio de resistência ao cisalhamento inclinado e à tração por compressão diametral



Legenda: (a) resistência ao cisalhamento inclinado em corpo de prova prismático; (b) resistência à tração por compressão diametral em corpo de prova cilíndrico; (i) substrato em concreto de resistência normal (NSC); (ii) concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras (UHPFRC).

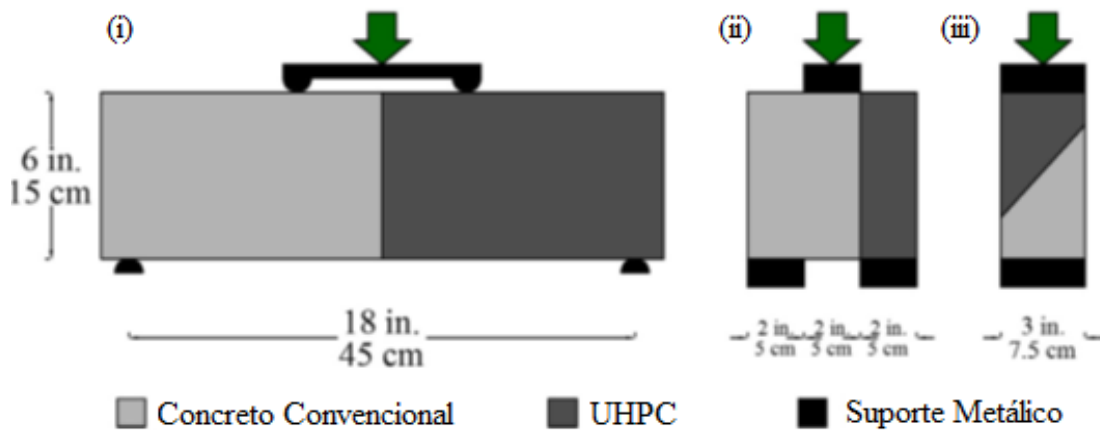
Fonte: Adaptado de Tayeh, Abu Bakar e Megat Johari (2013)

Figura 2.8 – Ensaio de resistência à tração direta



Fonte: Adaptado de Zhang, Yang; Zhu; Liao *et al.* (2020)

Figura 2.9 – Ensaio de resistência à tração na flexão, resistência ao cisalhamento direto e ao cisalhamento inclinado



Legenda: (i) resistência à tração na flexão de quatro pontos em corpo de prova prismático; (ii) resistência ao cisalhamento direto (*bi-surface shear*) em corpo de prova prismático; (iii) resistência ao cisalhamento inclinado (*slant shear*) em corpo de prova cilíndrico.

Fonte: Adaptado de Farzad, Shafieifar e Azizinamini (2019)

Comumente utilizado como parâmetro em pesquisas, o guia ACI 546.3R-14 (ACI, 2014) e os estudos de Sprinkel e Ozyildirim (2000) apresentam os requisitos mínimos e a classificação das ligações entre concretos em função de suas resistências submetidas a diferentes estados de tensão. Os valores estão apresentados na Tabela 2.3 e Tabela 2.4.

Tabela 2.3 – Requisitos mínimos de resistência de ligação para reparos de estruturas de concreto segundo o guia ACI 546.3R-14 (ACI, 2014)

Ensaio	Resistência da ligação (MPa)		
	Ao 1 ^o dia	Ao 7 ^o dia	Ao 28 ^o dia
Cisalhamento inclinado (<i>Slant Shear</i>)	2,8–6,9	6,9–12,0	14,0–21,0
Cisalhamento direto (<i>Direct Shear</i>)	1,0–2,1	2,1–2,8	2,8–4,1
Tração direta (<i>Direct Tensile</i>)	0,5–1,0	1,0–1,7	1,7–2,1

Fonte: Adaptado de ACI (2014)

Tabela 2.4 – Classificação da ligação entre concretos em termos de resistência à tração segundo Sprinkel e Ozyildirim (2000)

Classificação	Resistência da ligação (MPa)
Excelente	$\geq 2,1$
Muito boa	1,7–2,1
Boa	1,4–1,7
Regular	0,7–1,4
Ruim	0–0,7

Fonte: Adaptado de Sprinkel e Ozyildirim (2000)

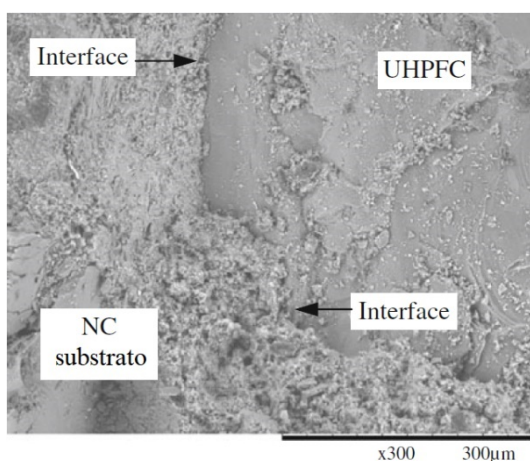
Além da resistência da ligação, outro parâmetro importante que deve ser observado é o modo de ruptura da amostra. Comumente utilizado em pesquisas são definidos três tipos, sendo elas:

- i. Tipo de ruptura A: Falha adesiva, acarretando a separação entre os materiais na região da interface;
- ii. Tipo de ruptura B: Falha mista, ocorrendo a separação na interface com descolamento do substrato;
- iii. Tipo de ruptura C: Falha coesiva, acontecendo a ruptura do substrato.

Devido à necessidade de se obter ligações eficientes, diversos pesquisadores investigaram o comportamento de ligações entre concretos de resistência normal e UHPC, de modo a verificar a influência de alguns parâmetros, tais como, a rugosidade da superfície, as condições de umedecimento e a resistência mecânica do substrato; as condições de cura do UHPC; a idade dos materiais e da ligação; e ainda a natureza da ligação (UHPC aplicado no estado fresco ou endurecido com emprego de agente adesivo na ligação), sendo os três primeiros os parâmetros de maior impacto no desempenho da ligação (ZHANG, Yang; ZHU; LIAO; *et al.*, 2020). As principais pesquisas desenvolvidas sobre a ligação entre UHPC e concretos de resistência normal estão listadas no Quadro 2.1.

Outras análises realizadas por Tayeh *et al.* (2012) e Tayeh, Abu Bakar e Megat Johari (2013) foram os ensaios permeabilidade rápida em cloreto (*Rapid Chloride Permeability Test* – RCPT), permeabilidade ao gás e a água e ainda a análise microestrutural da ligação utilizando microscópio eletrônico de varredura (MEV). Os resultados confirmam que o UHPC possui permeabilidade muito baixa, com alta resistência à penetração de cloretos, gás e água. Assim, o UHPC pode formar uma boa ligação interfacial com o substrato NSC melhorando a resistência contra a penetração de cloretos e outros fluidos agressivos, aumentando a vida útil das estruturas reparadas. As imagens da microestrutura da zona de transição entre o substrato e UHPC confirmam a boa aderência entre os materiais, conforme ilustrado na Figura 2.10.

Figura 2.10 – Micrografia MEV da zona de transição entre NSC e UHPC



Fonte: Adaptado de Tayeh, Abu Bakar e Megat Johari (2013)

Quadro 2.1 – Principais pesquisas desenvolvidas sobre a ligação NSC-UHPC

Referência	Objetivo(s) da pesquisa	Parâmetro(s) utilizados	Origem
Tayeh <i>et al.</i> (2012)	Avaliação da ligação quanto a resistência a cloretos, permeabilidade a gás e água, bem como características microestruturais da zona de transição.	Tratamentos superficiais do substrato.	Malásia/ Palestina
Carbonell Muñoz <i>et al.</i> (2014)	Investigação da ligação, sob uma variedade de estados de tensão e regimes variados de congelamento e degelo como uma medida de durabilidade.	Tratamentos superficiais do substrato.	Estados Unidos
Alhallaq, Tayeh e Shihada (2017)	Avaliação da relação entre rugosidade da superfície e resistência da ligação ao cisalhamento inclinado e tração indireta.	Tratamentos superficiais do substrato.	Palestina
Farzad, Shafieifar e Azizinamini (2019)	Desenvolvimento de uma técnica de simulação numérica para prever a capacidade de carga de estruturas quando o substrato é unido a outro material de reparo.	Condições de umedecimento da superfície do substrato.	Estados Unidos
Aaleti e Sritharan (2019)	Investigação do uso de uma fina camada de UHPC em um tabuleiro de ponte de concreto de resistência normal, e análise experimental do comportamento da ligação.	Resistência e tratamentos superficiais do substrato sequência de concretagem e condições de cura do UHPC.	Estados Unidos
Ganesh e Ramachandra Murthy (2020)	Análise experimental, numérica e avaliação da microestrutura da ligação.	Tratamentos superficiais e a natureza da ligação (UHPC no estado fresco ou endurecido).	Índia
Zhang, Yang; Zhu; Liao <i>et al.</i> (2020)	Avaliação do desempenho mecânico da ligação interfacial e apresentação de coeficientes de coesão e atrito para servir de referencial para futuros dimensionamentos.	Tratamentos superficiais, idade e condições de cura do UHPC, grau de umedecimento e resistência do substrato, emprego de agente adesivo e expansivo.	China
Zhang, Yang; Zhang <i>et al.</i> (2020)	Avaliação da resistência ao cisalhamento, características de escorregamento e modos de falha, através de ensaio bi superficial.	Idem ao anterior	China
Zhang, Yang; Zhu; Wang <i>et al.</i> (2020)	Avaliação da resistência ao cisalhamento e propor um método para previsão da capacidade de cisalhamento da ligação para diferentes tratamentos superficiais.	Tratamentos superficiais, resistência do substrato e emprego de agente adesivo.	China
Valikhani <i>et al.</i> (2020)	Avaliação da resistência ao cisalhamento e a sua correlação com o grau de rugosidade da superfície e, através da utilização de dispositivo de varredura laser 3D terrestre e processamento digital de imagens.	Tratamentos superficiais do substrato.	Estados Unidos

2.3.1 Rugosidade do substrato

Um dos parâmetros mais importantes para a avaliação do comportamento da ligação entre compósitos cimentícios é a rugosidade do substrato. Diversas técnicas de tratamento da superfície foram propostas em pesquisas sobre a ligação entre NSC e UHPC.

Inicialmente, nos estudos de Harris, Sarkar e Ahlborn (2011), foram propostos quatro métodos de tratamento superficial do substrato, sendo, escovação com escova metálica, furos, ranhuras e cortes em formato de “dentes”. Foram realizados os ensaios de resistência da ligação ao cisalhamento inclinado e à tração por compressão diametral. Amostras sem rugosidade falharam na interface, enquanto corpos de prova com rugosidade baixa (furos), rugosidade alta (ranhuras) e cortes (“dentes”) falharam no substrato. Esses resultados indicam que com a preparação adequada da superfície, a resistência da ligação pode ultrapassar a capacidade resistente do substrato.

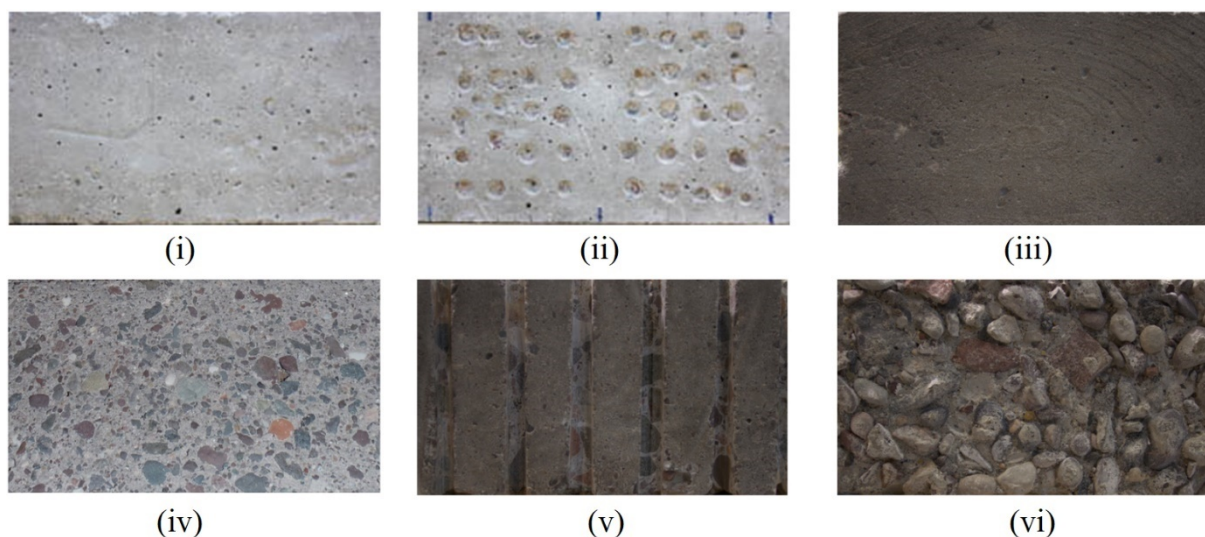
A partir dos resultados experimentais e comparações com os requisitos mínimos de desempenho da ligação dos guias ACI 546.3R-14 (ACI, 2014) e Sprinkel e Ozyildirim (2000), os autores concluíram que o UHPC fornece desempenho de ligação adequado para vários tratamentos superficiais. No entanto, no ensaio de resistência à tração por compressão diametral, os resultados de resistência da ligação não foi sensível à rugosidade da superfície. As amostras com alta rugosidade (ranhuras) forneceram a menor resistência, porque a ranhura não foi completamente preenchida com UHPC, resultando em vazios e uma área de contato menor entre os dois materiais.

Nos estudos de Tayeh *et al.* (2012) e Tayeh; Abu Bakar; Megat Johari (2013) foram utilizados os tratamentos superficiais como parâmetro do estudo da ligação entre UHPC e NSC. Além dos métodos de escovação, furos e ranhuras, introduziram o método de “jateamento de areia”, conhecido também como jateamento abrasivo, comumente utilizado para limpeza de superfícies metálicas, que consiste em propulsionar um fluxo de material abrasivo contra uma superfície em alta velocidade, que além de remover contaminantes de uma superfície, possibilita a criação de uma interface com maior rugosidade. Essa técnica além de proporcionar os melhores resultados no ensaio de tração por compressão diametral, foi a única a gerar resultados que atenderam os requisitos do guia ACI 546.3R-14 (ACI, 2014) para o ensaio de

cisalhamento inclinado. Outros estudos de Abo Sabah *et al.* (2019), Valikhani *et al.* (2020) e Youm *et al.* (2018) confirmam a eficiência do método de jateamento de areia na ligação entre UHPC e NSC.

Além dos métodos de tratamento citados anteriormente, Carbonell Muñoz *et al.* (2014) adotaram um tipo de tratamento superficial de alta rugosidade, expondo os agregados, que pode ser visualizado na Figura 2.11 (vi). Os autores realizaram os ensaios de resistência à tração por compressão diametral, ao cisalhamento inclinado e aderência à tração. Para simular condições ambientais severas, submeteram no ensaio de resistência à tração por compressão diametral ciclos de gelo-degelo. Os resultados mostraram que o desempenho da ligação NSC-UHPC é adequado para aplicações de sobreposição de pontes, independentemente do grau de rugosidade do substrato, idade das amostras, exposição a ciclos de congelamento e degelo e diferentes configurações de carregamento. Para todos os cenários investigados, exceto quando o substrato apresentou uma condição de umedecimento seca, o desempenho da ligação excedeu as capacidades recomendadas pela literatura. Entretanto, os autores concluíram que um tratamento simples que remova a poeira e detritos do substrato pode ser suficiente para obter uma excelente ligação entre NSC-UHPC, desde que possua a condição de umedecimento saturada.

Figura 2.11 – Tipos de tratamentos utilizados no substrato NSC por Carbonell Muñoz *et al.* (2014)



Legenda: (i) liso (ligeiramente escovado); (ii) furado; (iii) escovado; (iv) jateado com areia; (v) ranhurado; (vi) áspero (agregado exposto).

Fonte: Adaptado de Carbonell Muñoz *et al.* (2014)

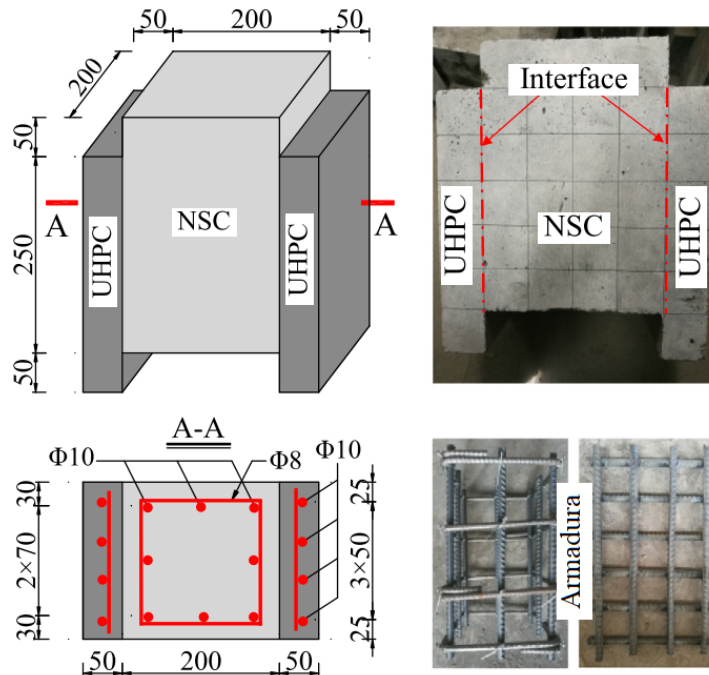
Em estudos mais recentes, Alhallaq, Tayeh e Shihada (2017) investigaram o uso de UHPC como material de reparo em substratos de concreto existentes com 127 dias de idade. As superfícies de concreto foram tratadas de modo a obter os seguintes aspectos: lisa, ranhurada, furada e escovada. Para avaliar o comportamento da ligação, foram realizados o ensaio de resistência ao cisalhamento inclinado e à tração por compressão diametral. Os resultados mostraram que todos os métodos de preparação de superfície tiveram resistências mais altas que as obtidas pela superfície lisa. A técnica de furos forneceu os maiores valores de resistência ao cisalhamento com falha monolítica. Por fim, os autores concluem que a resistência à tração é menos sensível ao nível de rugosidade da superfície e mais proporcional à resistência do material de reparo.

Ao comparar os métodos de ranhuras e furos na preparação da superfície da ligação entre UHPC e NSC no estado fresco e endurecido colado com adesivo epóxi, Ganesh e Ramachandra Murthy (2020) encontraram nos ensaios de resistência ao cisalhamento inclinado, à tração por compressão diametral e à tração na flexão de quatro pontos, resultados melhores com a superfície ranhurada e colada com adesivo epóxi.

Valikhani *et al.* (2020) avaliaram 30 amostras sob o ensaio de cisalhamento direto (*bi-surface shear*) com diferentes preparações de superfície, incluindo conectores mecânicos e agente de ligação à base de resina epóxi. Os resultados mostraram que uma rugosidade adequada para a superfície interfacial com ou sem conectores mecânicos transferiu o modo de falha para o substrato NSC, indicando alta resistência da ligação, se comparado às superfícies sem qualquer tratamento. Ao aumentar a rugosidade da superfície foi possível obter um número maior de falhas coesivas, ocorrendo ruptura do substrato. Os valores de resistência da ligação NSC-UHPC foi em geral, superior ao dobro dos valores apresentados por ligações NSC-NSC.

De forma semelhante, Zhang, Yang; Zhang *et al.* (2020) realizaram uma série de ensaios de cisalhamento direto de duas faces (*double-sided shear*), ilustrado na Figura 2.12, com diferentes combinações de tensões. Além de outros seis parâmetros, utilizaram o tratamento superficial do substrato como liso, áspero (agregado exposto), furado, ranhurado e vergalhões de aço pós-instalados, conforme a Figura 2.13.

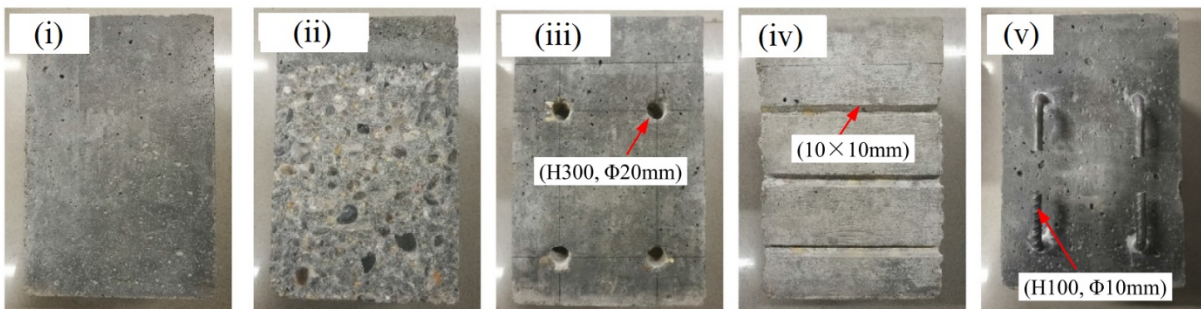
Figura 2.12 – Ensaio de resistência ao cisalhamento direto de duas faces realizado por Zhang, Yang; Zhang *et al.* (2020)



Nota: Dimensões em mm.

Fonte: Adaptado de Zhang, Yang; Zhang *et al.* (2020).

Figura 2.13 – Tratamentos superficiais utilizados por Zhang, Yang; Zhang *et al.* (2020)



Legenda: (i) liso; (ii) áspero (agregado exposto); (iii) furado; (iv) ranhurado; (v) vergalhões de aço pós-instalados.

Fonte: Adaptado de Zhang, Yang; Zhang *et al.* (2020).

Com esse estudo, pode-se observar que a rugosidade do substrato melhorou a capacidade de cisalhamento interfacial. Essa resistência reduziu sob uma combinação de tensões de cisalhamento e tração, e aumentou sob tensões de cisalhamento e compressão. O modo de ruptura predominante das amostras apresentou falha mista ou coesiva, com baixo número de falhas adesivas. Durante o processo de carregamento de

amostras NSC-UHPC, o deslizamento da interface foi pequeno, o que ocasionou falhas frágeis, com exceção da interface ranhurada e com vergalhões pós-instalados, que apresentaram falha dúctil.

Outro estudo análogo de Zhang, Yang; Zhu; Wang *et al.* (2020) considerou sete tipos diferentes de tratamentos superficiais: baixa rugosidade (lascamento superficial), alta rugosidade (lascamento profundo) com e sem adesivo interfacial à base de resina epóxi, vergalhão exposto, ranhuras, furos e pinos de aço pós-instalados. Foram realizados 18 ensaios de cisalhamento direto de duas faces. A ordem de classificação dos resultados, do mais alto ao mais baixo, foram: pinos de aço pós-instalados, vergalhão exposto, alta rugosidade, ranhuras, baixa rugosidade e furos. Com exceção do tratamento com ranhuras e pinos de aço pós-instalados, as amostras apresentaram ruptura frágil.

Na pesquisa de Zhang, Yang; Zhu; Liao *et al.* (2020) foram adotados diversos parâmetros para avaliação do comportamento mecânico da ligação entre NSC e UHPC, sendo o fator rugosidade da superfície considerado pelos autores como um dos principais para se obter ligações eficientes. Para isso, a superfície do substrato foi tratada de modo a apresentar as seguintes características: lisa, escovada, agregado exposto parcialmente, agregado exposto, agregado exposto e furada, e agregado exposto e ranhurada. Foram realizados os ensaios de resistência ao cisalhamento inclinado, à tração por compressão diametral e à tração direta. Para comparação, foram produzidos corpos de prova de referência (NSC-NSC) e amostras monolíticas. A superfície do substrato com agregado exposto parcialmente, forneceu o melhor desempenho mecânico da ligação, no entanto, a superfície lisa (sem tratamento) apresentou os piores resultados. As amostras NSC-UHPC atenderam aos requisitos mínimos da literatura e alcançaram uma classificação “excelente”. Independentemente do ensaio realizado, a resistência da ligação das amostras NSC-UHPC foi mais alta que a da amostra NSC-NSC, chegando a valores 216% superiores, e próxima ou ligeiramente maior (101%) que a resistência das amostras monolíticas de NSC, dependendo da resistência do substrato, condições de umedecimento e tratamento superficial utilizado.

As principais pesquisas realizadas com os respectivos ensaios adotados, resultados de resistência da ligação, modo de ruptura e classificação quanto aos requisitos mínimos exigidos observados na literatura, estão apresentadas no Quadro 2.2.

Quadro 2.2 – Comparativo de resultados de resistência de ligação NSC-UHPC

Referência	Ensaio(s) realizado(s)	Preparação da superfície	Resistência da ligação (MPa)	Modo de ruptura	Classificação	
					ACI 546.3R-14 (ACI, 2014)	Sprinkel e Ozyildirim (2000)
Harris, Sarkar e Ahlborn (2011)	Cisalhamento inclinado (<i>Slant shear</i>)	Sem tratamento	11,00	A/B	Insuficiente	–
		Furado	14,00	C	Suficiente	–
		Ranhurado	17,00	C	Suficiente	–
		Cortado	17,00	C	Suficiente	–
	Tração por compressão diametral (<i>Splitting tensile</i>)	Sem tratamento	5,00	A/B	–	Excelente
		Escovado	5,00	A/B	–	Excelente
Ranhurado		3,00	B/C	–	Excelente	
Tayeh <i>et al.</i> (2012)	Cisalhamento inclinado (<i>Slant shear</i>)	Sem tratamento	8,68	A/B	Insuficiente	–
		Ranhurado	13,92	C/D	Insuficiente	–
		Furado	12,27	C	Insuficiente	–
		Jateado	17,81	D	Suficiente	–
		Escovado	12,75	B/C	Insuficiente	–
	Tração por compressão diametral (<i>Splitting tensile</i>)	Sem tratamento	1,85	A/B	–	Muito boa
		Ranhurado	3,24	C	–	Excelente
		Furado	2,60	C	–	Excelente
		Jateado	3,79	C	–	Excelente
		Escovado	2,96	C	–	Excelente
Aaleti e Sritharan (2019)	Cisalhamento inclinado (<i>Slant shear</i>)	Textura com profundidade de 1,26 mm	14,45	A	–	Excelente
		Idem com 1,59 mm	20,05	A	–	Excelente
		Idem com 5,00 mm	18,73	C	–	Excelente
		Idem com 3,00 mm	16,77	C	–	Excelente
		Idem com 6,50 mm	16,03	A/C	–	Excelente
Valikhani <i>et al.</i> (2020)	Cisalhamento direto (<i>Bi-surface shear</i>)	Sem tratamento	2,80	A/B	–	Excelente
		Jateado	6,30	A/B/C	–	Excelente
		Jateado e conectores mecânicos	7,40	B/C	–	Excelente
		Sem tratamento e adesivo epóxi	2,40	A/B/C	–	Excelente
		Jateado e adesivo epóxi	3,20	A/B/C	–	Excelente

Legenda: Tipo de ruptura A: Falha adesiva; Tipo de ruptura B: Falha mista; Tipo de ruptura C: Falha coesiva.

2.3.2 Condições de umedecimento do substrato

A condição de umedecimento do substrato é um dos parâmetros mais importantes na avaliação da ligação NSC-UHPC, de acordo com os resultados encontrados na literatura. As principais condições de umedecimento utilizadas são: *Air Surface Dry*, ou substrato seco ao ar com superfície seca (ASD); *Air Surface Wet*, ou substrato seco ao ar com superfície úmida; e *Saturated Surface Dry*, ou substrato saturado com superfície seca (SSD).

Para as ligações NSC-UHPC da pesquisa de Carbonell Muñoz *et al.* (2014), o melhor desempenho ocorre com o substrato com a condição de umedecimento SSD. Os autores afirmam que se as condições de umedecimento do substrato forem realizadas corretamente, o grau de rugosidade do substrato não é um fator crítico para obter-se uma boa resistência de ligação, devido à alta adesão entre os dois materiais.

Farzad, Shafieifar e Azizinamini (2019) analisaram experimentalmente e numericamente a ligação NSC-UHPC com a superfície do substrato úmida e seca. Em todos os ensaios realizados, as amostras com o substrato úmido apresentaram melhores resultados.

Zhang, Yang; Zhu; Liao *et al.* (2020) estudaram a influência de três graus de umedecimento do substrato NSC no comportamento da ligação NSC-UHPC: ASD, submetendo o substrato a temperatura ambiente por mais de 7 dias antes da aplicação do UHPC; ASW, aspergindo água no substrato durante aproximadamente 20 minutos e limpo com um pano seco, antes da aplicação do UHPC; e SSD, em que o substrato foi submerso em água por 24 horas e depois seco com ar comprimido, antes da aplicação do UHPC. Ao realizar os ensaios de resistência ao cisalhamento inclinado, à tração por compressão diametral e à tração direta, os melhores resultados encontrados foram quando a superfície do substrato apresentava a condição de umedecimento SSD, seguido pelas amostras ASW e ASD. Comparado com as amostras de referência (ASD), os graus de umedecimento ASW e SSD forneceram às amostras com superfície escovada aumento percentual médio de 34,4% e 49,0%, respectivamente, e 15,5% e 28,3%, respectivamente, para as amostras com uma superfície com baixa rugosidade (agregado parcialmente exposto).

Da mesma forma, de acordo com os resultados da pesquisa de Zhang, Yang; Zhang *et al.* (2020), quanto maior a resistência ou o grau de umedecimento do substrato, maior a capacidade de cisalhamento da interface. A capacidade de cisalhamento da interface NSC-UHPC com o substrato saturado (submerso em água por 48 horas) foi a maior, seguida pelo substrato úmido e substrato seco. O valor médio da carga de ruptura ao cisalhamento das amostras úmidas e saturadas aumentou 31,3% e 50,5%, respectivamente, em comparação com as amostras com o substrato seco. Portanto, os autores recomendam quando aplicado o UHPC como material de reabilitação em estruturas de concreto danificadas, a saturação do substrato de concreto por pelo menos 10 horas.

Devido à concretagem do UHPC e sua subsequente hidratação, a alta hidrofiliabilidade do substrato NSC pode transferir a água para a interface, o que reduz a quantidade de água no UHPC e, portanto, gera uma reação de hidratação incompleta, enfraquecendo a ligação entre os compósitos. Dessa forma, justifica-se a melhoria da ligação NSC-UHPC com a condição de umedecimento ASW e, principalmente, SSD (ZHANG, Yang; ZHU; LIAO; *et al.*, 2020).

2.3.3 Resistência mecânica do substrato

Nos estudos sobre a ligação NSC-UHPC, quando atendidas as corretas recomendações de tratamento superficial do substrato e condições de umedecimento, a resistência da ligação é suficiente para a falha das amostras acontecer de forma coesiva, através da ruptura do substrato, ou seja, a resistência da ligação acaba sendo maior do que a resistência do NSC. Desse modo, a resistência mecânica do material do substrato tem influência na resistência da ligação.

Na pesquisa de Alhallaq, Tayeh e Shihada (2017), os resultados mostraram que a resistência à tração da ligação NSC-UHPC é menos sensível ao nível de rugosidade da superfície e mais proporcional à resistência mecânica do substrato.

Zhang, Yang; Zhang *et al.* (2020) utilizaram três classes de concreto: C30, C40 e C50 para a confecção de substratos. De acordo com os resultados do ensaio de cisalhamento direto, quanto maior a resistência do substrato, maior a capacidade de cisalhamento da interface, em que o valor médio da carga de ruptura da ligação com

substrato C40 foi 14,9% maior que a do C30, e o valor médio do C50 foi 25,6% superior à do C40. De forma curiosa, a razão entre a máxima carga de ruptura da ligação NSC-UHPC com substratos C30 e C50 e com substratos C40 e C50 foram de 0,693 e 0,796, respectivamente, correspondendo às suas respectivas relações de resistência à compressão. Logo, houve o aumento na resistência ao cisalhamento da ligação NSC-UHPC de forma aproximadamente linear à resistência à compressão do substrato.

Um dos poucos estudos a utilizar um concreto de alta resistência (HSC) como material do substrato, Zhang, Yang; Zhu; Liao *et al.* (2020) realizaram os ensaios de resistência ao cisalhamento inclinado, à tração por compressão diametral e à tração direta para investigar a ligação entre UHPC e concretos. Foram utilizadas duas classes de NSC (C30 e C40) e uma classe de HSC (C60) como material do substrato. Foi observado o aumento da resistência da ligação em função do aumento da resistência à compressão do substrato. A mesma conclusão foi encontrada na pesquisa de Zhang, Yang; Zhu; Wang *et al.* (2020) ao realizar ensaios de cisalhamento direto utilizando duas classes de NSC (C30 e C50) para a confecção do substrato.

2.3.4 Condições de cura do UHPC

Na pesquisa de Tayeh, Abu Bakar e Megat Johari (2013), a cura à vapor do UHPC forneceu alta resistência à compressão nas primeiras idades. Os resultados dos ensaios de cisalhamento inclinado e tração por compressão diametral indicaram alta resistência da ligação nas primeiras idades do compósito. Segundo os autores, essa característica pode proporcionar que estruturas obtenham resistência suficiente em pouco tempo após o reparo.

No entanto, nos estudos de Aaleti e Sritharan (2019) e Youm *et al.* (2018) ao comparar a condição de cura do UHPC a temperatura ambiente e a vapor com alta temperatura, não obtiveram resultados que justifiquem a utilização de cura térmica a vapor, pois não afetou significativamente nos resultados da ligação NSC-UHPC.

Zhang, Yang; Zhang *et al.* (2020) e Zhang, Yang; Zhu; Liao *et al.* (2020) ao utilizar três condições de cura do UHPC (temperatura ambiente, cura térmica a vapor a 60 °C e 90 °C) ainda concluíram que a cura térmica a 60 °C tiveram melhorias insignificantes no desempenho da ligação dos compósitos, enquanto a temperatura

excessiva de cura (maior ou igual a 90 °C) piorou o desempenho da ligação interfacial, devido ao rápido desenvolvimento da retração do UHPC. De forma geral, as amostras curadas à temperatura ambiente tiveram resultados muito próximos ou até superiores aos resultados das amostras curadas a 60 °C, não justificando a aplicação desse tipo de técnica em reabilitação ou reparo de estruturas.

2.3.5 Idade do UHPC

Zhang, Yang; Zhu; Liao *et al.* (2020) investigaram a ligação NSC-UHPC variando a idade do material de reparo em 0,5; 1; 2; 3; 7; 28; 90 e 180 dias, e concluíram que as propriedades mecânicas da ligação das interfaces NSC-UHPC desenvolvem-se rapidamente desde as primeiras idades, atingindo na maioria das amostras os valores máximos de resistência da ligação aos 28 dias. Nos ensaios de cisalhamento inclinado, tração por compressão diametral e de tração direta, nas idades de 1 e 2 dias as resistências da ligação atingem 89,9% e 94,7%, 99,5% e 106%, 81,5% e 90,8% dos valores atingidos aos 28 dias, respectivamente. Em idades avançadas de 90 e 180 dias as resistências da ligação foram ligeiramente inferiores às de 28 dias, com decréscimos médios de 1,5% e 2,7%, respectivamente. Esses resultados demonstram que há aumento na retração do UHPC a longo prazo, diminuindo a capacidade de resistência da ligação.

De forma semelhante, Zhang, Yang; Zhang *et al.* (2020) avaliaram a influência da idade do UHPC na resistência da ligação NSC-UHPC ao cisalhamento. As idades avaliadas foram de 2, 3, 7, 28 e 180 dias. Com o aumento das idades do UHPC, a capacidade de cisalhamento interfacial do NSC-UHPC aumentou. Na idade inicial de 3 e 7 dias atingiu mais de 88,4% e 93,1% da resistência ao cisalhamento aos 180 dias, respectivamente. No entanto, na fase tardia a resistência ao cisalhamento permaneceu praticamente inalterada, em que aos 180 dias houve acréscimo de apenas 3% em relação a resistência aos 28 dias.

2.3.6 Natureza da ligação

A natureza da ligação, com o material de reparo no estado fresco ou no estado endurecido com agente adesivo, foi estudada por várias pesquisas.

A utilização de agente adesivo na aplicação de UHPC em superfície de concreto de resistência normal apresentou resultados favoráveis na pesquisa de Ganesh e Ramachandra Murthy (2020). Quando aplicado o UHPC no estado fresco, a maior parte das amostras apresentou modo de falha adesiva puramente na interface, enquanto no estado endurecido utilizando adesivo epóxi na ligação com o substrato, a maioria das amostras apresentou falha no substrato NSC.

Em contrapartida, Valikhani *et al.* (2020) afirmaram que o uso de agente de ligação pode prejudicar a resistência da NSC-UHPC. Nos resultados dos ensaios realizados pelos autores, o agente de ligação reduziu pela metade a resistência da ligação em superfícies rugosas.

De forma mais abrangente, a pesquisa de Zhang, Yang; Zhu; Liao *et al.* (2020) utilizou o agente de ligação à base de resina epóxi para dois tipos de tratamentos superficiais, interface lisa e rugosa (agregado exposto parcialmente). Os resultados mostraram que o uso do adesivo epóxi aumenta a capacidade resistente da ligação na interface lisa, enquanto diminui a resistência da ligação para a interface rugosa.

Percebe-se nas pesquisas que o agente de ligação à base de resina epóxi não adere perfeitamente a superfícies com rugosidade, sendo mais eficientes para superfícies lisas.

2.4 MODOS DE RUPTURA E MODELOS DE PREVISÃO DA RESISTÊNCIA DA LIGAÇÃO ENTRE CONCRETOS

A ligação entre concretos pode apresentar basicamente três modos de ruptura, conforme a Figura 2.14, sendo eles:

- i. Tipo de ruptura A: Falha adesiva na interface entre os concretos, acarretando a separação entre os materiais na região da ligação. Esse tipo de ruptura ocorre quando não há aderência adequada entre os materiais;
- ii. Tipo de ruptura B: Falha mista, ocorrendo a separação na interface com descolamento do substrato;
- iii. Tipo de ruptura C: Falha coesiva, acontecendo a ruptura do substrato. Esse tipo de ruptura ocorre quando a aderência da ligação possui mais resistência que o material de substrato naquele determinado o estado de tensão.

Figura 2.14 – Modos de ruptura

(a) Tipo A

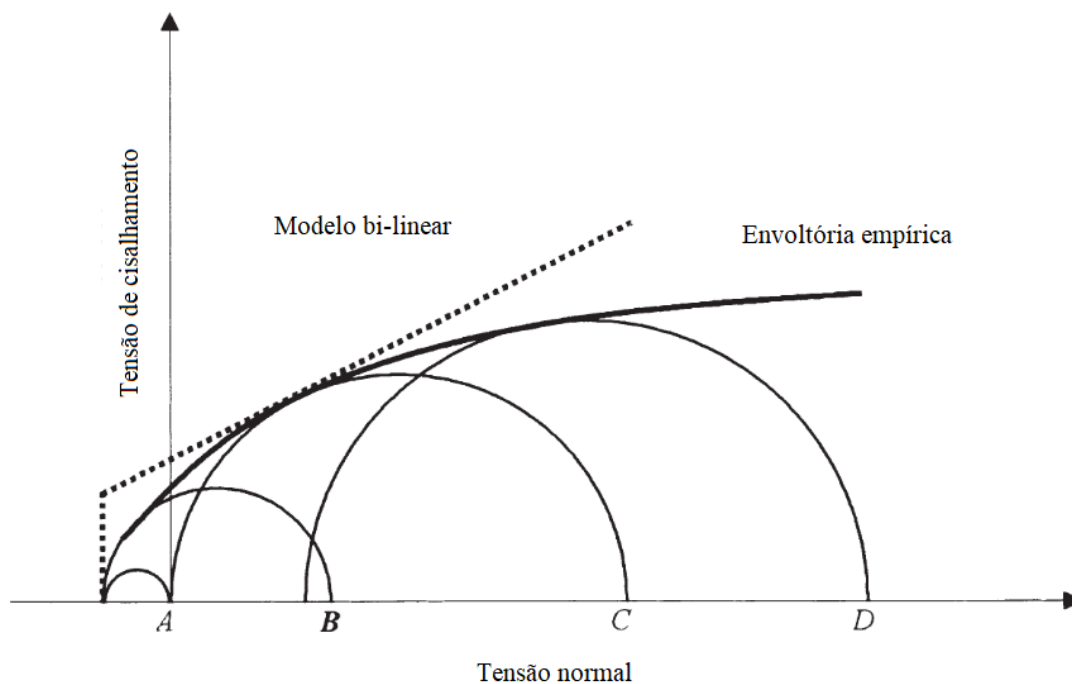
(b) Tipo B

(c) Tipo C

Fonte: O autor

2.4.1 Critério de ruptura de Mohr-Coulomb

O critério de ruptura de Mohr-Coulomb é um modelo constitutivo que descreve a resistência ao cisalhamento de solos e rochas a partir de vários estados de tensão, conforme a Figura 2.15.

Figura 2.15 – Típica envoltória de ruptura de rochas

Legenda: Círculo de Mohr do ensaio de: A: tração direta, B: tração por compressão diametral, C: compressão axial e D: compressão triaxial.

Fonte: Adaptado de Austin, Robins e Pan (1999)

Como pode ser visualizado na Figura 2.15, o critério de Mohr-Coulomb fornece dois modelos de envoltória de ruptura, um modelo bi linear aproximado tangenciando o círculo de Mohr do ensaio de resistência à compressão axial, e ainda, um modelo completo empírico de envoltória, tangenciando todos os círculos de Mohr em diferentes estados de tensão.

Uma envoltória de ruptura da ligação entre concretos pode ser realizada a partir de diferentes combinações de estados de tensão através de diferentes configurações de carregamento. Essa ideia foi utilizada na análise da resistência ao cisalhamento da ligação entre concretos.

Clímaco e Regan (2001) seguindo o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, expressaram a falha de adesão na interface da ligação entre concretos em função de tensões de cisalhamento e tensões normais, conforme a Equação (2.2):

$$\tau = c + \mu\sigma = c + \tan \phi \sigma \text{ (MPa)} \quad (2.2)$$

Em que τ é a tensão de cisalhamento atuando na interface de ligação; σ é a tensão normal atuando na interface de ligação; $\mu = \tan \phi$ é o coeficiente de fricção ou de atrito; ϕ é o ângulo interno de fricção ou de atrito; c é a coesão ou adesão.

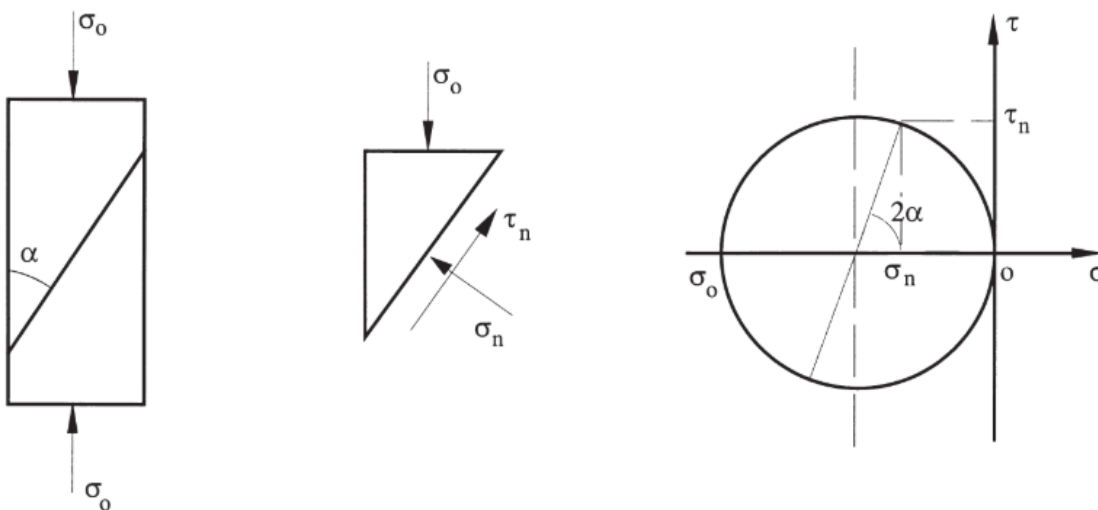
O coeficiente de fricção (μ) é influenciado exclusivamente pela rugosidade da interface da ligação. A coesão ou adesão (c) depende da rugosidade da interface e da resistência à tração do material.

Segundo Hack (2018), a coesão não necessariamente possui o mesmo valor da resistência à tração direta ou indireta. No entanto, ao avaliar a ligação entre concretos, outros autores adotam a coesão sendo igual ao valor médio encontrado nos ensaios de resistência à tração direta ou indireta por compressão diametral, ou ainda como o valor médio do ensaio de resistência ao cisalhamento direto (puro), como pode ser visualizado no Quadro 2.3. Esse arbitramento é válido, visto que esses resultados se aproximam demasiadamente da intersecção da reta de envoltória com o eixo Y.

Quadro 2.3 – Coesão da ligação entre concretos adotado por pesquisas

Referência	Ensaio adotado como resultante da coesão
Espeche e León (2011)	Tração por compressão diametral
Santos e Júlio (2011)	Tração por compressão diametral
Hussein <i>et al.</i> (2016)	Tração direta / Tração por compressão diametral
Farzad, Shafieifar e Azizinamini (2019)	Cisalhamento direto
Zanotti e Randl (2019)	Tração por compressão diametral
Semendary e Svecova (2020)	Tração direta / Cisalhamento direto
Zhang, Yang; Zhu; Liao <i>et al.</i> (2020)	Cisalhamento direto

Depois de encontrado o valor da coesão, utiliza-se os resultados do ensaio de cisalhamento inclinado para traçar o círculo de Mohr, conforme a Figura 2.16 e aplica-se a Equação (2.2) para encontrar o valor do coeficiente de fricção.

Figura 2.16 – Ensaio de cisalhamento inclinado e círculo de Mohr

Fonte: Adaptado de Austin, Robins e Pan (1999)

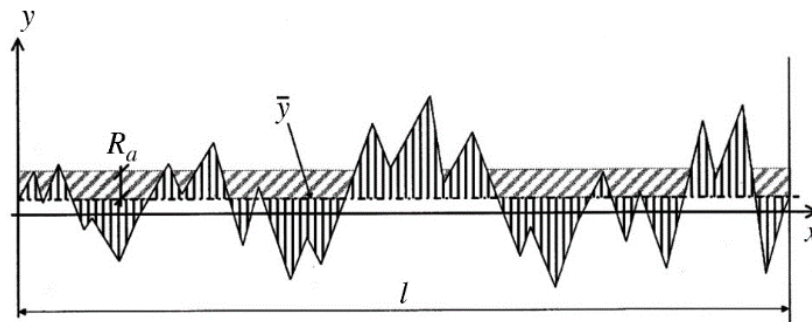
2.4.2 Modelos de previsão da resistência da ligação entre concretos

Com base na teoria de Mohr-Coulomb, algumas normas internacionais e pesquisas sugerem alguns modelos de previsão da capacidade ao cisalhamento da ligação entre compósitos cimentícios.

2.4.2.1 fib *Model Code for Concrete Structures* 2010 (2013)

A norma francesa fib MC 2010 (FIB, 2013) apresenta um método para quantificação da rugosidade de uma superfície de concreto. O parâmetro comumente utilizado R_a (Figura 2.17) representa o desvio médio de um perfil a partir de uma linha média (\bar{y}) e pode ser calculado pela Equação (2.3).

Figura 2.17 – Coeficiente de rugosidade média (R_a)



Fonte: fib MC 2010 (FIB, 2013)

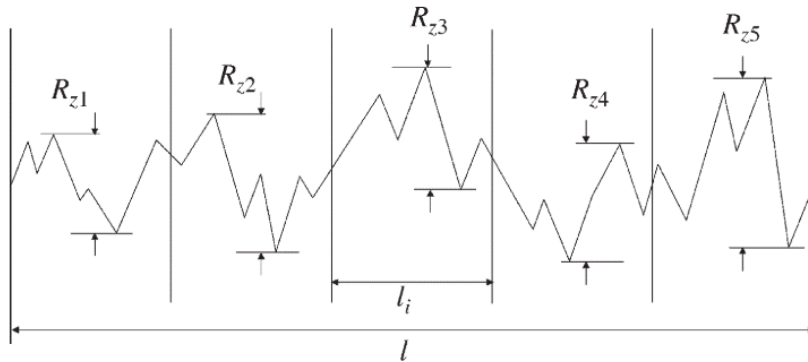
$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x) - \bar{y}| dx \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \bar{y}| \text{ (mm)} \quad (2.3)$$

Em que l é o comprimento avaliado; $y(x)$ é a função da altura do perfil na posição x .

$$\bar{y} = \frac{1}{l} \int_0^l y(x) dx \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \text{ (mm)} \quad (2.4)$$

Outro parâmetro frequentemente utilizado, R_z (Figura 2.18) representa a altura média crista-vale de um perfil com um número definido de segmentos de comprimento, que pode ser calculado pela Equação (2.5), neste exemplo com 5 segmentos.

Figura 2.18 – Coeficiente de rugosidade de altura média crista-vale (R_z)



Fonte: fib MC 2010 (FIB, 2013)

$$R_z = \frac{1}{5} \int_0^l y(x) dx \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \text{ (mm)} \quad (2.5)$$

A norma classifica a rugosidade da superfície em diferentes categorias em função de uma medida de altura entre a crista e vale, conforme apresentado na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Classificação da rugosidade da superfície, conforme a fib MC 2010 (FIB, 2013)

Categoria	R_t (mm)
Muito lisa (ex.: superfície fundida em aço)	Não mensurável
Lisa (ex.: sem tratamento, baixa rugosidade)	<1,50
Rugosa (ex.: jateamento abrasivo, jateamento de alta pressão com água etc.)	$\geq 1,50$
Muito rugosa (ex.: jateamento de alta pressão com água, chanfros)	$\geq 3,00$

Legenda: R_t é um parâmetro de rugosidade que representa a altura total crista-vale ($R_t \approx R_z/2$).

Fonte: Adaptado de fib MC 2010 (FIB, 2013)

Ainda, a norma apresenta um modelo para o cálculo da resistência ao cisalhamento de ligações entre concretos baseado na teoria de Mohr-Coulomb, conforme a Equação (2.6).

$$\tau_u = c_a f_{ctd} + \mu \sigma_n \text{ (MPa)} \quad (2.6)$$

Em que τ_u é a resistência ao cisalhamento da interface; c_a é o coeficiente para ligação adesiva, conforme a Tabela 2.6; f_{ctd} é a resistência de cálculo à tração do concreto (Equação (2.7)).

Tabela 2.6 – Coeficientes para ligação adesiva (c_a), conforme a fib MC 2010 (FIB, 2013)

Categoria da interface	c_a
Muito lisa	0,025
Lisa	0,20
Rugosa	0,40
Muito rugosa	0,50

Fonte: Adaptado de fib MC 2010 (FIB, 2013)

$$f_{ctd} = \frac{\alpha_{ct} f_{ctk,0,05}}{\gamma_c} \text{ (MPa)} \quad (2.7)$$

Em que $f_{ctk,0,05}$ é a resistência à tração característica na fração de 5% do concreto (Equação (2.8)); α_{ct} é um coeficiente que leva em conta os efeitos a longo prazo na resistência à tração do concreto e efeitos desfavoráveis (recomendado pela norma o valor de 1,00); γ_c é um fator de segurança parcial para o concreto (recomendado pela norma o valor de 1,50).

$$f_{ctk,0,05} = 0,7 f_{ct,m} \text{ (MPa)} \quad (2.8)$$

Em que f_{ctm} é a resistência média à tração do concreto (Equações (2.9) e (2.10)).

$$f_{ctm} = 0,30f_{ck}^{\frac{2}{3}} \text{ (MPa) para concreto } \leq \text{ C50} \quad (2.9)$$

$$f_{ctm} = 2,12 \ln \left[1 + \left(\frac{f_{cm}}{10} \right) \right] \text{ (MPa) para concreto } > \text{ C50} \quad (2.10)$$

Em que f_{ck} é a resistência característica à compressão do concreto; f_{cm} é a resistência média à compressão do concreto (Equação (2.11)).

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ (MPa)} \quad (2.11)$$

Ainda, a norma apresenta uma lista de valores de coeficiente de fricção em função da rugosidade apresentada pela superfície da interface de ligação entre concretos, conforme a Tabela 2.7.

Tabela 2.7 – Valores de coeficiente de fricção de acordo em função da rugosidade da superfície para concretos \leq C50, de acordo com a fib MC 2010 (FIB, 2013)

Categoria da interface	μ
Lisa	0,50–0,70
Rugosa	0,70–1,00
Muito rugosa	1,00–1,40

Fonte: Adaptado de fib MC 2010 (FIB, 2013)

2.4.2.2 EN 1992-1-1: Eurocode 2: *Design of concrete structures* (2004)

A norma europeia EN 1992-1-1: Eurocode 2 (CEN, 2004) apresenta uma equação para a previsão da resistência ao cisalhamento da interface de ligação entre concretos, conforme a Equação (2.12).

$$\tau_u = c_a f_{ctd} + \mu \sigma_n + \rho f_{yd} (\mu \sin \alpha + \cos \alpha) \text{ (MPa)} \quad (2.12)$$

Em que τ_u é a resistência ao cisalhamento da interface; σ_n tensão normal resultante da menor força normal externa aplicada na interface, podendo ser simultaneamente aplicada com uma força cortante, assumindo valores positivos para tensão normal de compressão, de modo que $\sigma_n < 0,6f_{cd}$, e negativo para tensão normal de tração. Quando σ_n é uma tensão normal de tração, a parcela $c_a f_{ctd}$ deve ser adotado como 0; f_{ctd} é a resistência de cálculo à tração do concreto (Equação (2.7)); f_{yd} é a resistência de cálculo ao escoamento do aço de armadura passiva; ρ é a razão entre a área de aço cruzando a interface e a área de concreto da ligação; α ângulo entre a armadura e a interface da ligação (entre 45° e 90°).

$$\rho = \frac{A_{vf}}{A_{cv}} \quad (2.13)$$

Em que A_{vf} é a área de armaduras cruzando a interface de cisalhamento; A_{cv} é a área de concreto da interface de cisalhamento.

A norma ainda apresenta uma lista de valores de coeficiente para ligação adesiva e fricção que podem ser adotados em função da rugosidade apresentada pela superfície da interface de ligação entre concretos, conforme a Tabela 2.8.

Tabela 2.8 – Valores de coeficiente para ligação adesiva e fricção de acordo com a rugosidade da superfície, de acordo com a Eurocode 2 (CEN, 2004)

Aspecto da interface	c_a	μ
Muito lisa (ex.: superfície fundida em aço, plástico ou madeira lisa)	0,025–0,10	0,50
Lisa (ex.: superfície moldada sem tratamento após a vibração)	0,20	0,60
Rugosa (Parâmetro de rugosidade < 3,00 mm e espaçamento de \pm 40,00 mm, ex.: agregados expostos)	0,40	0,70
Muito rugosa (ex.: chanfros)	0,50	0,90

Fonte: Adaptado de Eurocode 2 (CEN, 2004)

2.4.2.3 CSA S6-14: *Canadian Highway Bridge Design Code* (2017)

A norma canadense CSA S6-14 (CSA, 2014) da mesma forma, utiliza a teoria de Mohr-Coulomb para apresentar um modelo de previsão de resistência ao cisalhamento da interface de ligação entre concretos, no entanto, utiliza um fator de redução da resistência do concreto, conforme a Equação (2.14).

$$\tau_u = \phi_c \left\{ c + \mu \left[\left(\frac{P_c}{A_{cv}} \right) + \rho f_y \right] \right\} \text{ (MPa)} \quad (2.14)$$

Em que ϕ_c é o fator de redução de resistência do concreto (recomendado pela norma o valor de 0,75); P_c é a força normal atuando na interface de cisalhamento, se a força atuante na interface for de tração, então $P_c = 0$.

Os valores de coesão e fricção pela norma estão apresentados na Tabela 2.9.

Tabela 2.9 – Valores de coesão e fricção em função da rugosidade da superfície, de acordo com a CSA S6-14 (CSA, 2014)

Categoria da interface	c (MPa)	μ
Lisa (sem rugosidade intencional)	0,25	$0,60\lambda_1$
Rugosa ($R_{pm} \pm 5,00$ mm e espaçamento de $\pm 15,00$ mm)	0,50	$1,00\lambda_1$
Concreto monolítico (sem reparo)	1,00	$1,40\lambda_1$

Legenda: R_{pm} é um parâmetro de rugosidade que representa a altura média da crista; λ_1 é um parâmetro de ponderação dependente da massa específica do concreto (1,00 para concreto com massa específica entre 2150 e 2500 kg/m³; 0,85 para concreto massa específica entre 1850 e 2149 kg/m³; 0,75 para concreto com massa específica < 1850 kg/m³).

Fonte: Adaptado de CSA S6-14 (CSA, 2014)

2.4.2.4 AASHTO LRFD *Bridge Design Specifications* (2012)

O guia americano AASHTO LRFD *Bridge Design Specifications* (AASHTO, 2012) de igual forma, utiliza a teoria de Mohr-Coulomb, no entanto, utiliza a máxima força cortante, ao invés de resistência ao cisalhamento da interface de ligação entre concretos, de acordo com a Equação (2.15).

$$V_n = cA_{cv} + \mu(P_c + A_{vf}f_y) \text{ (N)} \quad (2.15)$$

Em que V_n é a máxima força cortante atuante na interface de cisalhamento.

Os valores de coesão e fricção adotados pelo guia em função da rugosidade da interface estão apresentados na Tabela 2.10.

Tabela 2.10 – Valores de coesão e fricção de acordo com a rugosidade da superfície, de acordo com a AASHTO LRFD (AASHTO, 2012)

Categoria da interface	c (MPa)	μ
Lisa (sem tratamento)	0,52	0,60
Rugosa ($R_{pm} \leq 6,40$ mm)	1,65	1,00
Concreto monolítico (sem reparo)	2,76	1,40

Fonte: Adaptado de AASHTO LRFD (AASHTO, 2012)

2.4.2.5 Santos e Júlio (2011, 2010)

Santos e Júlio (2011, 2010) apresentaram um modelo de previsão de resistência ao cisalhamento entre concretos para os seus resultados experimentais. Com base na teoria de Mohr-Coulomb, os autores relacionaram a coesão e o coeficiente de fricção a um parâmetro de rugosidade R_{vm} e a fatores de segurança, conforme as Equações (2.16) e (2.17), respectivamente.

$$\tau_u = c_a f_{ctd} + \mu(\sigma_n + \rho f_{yd}) \text{ (MPa)} \quad (2.16)$$

$$c_a = \frac{1,062 R_{vm}^{0,145}}{\gamma_{coh}} \quad (2.17)$$

Em que R_{vm} é um parâmetro de rugosidade que representa a profundidade máxima do vale; γ_{coh} é um fator de segurança parcial do coeficiente de coesão (recomendado pelos autores o valor de 2,60).

$$\mu = \frac{1,366R_{vm}^{0,041}}{\gamma_{fr}} \quad (2.18)$$

Em que γ_{fr} é um fator de segurança parcial para o coeficiente de fricção (recomendado pelos autores o valor de 1,20).

Os valores de R_{vm} foram determinados pelos autores através de ensaios e estão relacionados na Tabela 2.11.

Tabela 2.11 – Valores de R_{vm} em função do tratamento superficial, de acordo com Santos e Júlio (2011)

Tratamento superficial	R_{vm} (mm)
Sem tratamento	0,119
Escovação com escova de aço	0,473
Jateamento de areia (<i>sandblasting</i>)	0,604
Jateamento abrasivo (<i>shotblasting</i>)	0,899
Ranhuras (<i>hand-scrubbing or raking</i>)	2,350

Fonte: Adaptado de Santos e Júlio (2011)

2.4.2.6 Mohamad *et al.* (2015)

De forma semelhante, Mohamad *et al.* (2015) utilizaram a teoria de Mohr-Coulomb para definição de um modelo de previsão de resistência ao cisalhamento da ligação entre concretos (Equação (2.19)) e associaram a coesão e o coeficiente de fricção em função do parâmetro de rugosidade R_{pm} , de acordo com as Equações (2.20) e (2.21), respectivamente.

$$\tau_u = c_a f_{ctm} + \mu \sigma_n \text{ (MPa)} \quad (2.19)$$

$$c_a = 0,2363e^{0,237R_{pm}} \quad (2.20)$$

$$\mu = 0,8766R_{pm}^{0,3978} \quad (2.21)$$

Em que R_{pm} é um parâmetro de rugosidade que representa a altura média da crista. Os valores de R_{pm} foram determinados pelos autores através de ensaios e estão relacionados na Tabela 2.12.

Tabela 2.12 – Valores de R_{pm} em função do tratamento superficial, de acordo com Mohamad *et al.* (2015)

Tratamento superficial	R_{pm} (mm)
Sem tratamento	0,74–1,31
Ranhuras	2,38–3,22
“Dentes”	3,42–3,73
Rugosidade longitudinal	4,47–5,53
Rugosidade transversal	5,42–7,67

Fonte: Adaptado de Mohamad *et al.* (2015)

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentadas as características e especificações dos materiais e técnicas utilizadas, método de produção dos concretos e do UHPC, assim como o programa experimental para a análise da ligação entre concretos e UHPC.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS E SUAS PROPRIEDADES

Para a caracterização dos agregados foram realizados os ensaios experimentais listados no Quadro 3.1. Para os demais materiais, as características físicas e mecânicas estão apresentadas de acordo as fichas e boletins técnicos fornecidos pelos respectivos fabricantes.

Quadro 3.1 – Ensaio de caracterização de materiais

Material	Ensaio	Referência
Areia/Brita	Determinação da composição granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Areia	Determinação da massa específica	NBR 16916 (ABNT, 2021a)
Brita	Determinação da massa específica	NBR 16917 (ABNT, 2021b)

Fonte: O autor

3.1.1 Cimento

Foi utilizado para confecção dos concretos e do UHPC, o cimento Portland de alta resistência inicial CP V-ARI da marca Cauê, do fabricante InterCement Brasil. As propriedades físicas, mecânicas e químicas estão indicadas na Tabela 3.1 e na Tabela 3.2, conforme o boletim técnico fornecido pelo fabricante, que atende os requisitos da norma técnica NBR 16697 (ABNT, 2018b).

Tabela 3.1 – Propriedades físicas e mecânicas do cimento

Característica	Referência	Resultado	
	Blaine (cm ² /g)	NBR 16372 (ABNT, 2015)	4720,00
Finura	# 200 (%)	NBR 11579 (ABNT, 2012)	0,20
	# 325 (%)	–	1,70
Tempo de pega	Início de Pega (min)	NBR 16607 (ABNT, 2018a)	238,00
	Fim de Pega (min)		295,00
Resistência à compressão (f_{cj})	01 dia (MPa)		21,40
	03 dias (MPa)	NBR 7215 (ABNT, 2019)	40,20
	07 dias (MPa)		45,40

Fonte: InterCement Brasil (2020)

Tabela 3.2 – Análise química do cimento

% MgO	% SO ₃	% Perda ao fogo
4,50	2,80	5,40

Fonte: InterCement Brasil (2020)

3.1.2 Areias

Para a confecção dos concretos de resistência normal e alta resistência foi utilizada a areia denominada “Areia I”, proveniente do Rio Paraná.

As propriedades físicas da Areia I estão apresentadas na Tabela 3.3. A análise granulométrica está apresentada na Tabela 3.4, assim como a curva de distribuição das partículas está apresentada na Figura 3.1.

Tabela 3.3 – Propriedades físicas da Areia I

Característica	Referência	Resultado
Massa específica	NBR 16916 (ABNT, 2021a)	2,649 g/cm ³

Fonte: O autor

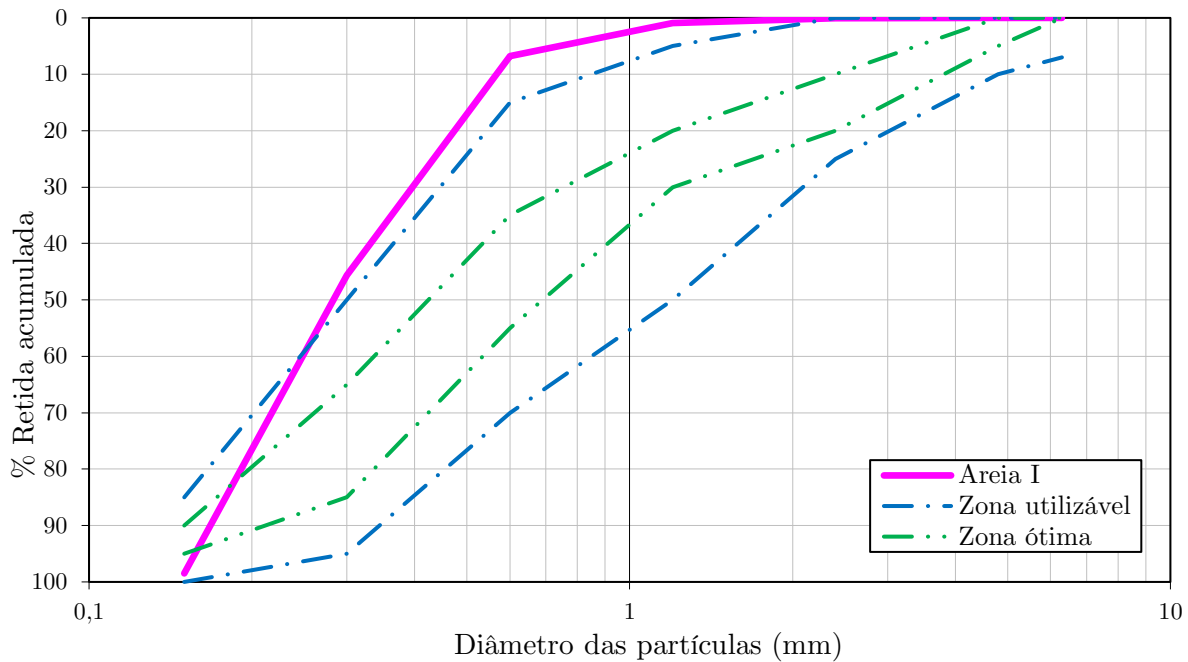
Tabela 3.4 – Análise granulométrica da Areia I (NBR NM 248 (ABNT, 2003))

Peneiras ASTM	Peneiras (mm)	% Retida	% Retida acumulada
1/4”	6,30	0,00	0,00
4	4,76	0,00	0,00
8	2,38	0,07	0,07
16	1,18	0,86	0,93
30	0,60	5,88	6,81
50	0,30	38,82	45,62
100	0,15	52,86	98,49
Fundo	Fundo	1,51	100,00

Dimensão máxima característica ($D_{máx}$) = 1,18 mm

Módulo de finura (MF) = 1,519

Fonte: O autor

Figura 3.1 – Curva de distribuição granulométrica da Areia I

Para a confecção do UHPC foi utilizada a areia denominada Areia II, quartzosa, classificada como muito fina, com dimensão média de 0,28 mm e dimensão máxima característica de 0,425 mm, comercializada pela empresa Mineração Jundu Ltda. com o nome Areia Quartzosa Industrial AG – 50/60 SE 40, com produção realizada na unidade industrial de Analândia, estado de São Paulo. As análises química e granulométrica foram realizadas pela empresa, conforme boletim técnico e estão apresentadas na Tabela 3.5 e na Tabela 3.6.

Tabela 3.5 – Análise química da Areia II

% SiO ₂	pH	% Perda ao fogo	% Teor de umidade
99,500	6,500	0,060	0,020

Fonte: Mineração Jundu (2021b)

Tabela 3.6 – Análise granulométrica da Areia II

Peneiras ASTM	Peneiras (mm)	% Retida	% Retida acumulada
20	0,850	0,00	0,00
30	0,600	0,20	0,20
40	0,425	2,10	2,30
50	0,300	19,90	22,20
70	0,212	43,60	65,80
100	0,150	26,20	92,00
140	0,106	7,50	99,50
200	0,075	0,50	100,00
270	0,053	0,00	100,00
Fundo	Fundo	0,00	100,00

Dimensão máxima característica ($D_{m\acute{a}x}$) = 0,425 mm
Módulo de finura AFS = 57,10 AFS
Concentração = 89,70 %
Finos = 0,60 %

Fonte: Mineração Jundu (2021b)

3.1.3 Brita

Para a confecção dos concretos foi utilizada a brita basáltica com dimensão máxima característica de 19 mm, com extração realizada na região de Maringá, estado do Paraná, fornecida pela empresa Mineração Mandaguari Ltda.

As propriedades físicas da brita estão apresentadas na Tabela 3.7. A análise granulométrica está apresentada na Tabela 3.8, assim como a curva de distribuição das partículas está apresentada na Figura 3.2.

Tabela 3.7 – Propriedades físicas da brita

Característica	Referência	Resultado
Massa específica	NBR 16917 (ABNT, 2021b)	2,883 g/cm ³

Fonte: O autor

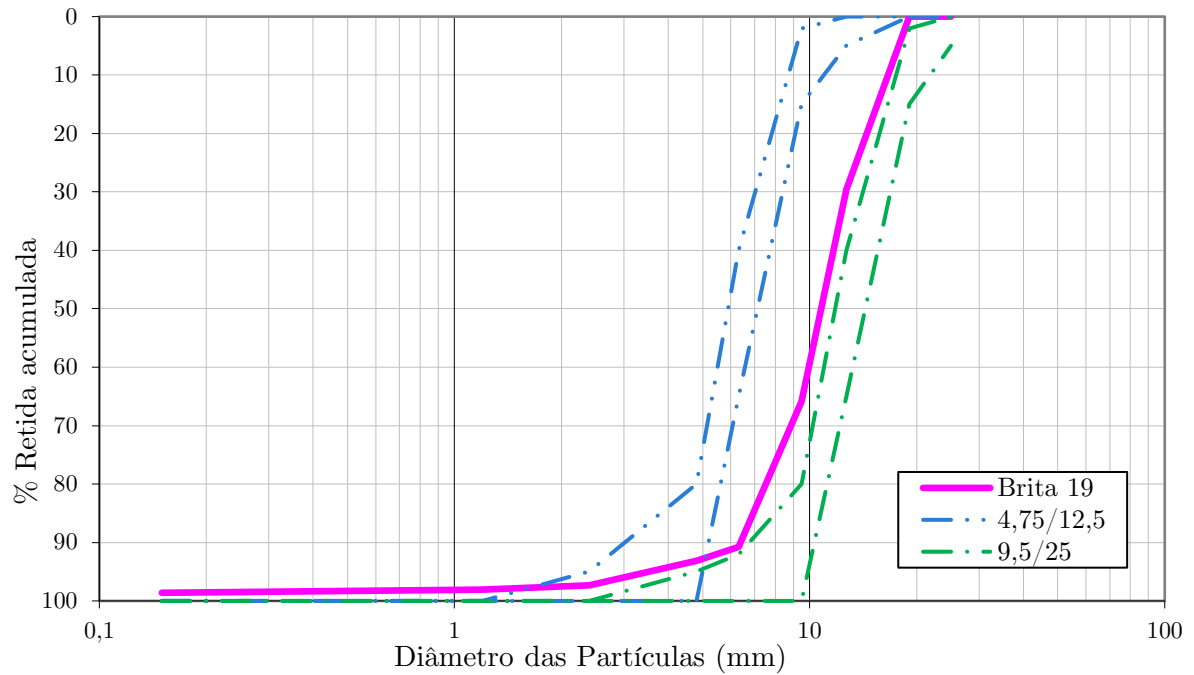
Tabela 3.8 – Análise granulométrica da brita (NBR NM 248 (ABNT, 2003))

Peneiras ASTM	Peneiras (mm)	% Retida	% Retida acumulada
3/4"	19,00	0,00	0,00
1/2"	12,50	29,58	29,58
3/8"	9,50	36,28	65,86
1/4"	6,30	24,91	90,77
4	4,75	2,37	93,14
8	2,36	4,21	97,34
16	1,18	0,70	98,05
30	0,60	0,24	98,29
50	0,30	0,11	98,39
100	0,15	0,22	98,61
Fundo	Fundo	1,39	100,00

Dimensão máxima característica ($D_{máx}$) = 19,00 mm

Módulo de finura (MF) = 5,838

Fonte: O autor

Figura 3.2 – Curva de distribuição granulométrica da brita

Fonte: O autor

3.1.4 Pó de quartzo

Para a confecção do UHPC foi utilizado pó de quartzo comercializado pela empresa Mineração Jundu Ltda. com o nome Sílica Moída # 325 – E 35, com diâmetro menor ou igual a 0,045 mm, com produção realizada na unidade industrial de Analândia, estado de São Paulo. A empresa forneceu o boletim técnico com as análises granulométrica e química apresentadas na Tabela 3.9 e na Tabela 3.10.

Tabela 3.9 – Análise química do pó de quartzo

% Fe_2O_3	% Al_2O_3	% TiO_2	% SiO_2	% Perda ao fogo	% Teor de umidade
0,045	0,230	0,028	99,680	0,110	0,100

Fonte: Mineração Jundu (2021a)

Tabela 3.10 – Análise granulométrica do pó de quartzo

Peneiras ASTM	Abertura (mm)	% Retida	% Retida acumulada
325	0,045	7,60	7,60
< 325	< 0,045	92,40	100,00

Fonte: Mineração Jundu (2021a)

3.1.5 Sílica ativa

A sílica ativa utilizada na confecção do UHPC é comercializada pela empresa *Elkem Materials South America* Ltda com o nome *Elkem Microsílica 920U*, do tipo não densificada, com produção realizada na região de Diadema, estado de São Paulo. As propriedades físicas, a análise química e granulométrica do material, foram fornecidas pela empresa em boletim técnico e estão apresentadas na Tabela 3.11, Tabela 3.12 e na Figura 3.3.

Tabela 3.11 – Propriedades físicas da sílica ativa

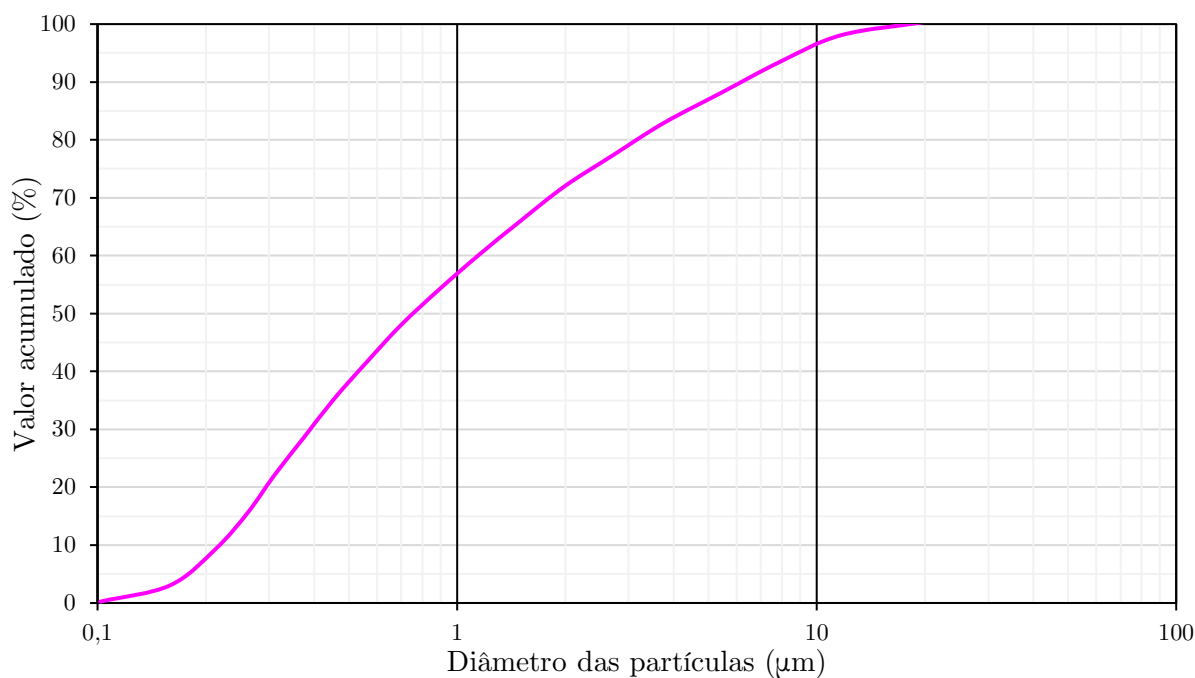
Característica	Resultado
Massa específica	2250,00 kg/m ³
Superfície específica	24700,00 m ² /kg
Partículas com diâmetro $\geq 450 \mu\text{m}$	< 10,00%
Índice de atividade pozolânica	> 105,00%

Fonte: *Elkem Materials South America* (2020)

Tabela 3.12 – Análise química da sílica ativa

% SiO ₂	% Al ₂ O ₃	% Fe ₂ O ₃	% CaO	% SrO	% K ₂ O	% Na ₂ O	% Perda ao fogo	% Teor de umidade
94,100	<0,200	<0,500	<0,200	<0,200	1,660	0,610	3,600	<3,000

Fonte: *Elkem Materials South America* (2020)

Figura 3.3 – Curva de distribuição granulométrica da sílica ativa

Fonte: Adaptado de Elkem *Materials South America* (2020)

3.1.6 Água

Para a confecção dos concretos e do UHPC foi utilizada água potável com origem do abastecimento local da região de Maringá, estado do Paraná.

3.1.7 Aditivos

Para a confecção dos concretos C25 e C45 foi utilizado o aditivo plastificante CEMIX do fabricante Vedacit, composto por lignosulfonatos e isento de cloretos, com dosagem recomendada entre 0,20% e 0,30% sobre a massa de cimento. As demais propriedades, fornecidas em boletim técnico pelo fabricante podem ser verificadas na Tabela 3.13.

Para a confecção do concreto C60 e do UHPC foi utilizado o aditivo superplastificante ADVA 458 do fabricante GCP Brasil Indústria e Comércio de Produtos Químicos Ltda., produzido na região de Sorocaba, estado de São Paulo, composto por policarboxilatos e isento de cloretos, com dosagem recomendada entre

0,40% e 1,00% sobre a massa de cimento. As propriedades do aditivo podem ser observadas na Tabela 3.14.

Tabela 3.13 – Propriedades do aditivo plastificante CEMIX

Característica	Resultado
Cor	Marrom
pH	8,00
Massa específica	1,22 g/cm ³

Fonte: Vedacit (2018)

Tabela 3.14 – Propriedades do aditivo superplastificante ADVA 458

Característica	Resultado
Cor	Âmbar a marrom
pH	4,00 – 6,00
Massa específica	1,075 – 1,115 g/cm ³
Teor de sólidos	45,13 – 49,88 %

Fonte: GCP *Applied Technologies* (2020)

3.2 DOSAGEM DOS CONCRETOS E DO UHPC

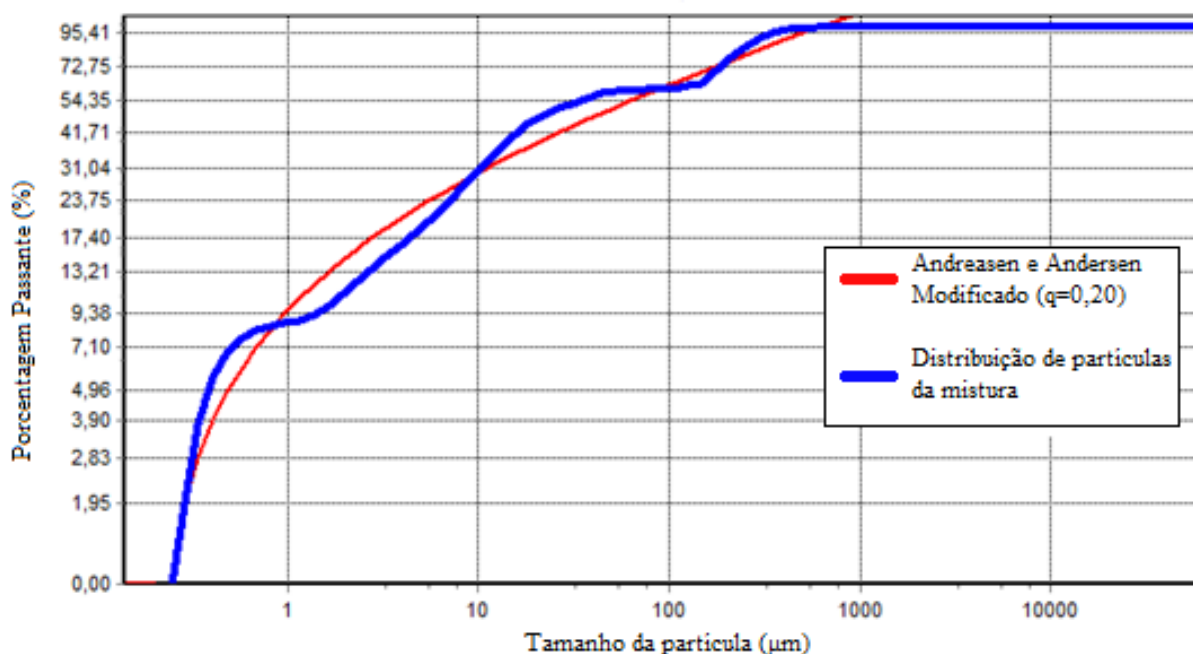
Para este estudo foram utilizadas três classes de concretos para a confecção dos substratos e respectivos reparos (C25, C45 e C60).

Os traços foram definidos utilizando o método de dosagem para concretos com materiais da região noroeste paranaense, apresentados na pesquisa de Assunção (2002). Para definição das composições foram utilizadas as curvas para concreto com brita com dimensão máxima característica de 19 mm e areia fina com abatimento (*slump*) de 60 ± 10 mm. Porém, vale ressaltar que os valores obtidos nas curvas foram adaptados para se adequarem aos materiais utilizados no presente estudo, agregado graúdo

($D_{m\acute{a}x}=19,10$ mm), cimento Portland (CP) V-ARI, plastificante CEMIX e superplastificante ADVA 458. Além disso, houve adaptação para alcançar um abatimento de 80 ± 20 mm de modo a facilitar a confecção dos modelos.

O traço de UHPC foi selecionado com base nos estudos de Silva (2021), onde com os mesmos materiais utilizados no presente trabalho foram pesquisadas diversas composições através do Método de Empacotamento de Partículas sugerido por Andreasen e Andersen (1930) e modificado posteriormente por Funk e Dinger (1994), conhecido na literatura como Modelo de Andreasen e Andersen Modificado. Para o emprego do método foi utilizado o software *EMMA Elkem Material Mix Analyzer* © Elkem AS 2012, versão 3.5.2.11, como pode ser observado na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Composição do UHPC através do Modelo de Andreasen e Andersen Modificado



Fonte: O autor

Os respectivos traços e consumos dos concretos e UHPC estão apresentados na Tabela 3.15 e na Tabela 3.16, respectivamente.

Tabela 3.15 – Traços utilizados em massa

Material	Concreto C25	Concreto C45	Concreto C60	UHPC
Cimento	1,000	1,000	1,000	1,000
Areia I	2,813	1,828	1,524	–
Areia II	–	–	–	1,100
Brita	3,664	2,717	2,150	–
Pó de quartzo	–	–	–	0,500
Sílica ativa	–	–	–	0,250
Água	0,640	0,430	0,340	0,230
Aditivo plastificante	0,004	0,005	–	–
Aditivo superplastificante	–	–	0,003	0,030

Fonte: O autor

Tabela 3.16 – Consumo de materiais dos traços utilizados (kg/m³)

Material	Concreto C25	Concreto C45	Concreto C60	UHPC
Cimento	302,88	418,06	502,74	769,90
Areia I	851,99	764,22	766,18	–
Areia II	–	–	–	846,89
Brita	1109,74	1135,88	1080,90	–
Pó de quartzo	–	–	–	384,95
Sílica ativa	–	–	–	192,48
Água	193,84	179,77	170,93	177,08
Aditivo plastificante	1,21	2,09	–	–
Aditivo superplastificante	–	–	1,51	23,10

Fonte: O autor

3.3 PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

Para a produção dos concretos, foram atendidos os requisitos de qualidade, sendo para isso, realizada a mistura mecânica em betoneira. A mistura foi realizada na seguinte ordem:

- i. Adicionar o agregado graúdo;
- ii. Colocar parte da água de amassamento e misturar por aproximadamente 1 minuto;
- iii. Adicionar o cimento Portland e misturar por aproximadamente 3 minutos;
- iv. Adicionar a areia;
- v. Adicionar mais uma parte da água;
- vi. Diluir o aditivo no restante da água e adicionar em pequenas doses na mistura homogeneizada e misturar por aproximadamente 3 minutos.

O aspecto final dos concretos no estado fresco pode ser visto na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Aspecto final dos concretos no estado fresco



Fonte: O autor

Os concretos foram adensados nas formas cilíndricas conforme a recomendação da NBR 5739 (ABNT, 2018c), com o auxílio de haste metálica. Já nas fôrmas de madeira (investigação da ligação), os concretos foram adensados com o auxílio de vibrador de imersão.

Após a produção dos concretos na betoneira, antes da concretagem dos modelos, foram realizados os ensaios de Abatimento do tronco de cone (*slump test*), de acordo com a NBR 16889 (ABNT, 2020), ilustrado na Figura 3.6.

Figura 3.6 – Ensaio de abatimento do tronco de cone (*slump test*) dos concretos



(a) Execução de 3 camadas de 25 golpes

(b) Alisamento do topo e retirada do cone

(c) Medição do abatimento (*slump*)

Fonte: O autor

3.4 PRODUÇÃO DO UHPC

A produção do UHPC foi realizada em duas fases distintas. O UHPC da Fase I foi produzido em menor volume com a utilização de misturador de alta eficiência com o objetivo de validar o traço selecionado, assim como realizar adaptações para a produção da próxima fase. Na Fase II, o UHPC foi produzido em maior volume com a utilização de misturador de baixa eficiência (betoneira de eixo horizontal), para a confecção dos reparos dos modelos estudados, conforme discorrido a seguir.

3.4.1 Produção do UHPC em argamassadeira (Fase I)

A produção do UHPC é comumente realizada através de misturador de alta eficiência, sendo que a maioria das pesquisas se utilizam argamassadeiras. No presente estudo foi necessária a produção inicial do UHPC em misturador planetário (argamassadeira) para validação da composição e realização de adaptações para a produção em grande volume, posteriormente realizada em betoneira de eixo horizontal, conforme detalhado no item 3.4.2.

Baseado nos procedimentos sugeridos por Vanderlei (2004), adaptando-os a capacidade do misturador e as condições dos materiais disponíveis, a produção do UHPC para os testes iniciais foi realizada conforme seguintes os passos:

- i. Colocar todo o material seco em saco plástico e misturá-lo manualmente até que a mistura fique com aparência homogênea, por aproximadamente 2 minutos, conforme a Figura 3.7;
- ii. Despejar os materiais secos no misturador planetário de capacidade igual a 1,4 litros e manter em máxima velocidade durante 5 minutos. Considerando que durante a rotação uma grande quantidade de pós era lançada para fora do misturador, optou-se por envolvê-lo com saco plástico, conforme a Figura 3.8;
- iii. Com o misturador em velocidade lenta, adicionar o superplastificante e a água separadamente, esse processo dura em torno de 2 minutos, conforme a Figura 3.9 e Figura 3.10
- iv. Manter o misturador em velocidade máxima até que o material esteja com a consistência desejada para moldagem, esse tempo variou entre 3 e 5 minutos. A consistência ideal do UHPC é aquele em que o material, no momento da moldagem, atravessa o saco de confeiteiro sob pressão manual sem grandes dificuldades, conforme a Figura 3.11.

Figura 3.7 – Mistura manual dos materiais secos



(a) Materiais secos em saco plástico



(b) Mistura manual dos materiais

Fonte: O autor

Figura 3.8 – Mistura dos materiais secos em misturador planetário



(a) Materiais secos no misturador planetário



(b) Envolvimento do misturador com saco plástico

Fonte: O autor

Figura 3.9 – Adição de superplastificante a mistura de UHPC



Fonte: O autor

Figura 3.10 – Adição de água a mistura de UHPC



Fonte: O autor

A moldagem dos corpos de prova para caracterização do UHPC foi realizada através de saco de confeiteiro, exercendo pressão manual, de forma a diminuir a incorporação de vazios e ar na mistura, conforme a Figura 3.11. No entanto, não houve adensamento do UHPC nas fôrmas cilíndricas, visto que sua consistência foi semelhante à de um concreto fluido.

Figura 3.11 – Moldagem de corpos de prova com saco de confeiteiro



Fonte: O autor

3.4.2 Produção do UHPC em betoneira de eixo horizontal (Fase II)

A produção do UHPC para a confecção dos modelos de análise de ligação entre concretos, foi realizada de forma atípica, pois para esta classe de material é comumente utilizado um misturador de alta eficiência. Neste trabalho, no entanto, devido a necessidade de grande volume de UHPC e limitação de equipamentos, optou-se por utilizar um misturador de baixa eficiência, a mesma betoneira de eixo horizontal utilizada para produção dos demais concretos. Para isso, foram realizados diversos testes e adaptações de métodos de produção do UHPC, resultando no seguinte procedimento padrão:

- i. Efetuar a mistura por 5 minutos de todo o material seco utilizando até que fiquem dispersos e aparentando estar homogêneo. Para que o material não disperse ao ar, coloca-se uma lona plástica na abertura da betoneira, conforme a Figura 3.12 (a) e (b);
- ii. Adicionar a água em pequenas doses, deixando um pouco da quantidade para limpeza do recipiente do aditivo. O tempo para colocação da água dura aproximadamente 2 minutos. Em seguida, vedar a betoneira e misturar por mais 10 minutos, conforme a Figura 3.12 (c) e (d);

- iii. Adicionar o aditivo superplastificante em pequenas doses na mistura homogeneizada, efetuando a limpeza do recipiente com o restante da água. O tempo para colocação do aditivo dura aproximadamente 2 minutos. Na sequência, vedar a betoneira e misturar por mais 20 minutos, conforme a Figura 3.12 (e) e (f);
- iv. Após isso, retira-se a lona e observa-se o material até atingir a consistência desejada. Esta etapa deve durar aproximadamente 5 minutos, conforme a Figura 3.12 (g), (h), (i), (j), (k) e (l).

Figura 3.12 – Etapas de preparo do UHPC



(a) Etapa 1: Mistura de materiais secos por 5 minutos



(b) Vedação da betoneira com lona plástica



(c) Etapa 2: Mistura com água com duração de aproximadamente 2 minutos



(d) Aspecto do UHPC após 10 minutos da mistura com água



(e) Etapa 3: Mistura com o aditivo superplastificante com duração de aproximadamente 2 minutos



(f) Aspecto do UHPC após 20 minutos da mistura com superplastificante



(g) Etapa 4: Mistura do UHPC até atingir a consistência desejada



(h) Etapa 4: Evolução do aspecto do UHPC até atingir a consistência desejada



(i) Etapa 4: Evolução do aspecto do UHPC até atingir a consistência desejada



(j) Etapa 4: Consistência desejada do UHPC, após aproximadamente 5 minutos de mistura



(k) Consistência desejada do UHPC

(l) Consistência desejada do UHPC

Fonte: O autor

Após a produção do UHPC na betoneira, antes da concretagem dos modelos, foi realizado o ensaio de Espalhamento (*spread*), adaptando o ensaio de Abatimento de tronco de cone (*slump test*), de acordo com a NBR 16889 (ABNT, 2020), medindo o diâmetro da mistura na configuração final, conforme ilustrado na Figura 3.13.

Figura 3.13 – Adaptação do ensaio de Abatimento do tronco de cone (*Slump test*) para o UHPC



(a) Execução de 3 camadas de 25 golpes

(b) Alisamento do topo e retirada do cone

(c) Medição do espalhamento (*spread*)

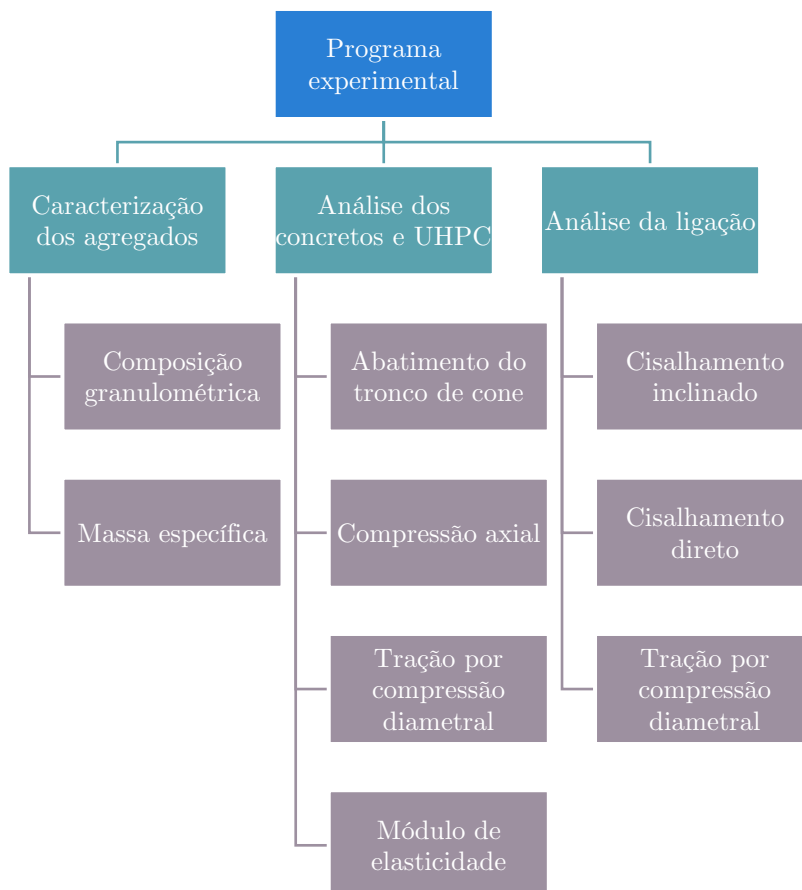
Fonte: O autor

3.5 INVESTIGAÇÃO DA LIGAÇÃO ENTRE UHPC E OS CONCRETOS

A primeira parte do programa experimental refere-se à caracterização dos concretos de resistência normal e de alta resistência e do UHPC com relação às suas propriedades mecânicas, onde foram realizados os ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade. Para os concretos, os ensaios foram realizados nas idades de 28 dias e 56 dias. Para o UHPC, foram realizados os ensaios aos 28 dias, conforme a Figura 3.14 e o Quadro 3.2.

A segunda parte do programa experimental refere-se a análise da ligação, onde foram realizados os ensaios de resistência ao cisalhamento inclinado (*Slant Shear*), resistência ao cisalhamento direto (*Bi-surface Shear*) e resistência à tração por compressão diametral. Maiores detalhes estão apresentados na Figura 3.14 e no Quadro 3.2.

Figura 3.14 – Organograma do Programa Experimental



Quadro 3.2 – Detalhes dos ensaios a serem realizados

Finalidade	Ensaio	Referência	Corpo de prova	Idade (dias)	Número de corpos de prova
Caracterização dos concretos e UHPC	Abatimento do tronco de cone (<i>Slump test</i>)	NBR 16889 (ABNT, 2020)	Tronco de cone Cilíndrico Ø200 x Ø100 x 300 mm	–	–
	Compressão axial	NBR 5739 (ABNT, 2018c) NBR 7215 (ABNT, 2019)	Cilíndrico Ø100 x 200 mm (NSC/HSC)	28 e 56	3
			Cilíndrico Ø50 x 100 mm (UHPC)	7 e 28	6
	Tração por compressão diametral	NBR 7222 (ABNT, 2011)	Cilíndrico Ø100 x 200 mm (NSC/HSC)	28	3
			Cilíndrico Ø50 x 100 mm (UHPC)	28	6
	Módulo de elasticidade	NBR 8522 (ABNT, 2017)	Cilíndrico Ø100 x 200 mm (NSC/HSC)	28	3
Cilíndrico Ø50 x 100 mm (UHPC)			28	6	
Ligação	Cisalhamento inclinado (<i>Slant Shear</i>)	Adaptação da C882 (ASTM, 2013b)	Prismático 100 x 100 x 300 mm	56	4
	Cisalhamento direto (<i>Bi-surface Shear</i>)	Momayez <i>et al.</i> (2005)	Cúbico 150 x 150 x 150 mm	56	4
	Tração por compressão diametral	Adaptação da NBR 7222 (ABNT, 2011)	Cilíndrico Ø100 x 200 mm	56	4

Legenda: NSC: Concreto classe C25 e C45; HSC: Concreto classe C60; UHPC: Concreto de ultra-alto desempenho.

Fonte: O autor

A nomenclatura e especificações dos modelos adotados podem ser verificados no item 3.5.2. Para a confecção desses modelos, foram realizados os seguintes procedimentos, que também estão condensados no fluxograma da Figura 3.15:

- i. Para os modelos monolíticos, foram concretados de forma completa os corpos de prova com os concretos C25, C45 e C60, conforme a Figura 3.16 e Figura 3.17;
- ii. Após 28 dias de cura em câmara úmida dos modelos monolíticos, foram realizados os ensaios de caracterização citados anteriormente;

- iii. Após 56 dias de cura em câmara úmida dos modelos monolíticos, foram realizados os ensaios de investigação da ligação citados anteriormente;
- iv. Para os modelos com ligação entre concretos, foi concretado metade dos corpos de prova com os materiais do substrato (C25, C45 e C60), conforme a Figura 3.18 e Figura 3.20;
- v. Após 21 dias de cura do substrato em câmara úmida, os modelos foram retirados da câmara úmida para cura ao ar em temperatura ambiente durante 6 dias;
- vi. Após 6 dias de cura do substrato ao ar em temperatura ambiente, foi realizado o tratamento da superfície com escova de aço e aplicada as condições de umedecimento, conforme a Figura 3.26;
- vii. Após 24 horas das condições de umedecimento, foi concretada a metade restante do corpo de prova com os materiais de reparo, sendo o próprio material do substrato (C25, C45, C60 ou UHPC), conforme a Figura 3.21 e Figura 3.22. Os corpos de prova foram envolvidos com saco plástico, para que não houvesse influência externa no processo de cura do reparo, e colocados novamente em câmara úmida até a data final de cura, conforme a Figura 3.23. Ainda nessa etapa, foram moldados corpos de prova para a caracterização do UHPC, eles tiveram 28 dias de cura em câmara úmida, de acordo com a Figura 3.24;
- viii. Após 56 dias de cura do material do substrato e 28 dias do material de reparo, foram realizados os ensaios de investigação da ligação citados anteriormente.

Os concretos foram adensados nas formas cilíndricas através da recomendação da NBR 5739 (ABNT, 2018c), com o auxílio de haste metálica. Já nas fôrmas de madeira (investigação da ligação), os concretos foram adensados com o auxílio de vibrador, conforme a Figura 3.19. Para o UHPC, não houve adensamento nas fôrmas, visto que sua consistência foi semelhante à de um concreto fluido, conforme a Figura 3.24.

Figura 3.15 – Fluxograma da análise experimental da ligação entre concretos

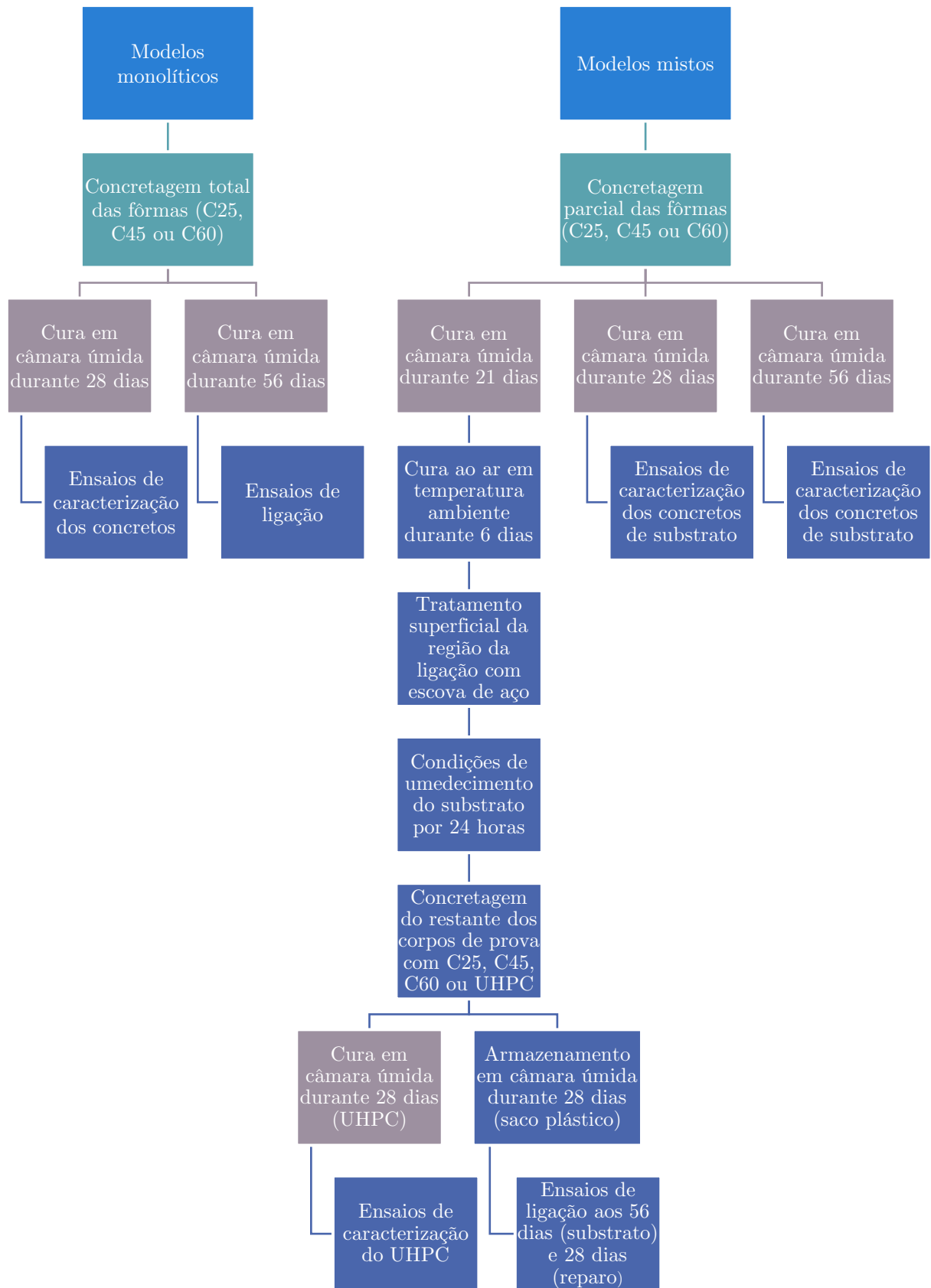


Figura 3.16 – Confeção de modelos monolíticos



(a) Fôrmas vazias

(b) Fôrmas concretadas

Fonte: O autor

Figura 3.17 – Aspecto final dos corpos de prova dos modelos monolíticos



Fonte: O autor

Figura 3.18 – Fôrmas com moldes de madeira para confecção de modelos mistos



Fonte: O autor

Figura 3.19 – Adensamento de concretos nas fôrmas



(a) Adensamento nas fôrmas de madeira com auxílio de vibrador

(b) Adensamento nas fôrmas cilíndricas com haste metálica

Fonte: O autor

Figura 3.20 – Aspecto final dos corpos de prova dos modelos mistos



Fonte: O autor

Figura 3.21 – Confeção de reparos

(a) Fôrmas com os corpos de prova parciais



(b) Concretagem dos reparos (nesta foto, UHPC)



(c) Alisamento da superfície



(d) Aplicação de plástico filme na superfície

Fonte: O autor

Figura 3.22 – Aspecto final dos corpos de prova dos modelos mistos com respectivos reparos

Fonte: O autor

Figura 3.23 – Armazenamento e condições de cura final dos modelos com reparos



(a) Envolvimento com saco plástico

(b) Armazenamento em câmara úmida até a data final do ensaio

Fonte: O autor

Figura 3.24 – Concretagem de fôrmas cilíndricas para a caracterização do UHPC



(a) Utilização de saco de confeiteiro

(b) Fôrmas cilíndricas com UHPC

Fonte: O autor

3.5.1 Parâmetros avaliados

O objetivo dos ensaios experimentais de investigação da ligação foi verificar a influência da resistência à compressão do material do substrato e suas condições de umedecimento na resistência e no modo de ruptura da ligação em diferentes cenários de carregamento.

3.5.1.1 Tratamento superficial do substrato

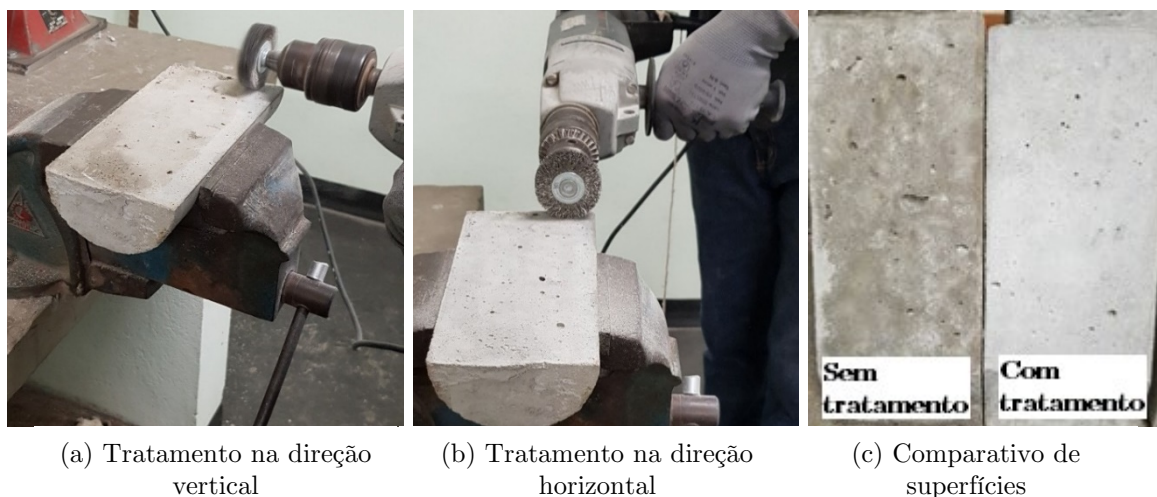
O parâmetro de tratamento superficial do substrato foi fixado, não sendo o foco do presente estudo. Em todas as amostras foi realizada a escovação do substrato na região da ligação com o auxílio de uma furadeira elétrica, modelo com 625 W e 400 RPM/min, e uma escova com cerdas de aço inoxidável, modelo 50x0,2 mm, ambos da marca Bosch, conforme a Figura 3.25. Esse tratamento foi realizado 7 dias antes da concretagem dos reparos, nas direções vertical e horizontal por aproximadamente 2 minutos, visando retirar impurezas indesejáveis, sem exposição dos agregados, conforme a Figura 3.26, assim como pode ser observada a comparação entre o substrato sem tratamento e com escovação.

Figura 3.25 – Equipamentos utilizados para o tratamento da superfície dos modelos mistos



Fonte: O autor

Figura 3.26 – Tratamento superficial dos modelos mistos



(a) Tratamento na direção vertical

(b) Tratamento na direção horizontal

(c) Comparativo de superfícies

Fonte: O autor

Esse procedimento foi realizado de forma semelhante nos estudos de Carbonell Muñoz (2012) e Carbonell Muñoz *et al.* (2014), que concluíram que um simples tratamento que remova poeira e detritos do substrato, pode ser suficiente para que se obtenha uma excelente ligação entre NSC e UHPC, desde que o substrato tenha a condição de umedecimento saturada.

3.5.1.2 Condições de umedecimento do substrato

As condições de umedecimento adotadas no presente estudo foram de substrato seco ao ar com superfície seca (ASD) e substrato saturado com superfície seca (SSD). Para a condição ASD os corpos de prova foram retirados da câmara úmida 7 dias antes da realização dos ensaios, permanecendo em local com temperatura ambiente, conforme a Figura 3.27 (a). Já para a condição SSD, da mesma forma, os corpos de prova foram retirados 7 dias antes da realização da concretagem, foram submersos em tanque com água nas últimas 24 horas precedentes aos ensaios, conforme a Figura 3.27 (b), e foram superficialmente secos com toalha de algodão, conforme a Figura 3.28.

Figura 3.27 – Condições de umedecimento da superfície dos substratos dos modelos mistos



(a) Corpos de prova para os modelos com substrato ASD

(b) Corpos de prova para os modelos com substrato SSD

Fonte: O autor

Figura 3.28 – Secagem da superfície dos substratos saturados

(a) Secagem com toalha de algodão

(b) Antes da secagem

(c) Após a secagem

Fonte: O autor

3.5.1.3 Resistência mecânica do substrato

Outro parâmetro analisado no presente trabalho foi a variação da resistência mecânica do substrato. Conforme apresentado no item 3.2, foram produzidos dois concretos de resistência normal, classes C25 e C45, e um concreto de alta resistência classe C60.

3.5.1.4 Resistência mecânica do reparo

O último parâmetro estudado foi a variação da resistência mecânica do reparo, sendo utilizado concretos de resistência normal e alta resistência com classes iguais aos do substrato (C25, C45 e C60) e UHPC.

3.5.2 Nomenclatura dos modelos

Os modelos utilizados foram identificados no formato X-Y-Z, onde X refere-se às condições de umidade do substrato, podendo ser substrato seco ao ar com superfície seca (ASD) ou substrato saturado com superfície seca (SSD); Y refere-se ao material utilizado na confecção do substrato, sendo realizados em três classes: C25, C45 e C60; e por fim, Z refere-se ao material utilizado como reparo, podendo ser o modelo monolítico, o modelo de referência com o reparo com o próprio material do substrato

ou o reparo com o concreto de ultra-alto desempenho (UHPC), conforme indicado no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Nomenclatura dos modelos utilizados

Número	Nomenclatura	Descrição
1	C25	Modelo monolítico de concreto C25
2	ASD-C25-C25	Modelo de ligação entre concretos C25 com substrato seco ao ar e superfície seca
3	ASD-C25-UHPC	Modelo de ligação entre concreto C25 e UHPC com substrato seco ao ar e superfície seca
4	SSD-C25-C25	Modelo de ligação entre concretos C25 com substrato saturado e superfície seca
5	SSD-C25-UHPC	Modelo de ligação entre concreto C25 e UHPC com substrato saturado e superfície seca
6	C45	Modelo monolítico de concreto C45
7	ASD-C45-C45	Modelo de ligação entre concretos C45 com substrato seco ao ar e superfície seca
8	ASD-C45-UHPC	Modelo de ligação entre concreto C45 e UHPC com substrato seco ao ar e superfície seca
9	SSD-C45-C45	Modelo de ligação entre concretos C45 com substrato saturado e superfície seca
10	SSD-C45-UHPC	Modelo de ligação entre concreto C45 e UHPC com substrato saturado e superfície seca
11	C60	Modelo monolítico de concreto C60
12	ASD-C60-C60	Modelo de ligação entre concretos C60 com substrato seco ao ar e superfície seca
13	ASD-C60-UHPC	Modelo de ligação entre concreto C60 e UHPC com substrato seco ao ar e superfície seca
14	SSD-C60-C60	Modelo de ligação entre concretos C60 com substrato saturado e superfície seca
15	SSD-C60-UHPC	Modelo de ligação entre concreto C60 e UHPC com substrato saturado e superfície seca

Legenda: ASD: Substrato seco ao ar com superfície seca (*Air Surface Dry*); SSD: Substrato saturado com superfície seca (*Saturated Surface Dry*); C25: Concreto C25; C45: Concreto C45; C60: Concreto C60; UHPC: Concreto de ultra-alto desempenho.

Fonte: O autor

3.5.3 Resistência da ligação por cisalhamento inclinado (*Slant Shear*)

O ensaio de resistência da ligação por cisalhamento inclinado foi realizado conforme a norma técnica C882 (ASTM, 2013b), ilustrado na Figura 3.29. Embora a norma recomende corpos de prova cilíndricos com 75 mm de diâmetro e 150 mm de altura, foram adotados corpos de prova no formato prismático com seção transversal quadrada de 100 x 100 mm e com altura de 300 mm, também utilizado nas pesquisas de Abo Sabah *et al.* (2019); Mansour e Fayed (2021); Tayeh *et al.* (2012); Tayeh, Abu Bakar e Megat Johari (2013); Youm *et al.* (2018); e Zhang, Yang; Zhu; Liao *et al.* (2020).

A superfície da ligação entre os concretos forma um ângulo de 30° com o eixo longitudinal (sentido de atuação do carregamento), de forma que no ensaio surjam a combinação de solicitações de compressão e cisalhamento na face estudada. Tais solicitações podem ser calculadas utilizando as equações a seguir:

$$f_n = \frac{P}{A_n} \text{ (MPa)} \quad (3.1)$$

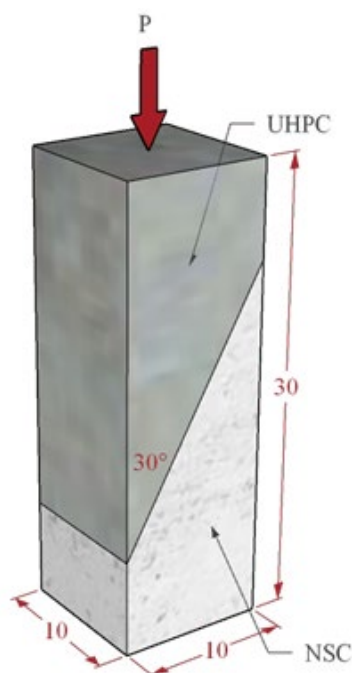
$$A_n = \frac{A}{\sin \alpha} \text{ (mm}^2\text{)} \quad (3.2)$$

$$\sigma_n = f_n \sin \alpha \text{ (MPa)} \quad (3.3)$$

$$\tau_n = f_n \cos \alpha \text{ (MPa)} \quad (3.4)$$

Em que f_n é a resistência da ligação por cisalhamento inclinado; σ_n e τ_n são respectivamente a tensão normal de compressão e tensão de cisalhamento que atuam no plano inclinado; P é a máxima carga obtida no ensaio; A é a área da seção transversal; A_n é a área da seção no plano inclinado; α é o ângulo entre o eixo longitudinal e a superfície de ligação, neste caso será de 30°.

Figura 3.29 – Ensaio de resistência da ligação por cisalhamento inclinado



Nota: Dimensões em cm.

Fonte: O autor

A taxa de carregamento adotada foi de 2,50 kN/s, valor também adotado nos estudos de Carbonell Muñoz (2012) e na norma técnica ASTM C39 (ASTM, 2018a).

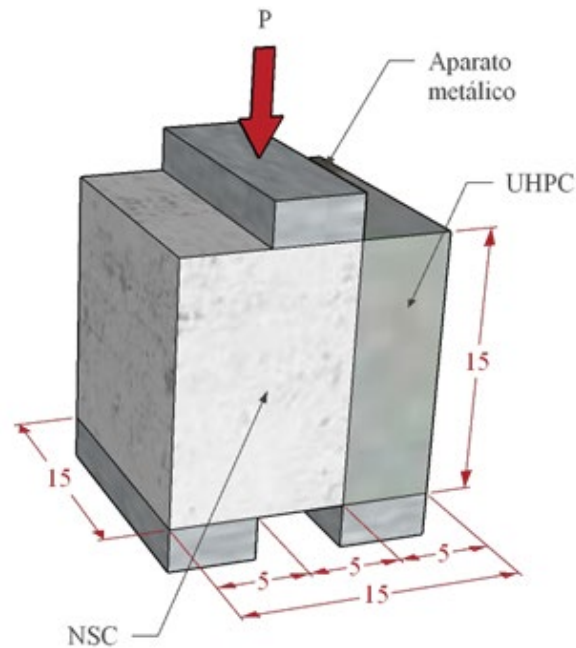
3.5.4 Resistência da ligação por cisalhamento direto (*Bi-surface Shear*)

O ensaio de resistência da ligação por cisalhamento direto (*bi-surface shear*) foi realizado conforme os padrões encontrados na pesquisas de Farzad, Shafieifar e Azizinamini (2019); Momayez *et al.* (2004); Semendary e Svecova (2020); e Valikhani *et al.* (2020), utilizando corpos de prova cúbicos com 150 mm, conforme a Figura 3.30. A resistência da ligação ao cisalhamento direto pode ser calculada pela Equação (3.5).

$$\tau_b = \frac{P}{2bh} \text{ (MPa)} \quad (3.5)$$

Em que τ_b é a resistência ao cisalhamento direto; P é a máxima carga obtida no ensaio; b é o comprimento do prisma; h é a altura do prisma.

Figura 3.30 – Ensaio de resistência da ligação por cisalhamento direto



Nota: Dimensões em cm.

Fonte: O autor

A taxa de carregamento adotada foi de 0,45 kN/s, valor próximo ao adotado nos estudos de Ju, Shen e Wang (2020).

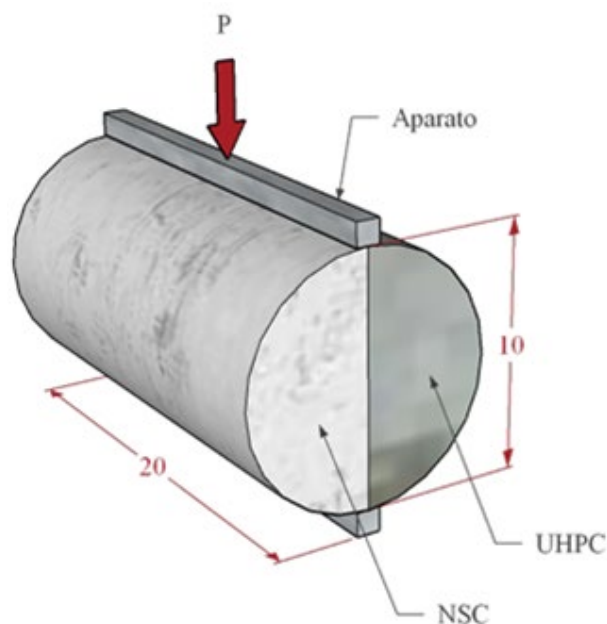
3.5.5 Resistência da ligação à tração por compressão diametral (*Splitting Tensile*)

O ensaio de resistência da ligação à tração por compressão diametral foi realizado seguindo as diretrizes da norma técnica NBR 7222 (ABNT, 2011), utilizando corpos de prova cilíndricos com 100 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento, conforme a Figura 3.31. A resistência da ligação pode ser calculada através da Equação (3.6).

$$f_{ct,sp} = \frac{2P}{\pi dl} \text{ (MPa)} \quad (3.6)$$

Em que $f_{ct,sp}$ é a resistência à tração por compressão diametral; P é a máxima carga obtida no ensaio; d é o diâmetro do corpo de prova; l é o comprimento do corpo de prova.

Figura 3.31 – Ensaio de resistência da ligação à tração por compressão diametral



Nota: Dimensões em cm.

Fonte: O autor

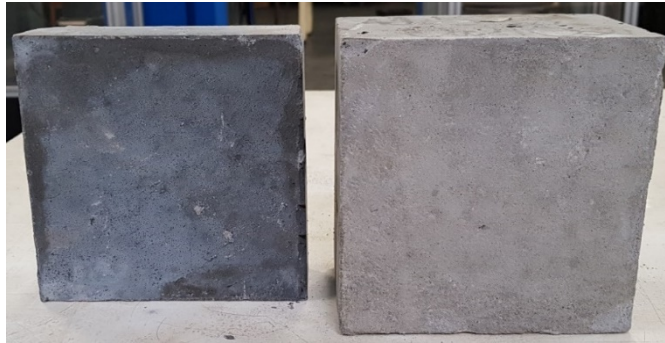
A taxa de carregamento adotada foi de 0,45 kN/s, valor também adotado nos estudos de Carbonell Muñoz (2012) e na norma técnica C496 (ASTM, 2017), diferentemente da taxa de carregamento de 0,05 MPa/s (1,57 kN/s), trazido pela NBR 7222 (ABNT, 2011).

3.5.6 Modos de ruptura

Ao realizar os ensaios de investigação da ligação entre concretos foram identificados os modos de ruptura dos modelos, como identificado a seguir:

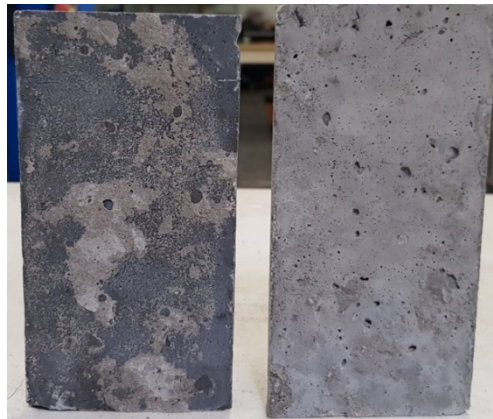
- i. Modo de ruptura A: Falha adesiva, acarretando a separação entre os materiais na região da interface, conforme a Figura 3.32;
- ii. Modo de ruptura B: Falha mista, ocorrendo a separação na interface com descolamento do substrato, conforme a Figura 3.33;
- iii. Modo de ruptura C: Falha coesiva, acontecendo a ruptura do substrato, conforme a Figura 3.34.

Figura 3.32 – Modo de ruptura A (falha adesiva)



Fonte: O autor

Figura 3.33 – Modo de ruptura B (falha mista)



Fonte: O autor

Figura 3.34 – Modo de ruptura C (falha coesiva)



Fonte: O autor

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais e da investigação da ligação entre concretos. Os resultados serão discutidos e comparados a outras pesquisas semelhantes. Ao final da seção serão traçadas as envoltórias de ruptura dos modelos experimentais e dos modelos teóricos sugeridos por normas e outras pesquisas.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS CONCRETOS E UHPC

Os resultados dos ensaios de caracterização dos concretos de resistência normal e de alta resistência, e ainda, dos concretos de ultra-alto desempenho estão apresentados nos itens a seguir.

4.1.1 Concretos

Nesta seção serão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização dos concretos de resistência normal e de alta resistência.

4.1.1.1 Consistência

Os resultados do ensaio de abatimento de tronco de cone realizado para os concretos estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de abatimento dos concretos

Concreto	<i>Slump</i> (mm)
C25	90,00
C45	75,00
C60	150,00

Fonte: O autor

Os valores de abatimento encontrados ficaram dentro da faixa planejada (80 ± 20 mm) para os concretos C25 e C45. No entanto, o concreto C60 apresentou valores acima do esperado, devido a utilização do aditivo superplastificante.

4.1.1.2 Resistência à compressão axial

Na Figura 4.1 pode-se observar as configurações dos ensaios de resistência à compressão axial realizados em concretos de resistência normal.

Figura 4.1 – Ensaio de resistência à compressão axial dos concretos

(a) Ensaio em concreto

(b) Ruptura em concreto

Fonte: O autor

Os resultados de resistência à compressão axial dos concretos estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial dos concretos

Concreto	Idade (dias)	Média f_{cj} (MPa)	sd f_{cj} (MPa)	COV (%)
C25	28	26,05	0,99	3,81
	56	27,33	0,99	3,61
C45	28	46,62	2,81	6,04
	56	47,91	1,56	3,25
C60	28	59,65	2,81	4,70
	56	61,58	1,61	2,62

Fonte: O autor

Os valores encontrados foram dentro do planejado para os concretos de resistência normal e alta resistência.

4.1.1.3 Resistência à tração por compressão diametral

Na Figura 4.2 pode-se observar as configurações dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral realizados em concretos de resistência normal e alta resistência.

Os resultados de resistência à tração por compressão diametral dos concretos estão apresentados na Tabela 4.3.

Os valores encontrados foram dentro do esperado para os concretos de resistência normal e alta resistência, sendo que, os valores ficaram muito próximos a resistência média à tração do concreto teórica f_{ctm} , abordada em normas técnicas como a fib *Model Code* 2010 (FIB, 2013) e a Eurocode 2 (CEN, 2004).

Figura 4.2 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral dos concretos

(a) Ensaio em concreto

(b) Ruptura em concreto

Fonte: O autor

Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral dos concretos

Concreto	Idade (dias)	Média $f_{ct,sp}$ (MPa)	sd $f_{ct,sp}$ (MPa)	COV (%)	$f_{ctm}^{(*)}$ (MPa)
C25	28	2,78	0,01	0,29	2,60
C45	28	3,83	0,10	2,73	3,80
C60	28	4,60	0,09	1,92	4,40

Nota: (*) Resistência à tração média do concreto (f_{ctm}) calculada conforme as normas técnicas fib *Model Code* 2010 (FIB, 2013) e Eurocode 2 (CEN, 2004).

Fonte: O autor

4.1.1.4 Módulo de elasticidade

Na Figura 4.3 pode-se observar as configurações dos ensaios de módulo de elasticidade realizados em concretos de resistência normal e alta resistência.

Os resultados de módulo de elasticidade dos concretos estão apresentados na Tabela 4.4. Os valores ficaram próximos aos resultados de módulo de elasticidade teórico do concreto E_c , abordado em normas técnicas como a fib *Model Code* 2010 (FIB, 2013) e a Eurocode 2 (CEN, 2004).

Figura 4.3 – Ensaio de módulo de elasticidade dos concretos

Fonte: O autor

Tabela 4.4 – Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade dos concretos

Concreto	Idade (dias)	Média E_{ci} (GPa)	sd E_{ci} (GPa)	COV (%)	E_c (*) (GPa)
C25	28	29,90	1,19	3,98	28,00
C45	28	32,87	1,35	4,10	34,50
C60	28	34,95	1,37	3,93	38,90

Nota: (*) Módulo de elasticidade do concreto (E_c) calculado conforme as normas técnicas fib *Model Code* 2010 (FIB, 2013) e Eurocode 2 (CEN, 2004).

Fonte: O autor

4.1.2 UHPC – Fase I

O UHPC – Fase I foi produzido em misturador planetário (argamassadeira) e suas características mecânicas estão apresentadas a seguir.

4.1.2.1 Resistência à compressão axial

Na Figura 4.4 pode-se observar as configurações dos ensaios de resistência à compressão axial realizados em concretos de ultra-alto desempenho.

Os resultados de resistência à compressão axial do UHPC – Fase I em diferentes idades estão apresentados na Tabela 4.5.

Figura 4.4 – Ensaio de resistência à compressão axial em UHPC



(a) Ensaio em UHPC

(b) Ruptura em UHPC

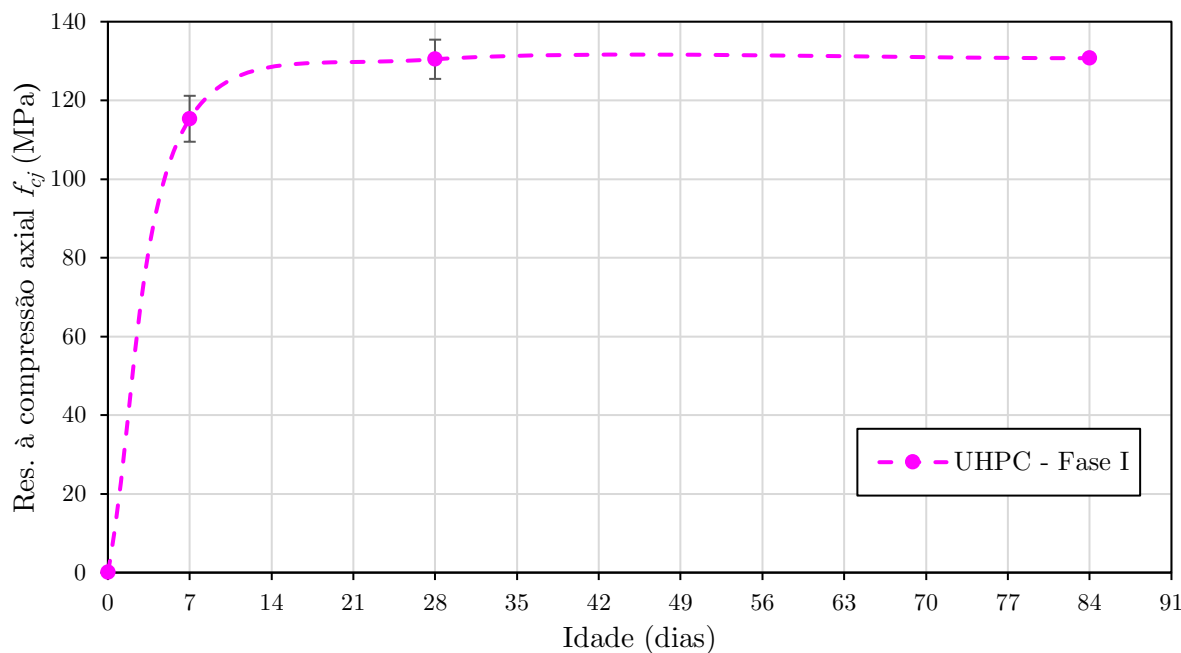
Fonte: O autor

Tabela 4.5 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial do UHPC – Fase I

Concreto	Idade (dias)	Média f_{cj} (MPa)	sd f_{cj} (MPa)	COV (%)
UHPC	7	115,33	5,84	5,06
	28	130,45	4,98	3,82
	84	130,73	0,19	0,15

Fonte: O autor

Os resultados apresentaram acima de 120 MPa aos 28 dias de cura, sem a utilização de fibras metálicas na mistura, classificando o material como ultra-alto desempenho, segundo as pesquisas de Graybeal (2007) e Hassan, Jones e Mahmud (2012). Na Figura 4.5 pode-se observar o comportamento da resistência à compressão axial do UHPC em relação a sua idade.

Figura 4.5 – Resistência à compressão axial do UHPC – Fase I

Fonte: O autor

Observa-se que a resistência mecânica do UHPC avança rapidamente nas primeiras idades, estabilizando-se em idades mais avançadas, após 28 dias de cura. Esse comportamento também foi observado na pesquisa de Vanderlei (2004) e Tayeh, Abu Bakar e Megat Johari (2013).

4.1.3 UHPC – Fase II

Na Fase II, o UHPC foi produzido em misturador de eixo horizontal (betoneira) e suas características mecânicas estão apresentadas a seguir.

4.1.3.1 Consistência

O resultado do ensaio de consistência do UHPC está apresentado na Tabela 4.6.

O valor encontrado foi inferior ao observado na literatura, que segundo as pesquisas de Akhnoukh e Buckhalter (2021), a média de valores de espalhamento (*spread*) para o UHPC varia entre 550 e 750 mm. No entanto, ressalta-se que não houve

dificuldades ao trabalhar com o material e que foi possível a moldagem dos corpos de prova sem necessidade de adensamento manual ou por vibração.

Tabela 4.6 – Resultados dos ensaios de espalhamento do UHPC – Fase II

Concreto	<i>Spread</i> (mm)
UHPC	450,00

Fonte: O autor

4.1.3.2 Resistência à compressão axial

Os resultados de resistência à compressão axial do UHPC – Fase II em diferentes idades estão apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial do UHPC – Fase II

Concreto	Idade (dias)	Média f_{cj} (MPa)	sd f_{cj} (MPa)	COV (%)
UHPC	7	106,42	9,52	8,95
	28	120,18	10,98	9,14

Fonte: O autor

Os resultados foram de 120 MPa aos 28 dias de cura, sem a utilização de fibras metálicas na mistura, atingido o valor mínimo recomendado para o UHPC pela literatura.

Com a produção do UHPC em misturador de baixa eficiência (betoneira de eixo horizontal) na Fase II, observou-se uma perda de 9% e 8% na resistência à compressão axial, aos 7 e 28 dias, respectivamente, em relação ao UHPC produzido na Fase I com misturador planetário de alta eficiência.

4.1.3.3 Resistência à tração por compressão diametral

Na Figura 4.6 pode-se observar as configurações dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral realizados em concretos de ultra-alto desempenho.

Figura 4.6 – Ensaio de resistência à tração por compressão diametral em UHPC



(a) Ensaio em UHPC

(b) Ruptura em UHPC

Fonte: O autor

O resultado de resistência à tração por compressão diametral do UHPC – Fase II está apresentado na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Resultado dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral do UHPC – Fase II

Concreto	Idade (dias)	Média $f_{ct,sp}$ (MPa)	sd $f_{ct,sp}$ (MPa)	COV (%)
UHPC	28	9,42	1,43	15,21

Fonte: O autor

O resultado encontra-se dentro da faixa observada na literatura, que segundo as pesquisas de Arora *et al.* (2019) é de 8 e 12 MPa.

4.1.3.4 Módulo de elasticidade

Na Figura 4.7 pode-se observar as configurações dos ensaios de módulo de elasticidade realizados em concretos de resistência normal.

Figura 4.7 – Ensaio de módulo de elasticidade em UHPC



Fonte: O autor

O resultado de módulo de elasticidade do UHPC – Fase II está apresentado na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Resultado dos ensaios de módulo de elasticidade do UHPC – Fase II

Concreto	Idade (dias)	Média E_{ci} (GPa)	sd E_{ci} (GPa)	COV (%)
UHPC	28	44,56	2,27	5,10

Fonte: O autor

O resultado encontra-se dentro da faixa observada na literatura, que segundo as pesquisas de Akhnoukh e Buckhalter (2021); Graybeal (2007); Habel *et al.* (2006); e Pourbaba *et al.* (2018), o valor médio do módulo de elasticidade do UHPC é de 45 GPa.

4.2 INVESTIGAÇÃO DA LIGAÇÃO NSC-NSC E NSC-UHPC

Os resultados dos ensaios para avaliação da ligação entre UHPC e concretos de resistência normal e alta resistência estão apresentados a seguir.

4.2.1 Resistência da ligação por cisalhamento inclinado (*Slant Shear*)

Na Figura 4.8 pode-se observar as configurações dos ensaios de resistência da ligação por cisalhamento inclinado em modelos monolíticos e mistos.

Figura 4.8 – Ensaio de resistência da ligação por cisalhamento inclinado



(a) Ensaio em modelo monolítico



(b) Ruptura em modelo monolítico



(c) Ensaio em modelo misto



(d) Ruptura em modelo misto

Fonte: O autor

Os resultados dos ensaios de cisalhamento inclinado para todos os modelos avaliados estão apresentados na Tabela 4.10.

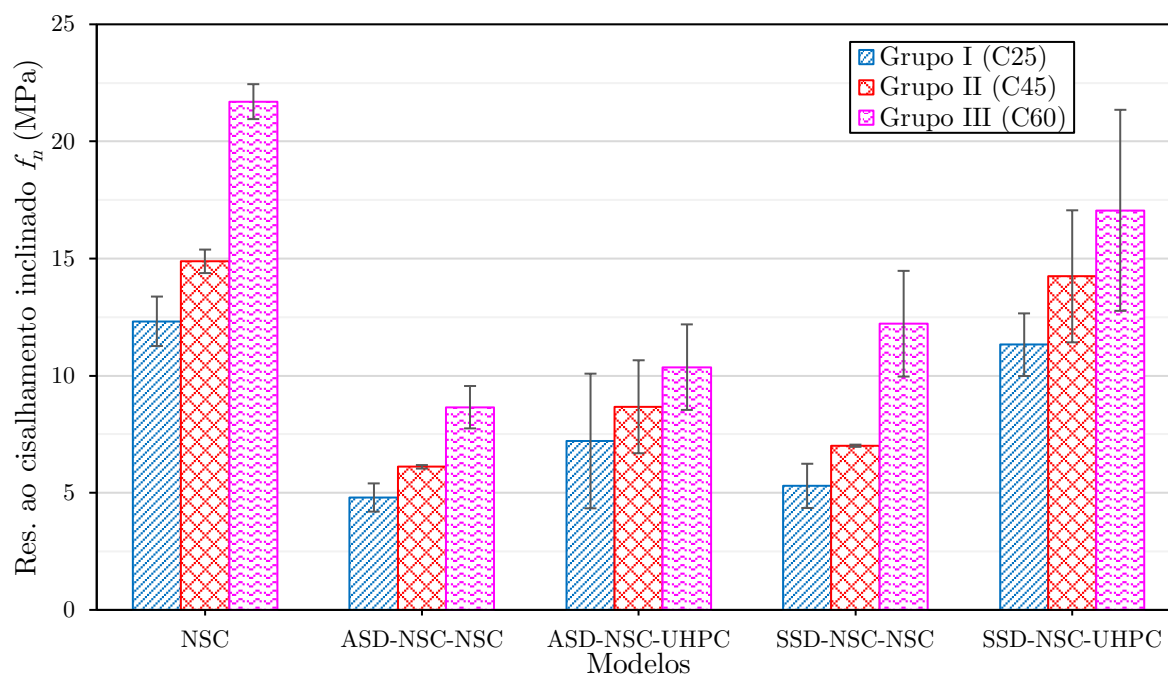
Tabela 4.10 – Resultados dos ensaios de cisalhamento inclinado

Modelo	Média f_n (MPa)	sd f_n (MPa)	Média σ_n (MPa)	sd σ_n (MPa)	Média τ_n (MPa)	sd τ_n (MPa)	COV (%)	Modo de ruptura
C25	12,32	1,06	6,16	0,53	10,67	0,91	8,57	–
ASD-C25-C25	4,80	0,60	2,40	0,30	4,16	0,52	12,56	A
ASD-C25-UHPC	7,21	2,87	3,61	1,44	6,25	2,49	39,85	A/B
SSD-C25-C25	5,30	0,94	2,65	0,47	4,59	0,82	17,84	A
SSD-C25-UHPC	11,32	1,34	5,66	0,67	9,81	1,16	11,80	B/A
C45	14,88	0,50	7,44	0,25	12,89	0,43	3,37	–
ASD-C45-C45	6,11	0,07	3,05	0,04	5,29	0,06	1,23	A
ASD-C45-UHPC	8,67	1,98	4,34	0,99	7,51	1,72	22,88	A/B
SSD-C45-C45	7,01	0,05	3,50	0,02	6,07	0,04	0,67	A
SSD-C45-UHPC	14,24	2,82	7,12	1,41	12,33	2,44	19,79	A/B/C
C60	21,70	0,75	10,85	0,37	18,79	0,65	3,44	–
ASD-C60-C60	8,65	0,90	4,33	0,45	7,49	0,78	10,46	A
ASD-C60-UHPC	10,36	1,83	5,18	0,91	8,98	1,58	17,62	A
SSD-C60-C60	12,22	2,25	6,11	1,13	10,58	1,95	18,45	A
SSD-C60-UHPC	17,06	4,29	8,53	2,15	14,77	3,72	25,15	B

Legenda: Modo de ruptura A: Falha adesiva, acarretando a separação entre os materiais na região da interface; Modo de ruptura B: Falha mista, ocorrendo a separação na interface com descolamento do substrato; Modo de ruptura C: Falha coesiva, acontecendo a ruptura do substrato.

Fonte: O autor

Na Figura 4.9 pode-se observar o comportamento geral dos resultados.

Figura 4.9 – Comportamento dos resultados dos ensaios de cisalhamento inclinado

Fonte: O autor

Percebe-se em todos os grupos, um aumento na resistência da ligação nos modelos com reparo em UHPC, independente de se utilizar as condições de umedecimento do substrato ASD ou SSD. Esse comportamento também foi observado em outras pesquisas, como de Farzad, Shafieifar e Azizinamini (2019) e Zhang, Yang; Zhu; Liao *et al.* (2020).

Com exceção do modelo ASD-C60-UHPC, quando utilizado UHPC como material de reparo foram observados em alguns corpos de prova os modos de ruptura B e C, acontecendo a falha de forma parcial ou total no concreto menos resistente da ligação. De forma geral, o UHPC além de contribuir na ligação por sua alta resistência à compressão, ainda demonstrou alta adesividade com o concreto de substrato.

De acordo com os resultados encontrados para cada modelo, pode-se classificar a ligação conforme os critérios da norma ACI 546.3R-14 (ACI, 2014) e da pesquisa de (SPRINKEL; OZYILDIRIM, 2000), conforme a Tabela 4.11. Esses parâmetros de classificação também foram adotados para avaliação da ligação entre concretos nas pesquisas de Aaleti e Sritharan (2017); Carbonell Muñoz *et al.* (2014); Harris, Sarkar e Ahlborn (2011); Mansour e Fayed (2021); e Zhang, Yang; Zhu; Liao *et al.* (2020).

Tabela 4.11 – Classificação da ligação de acordo com os resultados dos ensaios de cisalhamento inclinado

Modelo	Resistência ao cisalhamento inclinado f_n (MPa)	Classificação da ligação	
		ACI 546.3R-14 (ACI, 2014)	Sprinkel e Ozyildirim (2000)
C25	12,32	Insuficiente	–
ASD-C25-C25	4,80	Insuficiente	–
ASD-C25-UHPC	7,21	Insuficiente	–
SSD-C25-C25	5,30	Insuficiente	–
SSD-C25-UHPC	11,32	Insuficiente	–
C45	14,88	Suficiente	–
ASD-C45-C45	6,11	Insuficiente	–
ASD-C45-UHPC	8,67	Insuficiente	–
SSD-C45-C45	7,01	Insuficiente	–
SSD-C45-UHPC	14,24	Suficiente	–
C60	21,70	Suficiente	–
ASD-C60-C60	8,65	Insuficiente	–
ASD-C60-UHPC	10,36	Insuficiente	–
SSD-C60-C60	12,22	Insuficiente	–
SSD-C60-UHPC	17,06	Suficiente	–

Fonte: O autor

Os únicos modelos mistos estudados em que foram classificados como suficientes, em relação aos requisitos mínimos da ACI 546-3R-14 (ACI, 2014) foram o SSD-C45-UHPC e SSD-C60-UHPC. Ressalta-se que as dimensões do corpo de prova utilizadas foram diferentes da norma C882 (ASTM, 2013b), que recomenda a utilização de um corpo de prova cilíndrico com diâmetro de 75 mm e altura de 150 mm.

4.2.2 Resistência da ligação por cisalhamento direto (*Bi-surface Shear*)

Na Figura 4.10 pode-se observar as configurações dos ensaios de resistência da ligação por cisalhamento direto em modelos monolíticos e mistos.

Figura 4.10 – Ensaio de resistência da ligação por cisalhamento direto



(a) Ensaio em modelo monolítico

(b) Ruptura em modelo monolítico



(c) Ruptura em modelo misto

(d) Ruptura em modelo misto

Fonte: O autor

Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto para todos os modelos avaliados estão apresentados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto

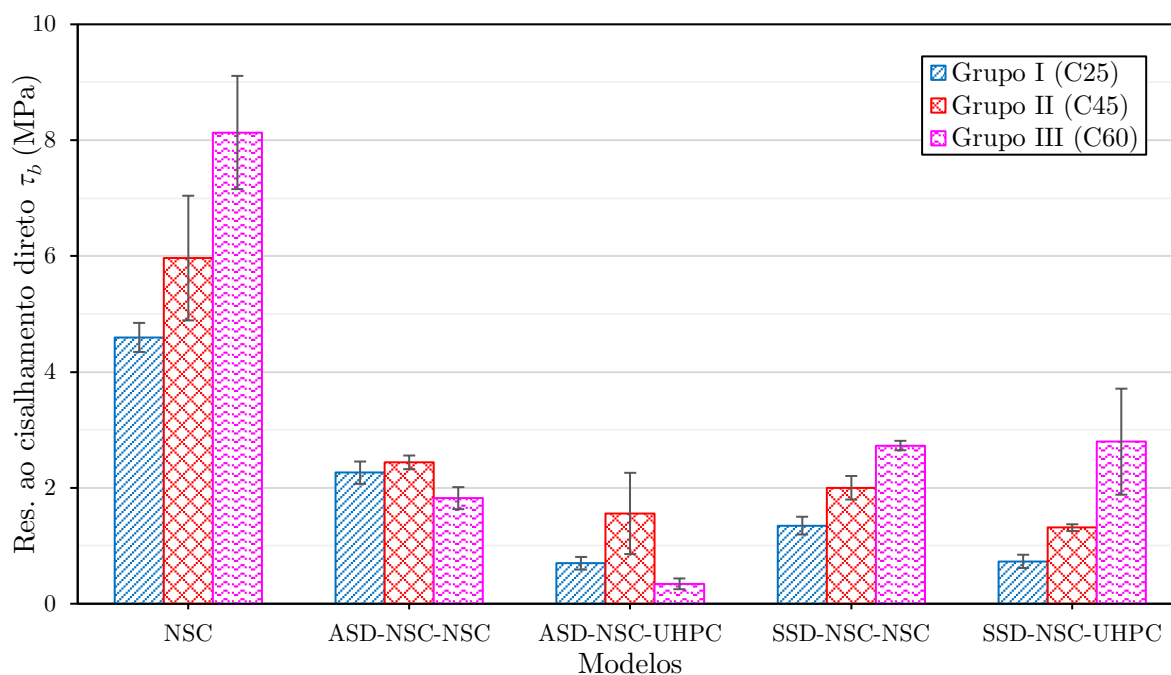
Modelo	Média τ_b (MPa)	sd τ_b (MPa)	COV (%)	Modo de ruptura
C25	4,60	0,25	5,45	–
ASD-C25-C25	2,26	0,19	8,53	A
ASD-C25-UHPC	0,70	0,11	15,62	A
SSD-C25-C25	1,35	0,15	11,36	A
SSD-C25-UHPC	0,73	0,11	15,71	A
C45	5,97	1,08	18,03	–
ASD-C45-C45	2,44	0,12	4,81	A
ASD-C45-UHPC	1,56	0,70	44,97	A
SSD-C45-C45	2,00	0,20	10,15	A
SSD-C45-UHPC	1,31	0,06	4,41	A
C60	8,13	0,98	12,01	–
ASD-C60-C60	1,82	0,19	10,42	A
ASD-C60-UHPC	0,34	0,09	27,03	A
SSD-C60-C60	2,73	0,08	2,97	A
SSD-C60-UHPC	2,80	0,92	32,73	A

Legenda: Modo de ruptura A: Falha adesiva, acarretando a separação entre os materiais na região da interface; Modo de ruptura B: Falha mista, ocorrendo a separação na interface com descolamento do substrato; Modo de ruptura C: Falha coesiva, acontecendo a ruptura do substrato.

Fonte: O autor

Na Figura 4.11 pode-se observar o comportamento geral dos resultados.

Figura 4.11 – Comportamento dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto



Fonte: O autor

Com os resultados dos ensaios de cisalhamento direto não se pôde observar qualquer contribuição do UHPC para a ligação, visto que alguns modelos com UHPC como material de reparo apresentaram valores inferiores aos modelos com NSC, diferentemente do comportamento dos resultados dos demais ensaios de ligação estudados.

Ainda, não foi possível observar a contribuição da condição de umedecimento SSD para a resistência da ligação, que em alguns casos apresentou valores mais baixos que modelos utilizando as condições ASD.

O modelo SSD-C60-UHPC apresentou a maior resistência, alcançando 2,80 MPa. No entanto, representa apenas 34% da resistência do seu respectivo modelo monolítico.

Na pesquisa de Valikhani *et al.* (2020) o valor de 2,80 MPa foi obtido para modelos com substrato seco, sem qualquer tratamento superficial, com resistência à compressão axial de 48 MPa e reparo em UHPC. Em comparação ao modelo ASD-C45-UHPC do presente trabalho, a resistência obtida foi de 1,56 MPa, representando aproximadamente 57% do valor encontrado pelos autores.

Em outra pesquisa de Semendary e Svecova (2020), encontrou-se o valor de 3,08 MPa para modelos com substrato seco e tratamento superficial expondo os agregados,

resistência à compressão axial de 39 MPa e reparo em UHPC. Em comparação ao modelo ASD-C45-UHPC do presente trabalho, a resistência obtida foi de aproximadamente 50% em relação ao valor encontrado pelos pesquisadores.

Ao observar outras pesquisas semelhantes e a própria metodologia utilizada nos demais ensaios do presente estudo, entende-se que houve uma falha de metodologia para os ensaios de cisalhamento direto na escolha da superfície para realização do reparo. A face escolhida foi a superior, como pode ser visualizado na Figura 4.12, onde nas primeiras idades houve exposição ao ar, gerando uma camada porosa que possui baixíssima resistência, comumente chamada de nata de cimento. A metodologia de tratamento superficial adotada não foi suficiente para retirar essa camada e dessa forma, a ligação entre concretos se tornou fraca, independente do material utilizado como reparo e das condições de umedecimento do substrato.

Portanto, não se pôde ter conclusões dos ensaios de cisalhamento direto realizados no presente trabalho.

Figura 4.12 – Configuração dos corpos de prova para ensaio de cisalhamento direto



(a) Face superior

(b) Face inferior

Fonte: O autor

A classificação dos resultados encontrados conforme os critérios da norma ACI 546.3R-14 (ACI, 2014) e da pesquisa de Sprinkel e Ozyildirim (2000) está apresentada na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Classificação da ligação de acordo com os resultados dos ensaios de cisalhamento direto

Modelo	Resistência ao cisalhamento direto τ_b (MPa)	Classificação da ligação	
		ACI 546.3R-14 (ACI, 2014)	Sprinkel e Ozyildirim (2000)
C25	4,60	Suficiente	–
ASD-C25-C25	2,26	Insuficiente	–
ASD-C25-UHPC	0,70	Insuficiente	–
SSD-C25-C25	1,35	Insuficiente	–
SSD-C25-UHPC	0,73	Insuficiente	–
C45	5,97	Suficiente	–
ASD-C45-C45	2,44	Insuficiente	–
ASD-C45-UHPC	1,56	Insuficiente	–
SSD-C45-C45	2,00	Insuficiente	–
SSD-C45-UHPC	1,31	Insuficiente	–
C60	8,13	Suficiente	–
ASD-C60-C60	1,82	Insuficiente	–
ASD-C60-UHPC	0,34	Insuficiente	–
SSD-C60-C60	2,73	Insuficiente	–
SSD-C60-UHPC	2,80	Suficiente	–

Fonte: O autor

O único modelo misto estudado que foi classificado como suficiente, em relação aos requisitos mínimos da norma ACI 546-3R-14 (ACI, 2014) foi o SSD-C60-UHPC.

Como não se pôde ter conclusões com os ensaios de cisalhamento direto, seus resultados foram ignorados nas próximas análises.

4.2.3 Resistência da ligação à tração por compressão diametral (*Splitting Tensile*)

Na Figura 4.13 estão apresentadas as configurações dos ensaios de resistência da ligação à tração por compressão diametral em modelos monolíticos e mistos.

Figura 4.13 – Ensaio de resistência da ligação à tração por compressão diametral



(a) Ensaio em modelo monolítico

(b) Ruptura em modelo monolítico



(c) Ruptura tipo em modelo misto

(d) Ruptura em modelo misto

Os resultados dos ensaios de resistência da ligação à tração por compressão diametral para todos os modelos avaliados estão apresentados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Resultados dos ensaios de resistência da ligação à tração por compressão diametral

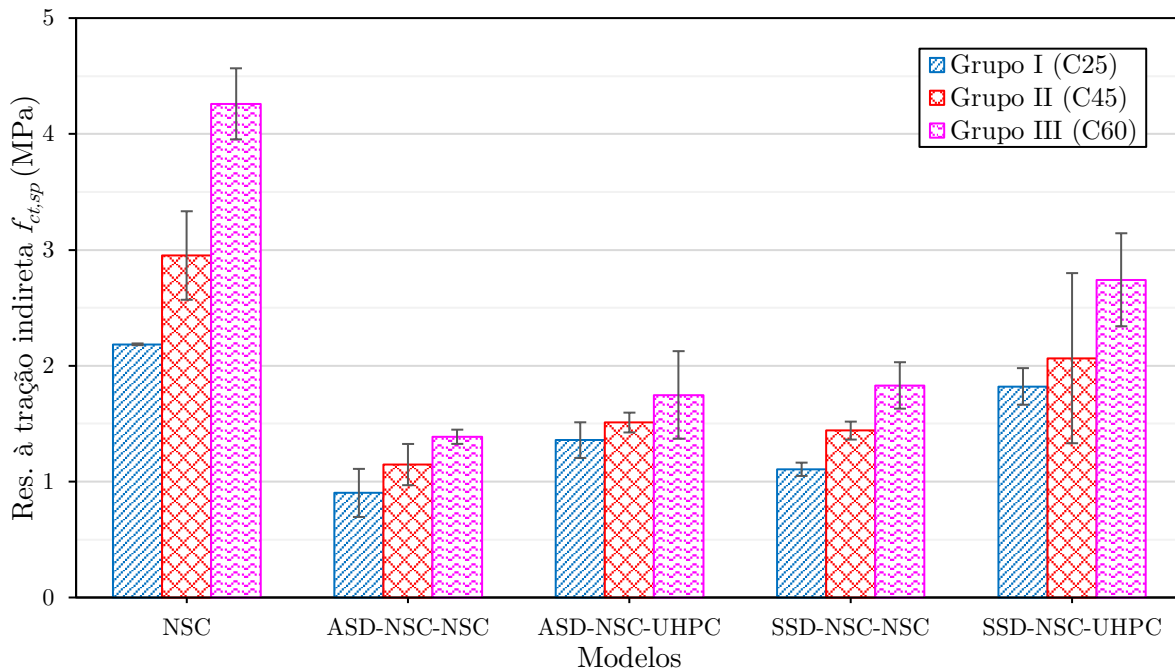
Modelo	Média $f_{ct,sp}$ (MPa)	sd $f_{ct,sp}$ (MPa)	COV (%)	Modo de ruptura
C25	2,19	0,01	0,34	–
ASD-C25-C25	0,90	0,21	22,99	A
ASD-C25-UHPC	1,36	0,15	11,36	A/B
SSD-C25-C25	1,11	0,06	5,18	A
SSD-C25-UHPC	1,82	0,16	8,67	A/B
C45	2,95	0,38	12,94	–
ASD-C45-C45	1,15	0,18	15,50	A
ASD-C45-UHPC	1,51	0,09	5,67	A/B
SSD-C45-C45	1,44	0,08	5,38	A
SSD-C45-UHPC	2,07	0,73	35,54	A/B
C60	4,26	0,31	7,20	–
ASD-C60-C60	1,39	0,06	4,43	A
ASD-C60-UHPC	1,75	0,38	21,62	A/B
SSD-C60-C60	1,83	0,20	10,95	A
SSD-C60-UHPC	2,74	0,40	16,33	A/B

Legenda: Modo de ruptura A: Falha adesiva, acarretando a separação entre os materiais na região da interface; Modo de ruptura B: Falha mista, ocorrendo a separação na interface com descolamento do substrato; Modo de ruptura C: Falha coesiva, acontecendo a ruptura do substrato.

Fonte: O autor

Na Figura 4.14 pode-se observar o comportamento geral dos resultados.

Figura 4.14 – Comportamento dos resultados dos ensaios de resistência da ligação à tração por compressão diametral



Fonte: O autor

Percebe-se um comportamento semelhante aos resultados de resistência por cisalhamento inclinado, onde em todos os grupos houve um aumento na resistência da ligação nos modelos com reparo em UHPC, independente de se utilizar as condições de umedecimento do substrato ASD ou SSD. Esse comportamento também foi observado em outras pesquisas, como de Mansour e Fayed (2021) e Zhang, Yang; Zhu; Liao *et al.* (2020).

Em todos os modelos em que foi utilizado UHPC como material de reparo foram observados em alguns corpos de prova os modos de ruptura B, acontecendo a falha de forma parcial no concreto menos resistente da ligação. Dessa forma, confirma-se a alta adesividade entre o UHPC e o concreto de substrato.

De acordo com os resultados encontrados para cada modelo, pode-se classificar a ligação conforme os critérios da norma ACI 546.3R-14 (ACI, 2014) e da pesquisa de Sprinkel e Ozyildirim (2000), conforme a Tabela 4.15.

Tabela 4.15 – Classificação da ligação de acordo com os resultados dos ensaios de resistência da ligação à tração por compressão diametral

Modelo	Resistência à tração por compressão diametral $f_{ct,sp}$ (MPa)	Classificação da ligação	
		ACI 546.3R-14 (ACI, 2014)	Sprinkel e Ozyildirim (2000)
C25	2,19	Suficiente	Excelente
ASD-C25-C25	0,90	Insuficiente	Regular
ASD-C25-UHPC	1,36	Insuficiente	Regular
SSD-C25-C25	1,11	Insuficiente	Regular
SSD-C25-UHPC	1,82	Insuficiente	Muito boa
C45	2,95	Suficiente	Excelente
ASD-C45-C45	1,15	Insuficiente	Regular
ASD-C45-UHPC	1,51	Insuficiente	Boa
SSD-C45-C45	1,44	Insuficiente	Boa
SSD-C45-UHPC	2,07	Insuficiente	Muito boa
C60	4,26	Suficiente	Excelente
ASD-C60-C60	1,39	Insuficiente	Boa
ASD-C60-UHPC	1,75	Insuficiente	Muito boa
SSD-C60-C60	1,83	Insuficiente	Muito boa
SSD-C60-UHPC	2,74	Suficiente	Excelente

Fonte: O autor

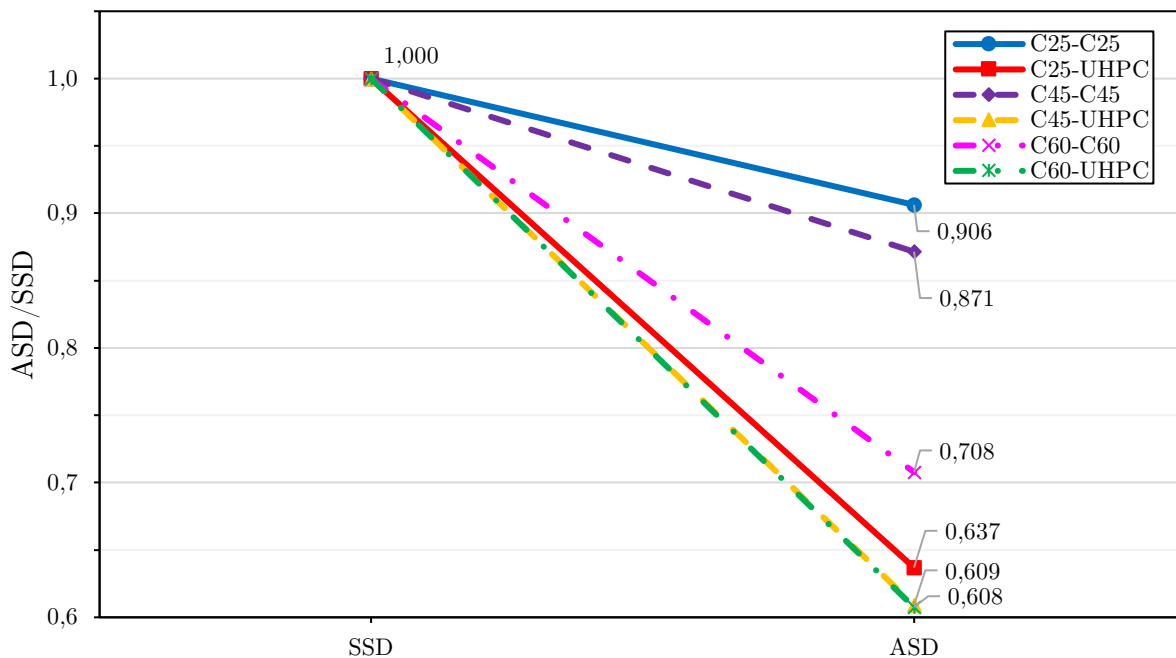
O único modelo misto estudado que foi classificado como suficiente, em relação a norma ACI 546-3R-14 (ACI, 2014) foi o SSD-C60-UHPC. Na classificação de Sprinkel e Ozyildirim (2000), o único modelo classificado como “Excelente” foi o SSD-C60-UHPC. Outros modelos, como SSD-C25-UHPC, SSD-C45-UHPC, ASD-C60-UHPC e SSD-C60-C60 tiveram a classificação “Muito boa”, confirmando mais uma vez a

contribuição do HSC ou UHPC como material de reparo em condições de umedecimento SSD.

4.2.4 Influência das condições de umedecimento do substrato

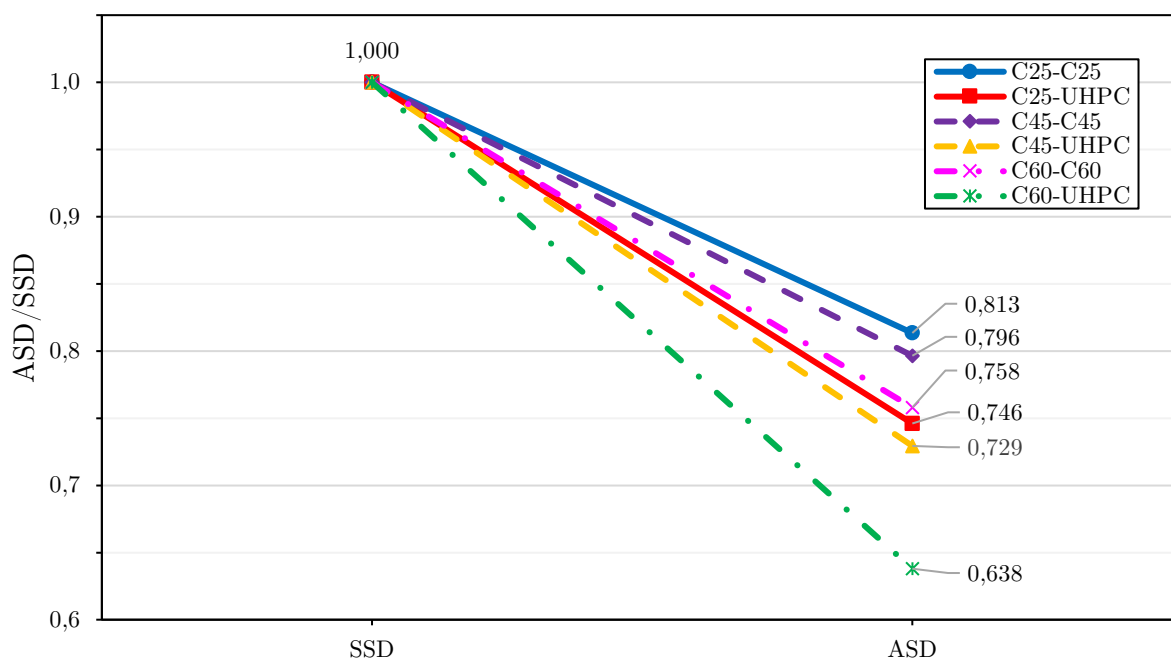
De modo a avaliar apenas a influência das condições de umedecimento do substrato na resistência da ligação entre concretos, dentro de cada grupo avaliado foram relacionados os valores obtidos nos ensaios para as condições ASD com os valores obtidos para os modelos SSD. Essa relação está apresentada na Figura 4.15 para os ensaios de cisalhamento inclinado e na Figura 4.16 para os ensaios de tração por compressão diametral.

Figura 4.15 – Comportamento dos resultados dos ensaios de cisalhamento inclinado em relação as condições de umedecimento do substrato



Fonte: O autor

Figura 4.16 – Comportamento dos resultados dos ensaios de tração por compressão diametral em relação as condições de umedecimento do substrato



Fonte: O autor

Percebe-se em ambos os ensaios que ao alterar as condições de umedecimento do substrato de SSD para ASD, a resistência da ligação diminui em todos os modelos, independentemente do material de reparo.

Nota-se, no entanto, que as condições de umedecimento possuem maior influência quando utilizados concretos com maiores resistências como reparo. Isso pode ser visto pelas maiores quedas de resistência ocorrerem nos modelos com C60 e principalmente, com o UHPC como material de reparo.

As quedas mais expressivas em substrato ASD ocorreram com UHPC como reparo, em torno de 40%, 40% e 36% no ensaio de cisalhamento inclinado; e 36%, 27% e 25% no ensaio de tração por compressão diametral, para os substratos C60, C45 e C25, respectivamente. Na sequência, as maiores quedas aconteceram nos modelos NSC-NSC com concretos C60, C45 e C25, respectivamente.

Esse comportamento também foi observado nas pesquisas de Carbonell Muñoz *et al.* (2014); Semendary e Svecova (2020); Zhang, Yang; Zhu; Liao *et al.* (2020); e Zhang, Yang; Zhu; Wang *et al.* (2020). Isso pode ser explicado devido à alta hidrofiliabilidade do substrato ASD, que absorve uma certa quantidade de água do material de reparo. No caso de concretos de alta resistência e UHPC, por já possuir

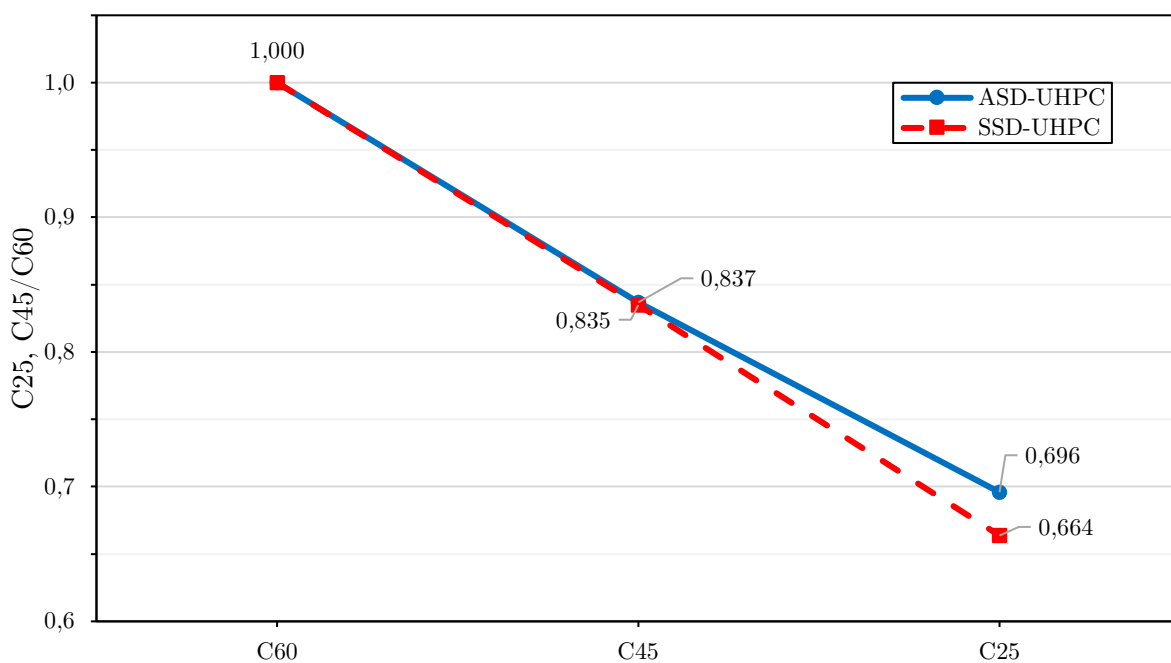
uma baixa relação a/c , caso o substrato absorva parte da água desses materiais, a quantidade restante não é suficiente para uma reação completa de hidratação do cimento e dessa maneira, os materiais perdem desempenho, enfraquecendo a ligação.

Quando utilizado concretos de baixa resistência como reparo, por possuir maior quantidade de água, as condições de umedecimento do substrato apresentam baixa influência na resistência da ligação, pois caso o substrato absorva parte da água do reparo, não será suficiente para comprometer a reação de hidratação do cimento. Isso pode ser visto nos resultados do ensaio de cisalhamento inclinado, onde o modelo ASD-C25-C25 apresentou uma perda de apenas 10% em relação ao modelo SSD-C25-C25.

4.2.5 Influência da resistência mecânica do substrato

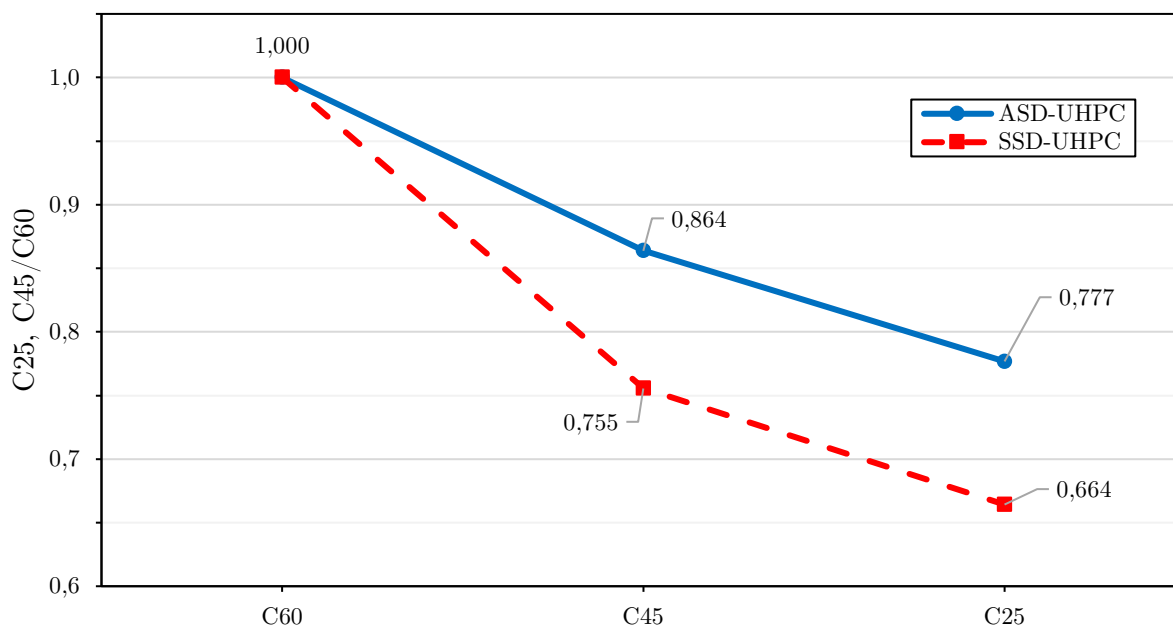
De modo a avaliar apenas a influência da resistência mecânica do substrato na resistência da ligação entre concretos, dentro de cada grupo avaliado foram relacionados os valores obtidos nos ensaios para os concretos C45 e C25 com resultados dos modelos C60, fixando o UHPC como material de reparo para esta análise. Essa relação está apresentada na Figura 4.17 e na Figura 4.18.

Figura 4.17 – Comportamento dos resultados dos ensaios de cisalhamento inclinado em relação a resistência mecânica do substrato



Fonte: O autor

Figura 4.18 – Comportamento dos resultados dos ensaios de tração por compressão diametral em relação a resistência mecânica do substrato



Fonte: O autor

Percebe-se em ambos os ensaios que independentemente das condições de umedecimento, ao alterar o material do substrato para C45 e C25, a resistência da ligação diminui em relação aos modelos com concretos C60.

No ensaio de tração por compressão diametral, a resistência da ligação do modelo SSD-C45-UHPC teve uma redução proporcional a diminuição da resistência do substrato, ambas de 25%. Nos demais modelos, a redução da resistência da ligação não foi proporcional a diminuição da resistência dos concretos do substrato.

A queda de resistência da ligação é maior em substratos com concretos de baixa resistência e condições de umedecimento SSD, em relação ao grupo ASD, devido a resistência do modelo ASD-C60-UHPC ser muito menor que a do SSD-C60-UHPC, em torno de 39% e 36% para os ensaios de cisalhamento inclinado e tração por compressão diametral, respectivamente. Além disso, como visto no item 4.2.4, a influência das condições de umedecimento é menor em concretos de baixa resistência.

4.2.6 Influência da resistência mecânica do reparo

De modo a avaliar apenas a influência da resistência mecânica do reparo na resistência da ligação entre concretos, dentro de cada grupo avaliado foram relacionados os valores obtidos nos ensaios para os concretos de resistência normal, alta resistência e UHPC, com os valores dos corpos de prova monolíticos. Dessa forma, consegue-se verificar dentro de cada grupo a contribuição da mudança do material de reparo e avaliar a recuperação de resistência em relação aos modelos monolíticos. Essa relação está apresentada na Figura 4.19 para os ensaios de cisalhamento inclinado, e na Figura 4.20 para os ensaios de tração por compressão diametral.

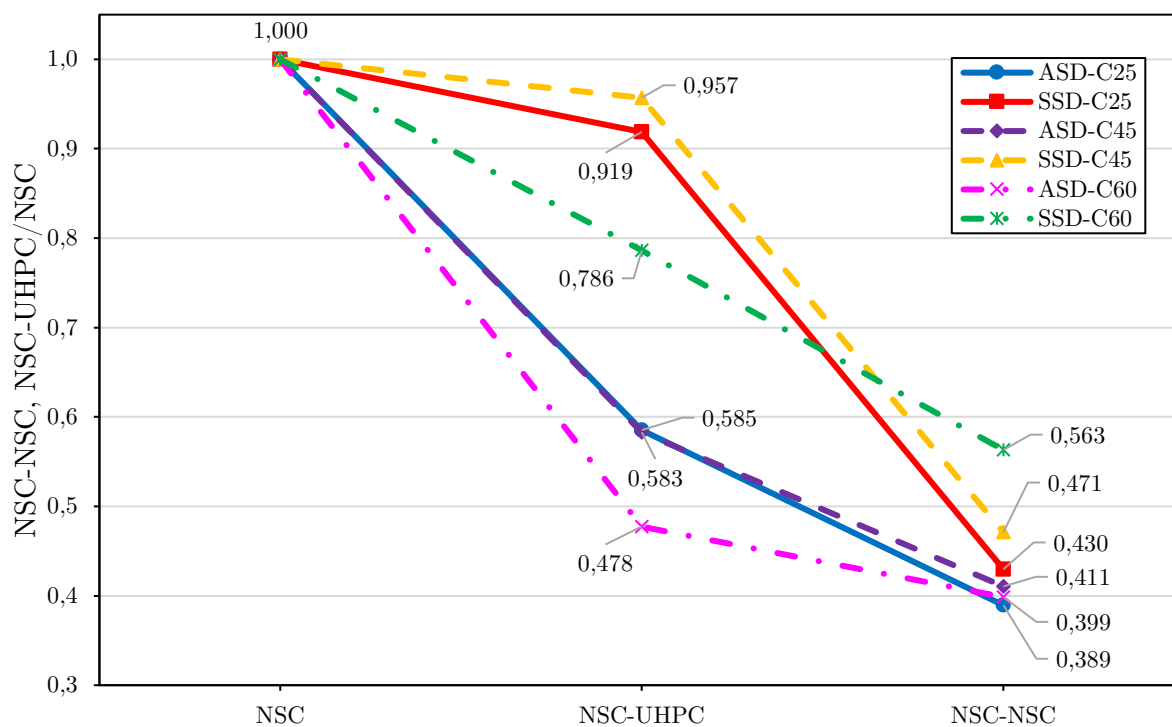
Em todos os modelos com substrato SSD, a resistência da ligação foi superior aos modelos com substrato ASD, comportamento já observado no item 4.2.4.

O ganho mais expressivo de resistência acontece em modelos SSD com substratos com resistência mais baixas e UHPC como material de reparo. Destaca-se o modelo SSD-C25-UHPC que recuperou cerca de 92% e 83% da resistência em relação ao respectivo modelo monolítico para os ensaios de cisalhamento inclinado e tração por compressão diametral, respectivamente. Da mesma forma, no modelo SSD-C45-UHPC houve uma recuperação em torno de 96% e 70% da resistência em relação ao respectivo modelo monolítico, para os ensaios de cisalhamento inclinado e tração por compressão diametral, respectivamente.

Assim como, confirma-se a hipótese de que as maiores reduções de resistência da ligação ocorrem em modelos ASD com substratos mais resistentes ou UHPC como material de reparo, como visto no item 4.2.5. Destaca-se o modelo ASD-C60-UHPC recuperou em torno de 48% e 41%, e o modelo ASD-C60-C60 que recuperou por volta de 40% e 33% da resistência em relação ao seu respectivo modelo monolítico, nos ensaios de cisalhamento inclinado e tração por compressão diametral, respectivamente.

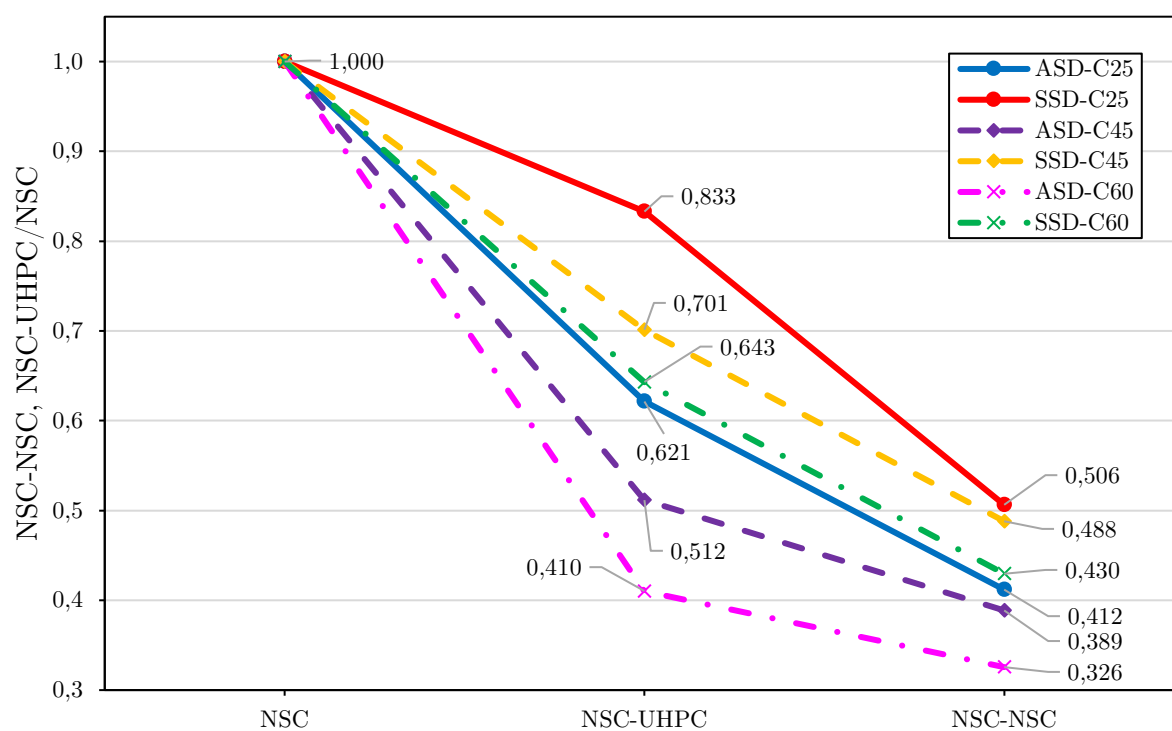
Quando utilizado NSC como material de reparo, as perdas de resistência, em relação aos respectivos modelos monolíticos, foram semelhantes, independentemente das condições de umedecimento do substrato, confirmando-se a baixa influência desse parâmetro em concretos menos resistentes, também visto no item 4.2.4. Para esses modelos, a recuperação de resistência ficou na faixa de 39% e 47% nos ensaios de cisalhamento inclinado e de 32% e 49% nos ensaios de tração por compressão diametral.

Figura 4.19 – Comportamento dos resultados dos ensaios de cisalhamento inclinado em relação a resistência mecânica do reparo



Fonte: O autor

Figura 4.20 – Comportamento dos resultados dos ensaios de tração por compressão diametral em relação a resistência mecânica do reparo

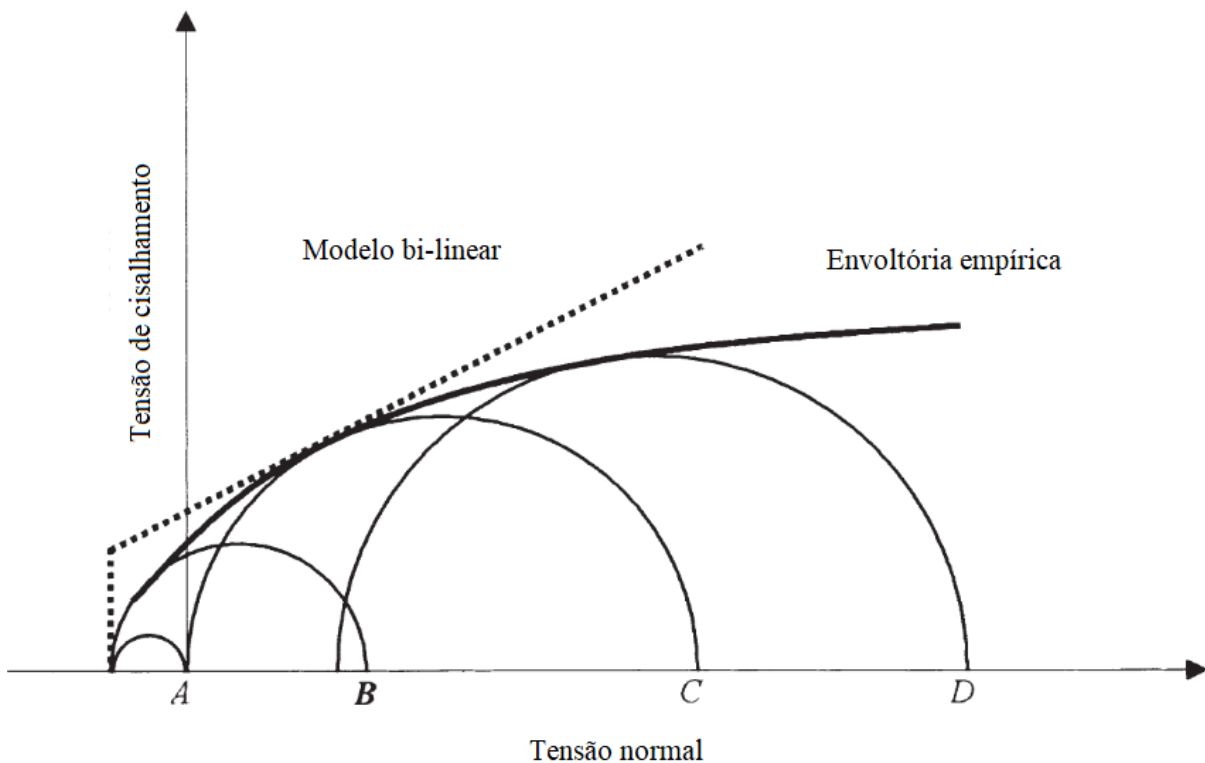


Fonte: O autor

4.2.7 Modelos de previsão da resistência da ligação entre concretos

No presente trabalho utilizou-se os valores de coesão sendo o resultado dos ensaios de resistência da ligação à tração por compressão diametral $f_{ct,sp}$ que também foi adotado nas pesquisas de Espeche e León (2011); Hussein *et al.* (2016); Mansour e Fayed (2021); Santos e Júlio (2011); e Zanotti e Randl (2019). Com os valores de coesão e os resultados do ensaio de cisalhamento inclinado, pode-se encontrar o valor do coeficiente de fricção e conseqüentemente o ângulo de atrito (inclinação da reta). Dessa forma, pode-se traçar o modelo de envoltória bi-linear do critério de ruptura de Mohr-Coulomb, conforme a Figura 4.21.

Figura 4.21 – Típica envoltória de ruptura de rochas



Legenda: Círculo de Mohr do ensaio de: A: tração direta, B: tração por compressão diametral, C: compressão axial e D: compressão triaxial.

Fonte: Adaptado de Austin, Robins e Pan (1999)

Estão apresentados na Tabela 4.16 os valores de coesão, coeficiente de fricção e ângulo de atrito calculados para todos os modelos estudados, e ainda, os valores adotados por modelos teóricos de normas técnicas e outras pesquisas.

Tabela 4.16 – Valores de previsão de resistência de ligação entre concretos

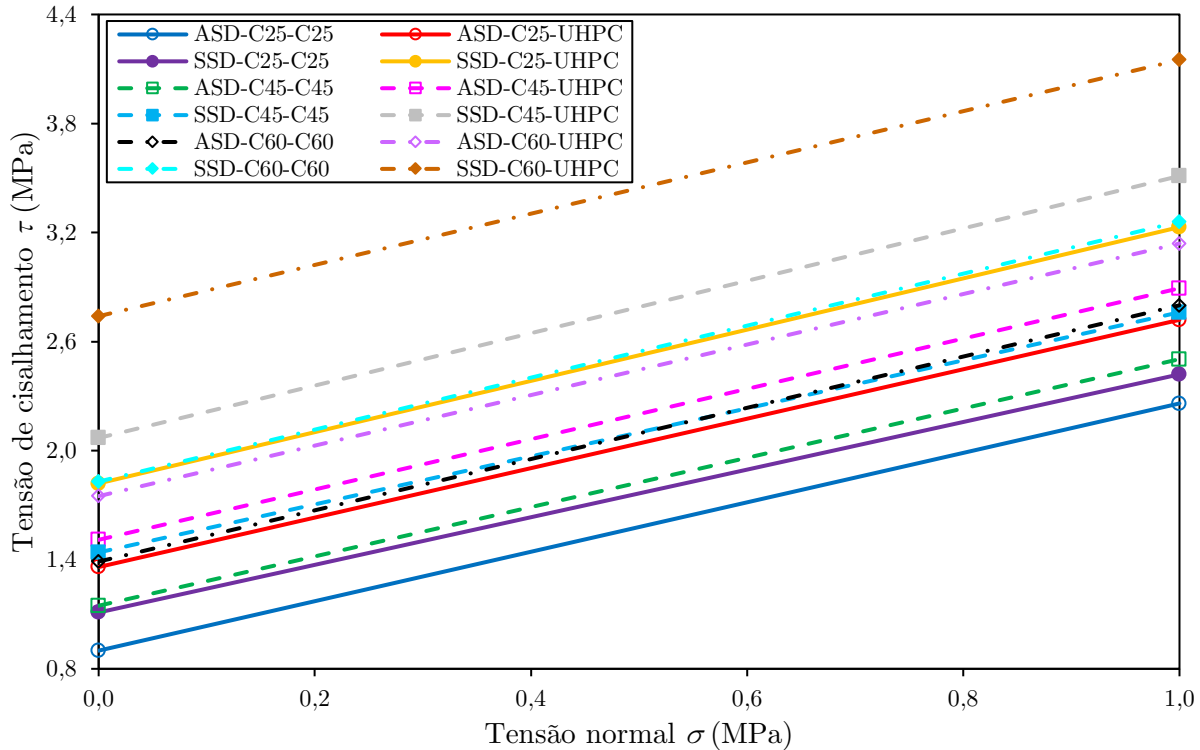
Referência	Modelo	Cisalhamento inclinado		Tração por compressão diametral	μ	Ângulo de fricção ou atrito ϕ (°)
		σ_n (MPa)	τ_n (MPa)	$f_{ct,sp} = c$ (MPa)		
Resultados experimentais	C25	6,16	10,67	2,19	1,38	54,02
	ASD-C25-C25	2,40	4,16	0,90	1,36	53,61
	ASD-C25-UHPC	3,61	6,25	1,36	1,36	53,58
	SSD-C25-C25	2,65	4,59	1,11	1,31	52,73
	SSD-C25-UHPC	5,66	9,81	1,82	1,41	54,67
	C45	7,44	12,89	2,95	1,34	53,17
	ASD-C45-C45	3,05	5,29	1,15	1,36	53,60
	ASD-C45-UHPC	4,34	7,51	1,51	1,38	54,15
	SSD-C45-C45	3,50	6,07	1,44	1,32	52,88
	SSD-C45-UHPC	7,12	12,33	2,07	1,44	55,25
	C60	10,85	18,79	4,26	1,34	53,26
	ASD-C60-C60	4,33	7,49	1,39	1,41	54,68
	ASD-C60-UHPC	5,18	8,98	1,75	1,39	54,36
	SSD-C60-C60	6,11	10,58	1,83	1,43	55,08
	SSD-C60-UHPC	8,53	14,77	2,74	1,41	54,67
MC 2010 (FIB, 2013) / Eurocode 2 (CEN, 2004) ¹	Mistos C25	–	–	0,48	0,70	34,99
	Mistos C45	–	–	0,71	0,70	34,99
	Mistos C60	–	–	0,81	0,70	34,99
MC 2010 (FIB, 2013) / Eurocode 2 (CEN, 2004) ²	Mistos C25	–	–	1,23	0,70	34,99
	Mistos C45	–	–	1,53	0,70	34,99
	Mistos C60	–	–	1,84	0,70	34,99
S6-14 (CSA, 2014)	Monolíticos	–	–	1,00	1,40	54,46
	Mistos	–	–	0,50	1,00	45,00
LRFD (AASHTO, 2012)	Monolíticos	–	–	2,76	1,40	54,46
	Mistos	–	–	1,65	1,00	45,00
Santos e Júlio (2010) ¹	Mistos C25	–	–	0,44	1,10	47,73
	Mistos C45	–	–	0,65	1,10	47,73
	Mistos C60	–	–	0,74	1,10	47,73
Santos e Júlio (2010) ²	Mistos C25	–	–	1,16	1,10	47,73
	Mistos C45	–	–	1,40	1,10	47,73
	Mistos C60	–	–	1,69	1,10	47,73
Mohamad <i>et al.</i> (2015) ¹	Mistos C25	–	–	0,82	1,59	57,84
	Mistos C45	–	–	1,21	1,59	57,84
	Mistos C60	–	–	1,39	1,59	57,84
Mohamad <i>et al.</i> (2015) ²	Mistos C25	–	–	1,89	1,59	57,84
	Mistos C45	–	–	2,61	1,59	57,84
	Mistos C60	–	–	3,14	1,59	57,84

Notas: ⁽¹⁾: Resultados a partir do f_{ctd} teórico, calculado segundo as normas MC 2010 (FIB, 2013) e Eurocode 2 (CEN, 2004); ⁽²⁾: Resultados substituindo a parcela f_{ctd} pela resistência média resistência à tração indireta do concreto menos resistente da ligação, obtida em ensaios experimentais no presente trabalho.

Fonte: O autor

De forma parcial, foram traçadas as envoltórias bi-lineares de Mohr-Coulomb para todos os modelos estudados, conforme a Figura 4.22.

Figura 4.22 – Envoltórias de Mohr-Coulomb para os modelos experimentais



Fonte: O autor

A ordem decrescente dos modelos em função da resistência apresentada foram respectivamente: SSD-C60-UHPC, SSD-C45-UHPC, SSD-C60-C60, SSD-C25-UHPC, ASD-C60-UHPC, ASD-C45-UHPC, ASD-C60-C60, SSD-C45-C45, ASD-C25-UHPC, ASD-C45-C45, SSD-C25-C25 e ASD-C25-C25.

Os modelos com maiores resistências foram respectivamente: SSD-C60-UHPC, SSD-C45-UHPC, SSD-C60-C60 e SSD-C25-UHPC, confirmando a melhoria de resistência quando utilizado o substrato SSD com reparo em HSC e principalmente, em UHPC.

O modelo SSD-C25-UHPC obteve resistência praticamente idêntica ao modelo SSD-C60-C60, o que confirma o ganho de resistência quando utilizado reparo em UHPC com substrato SSD, mesmo com baixa resistência mecânica do substrato.

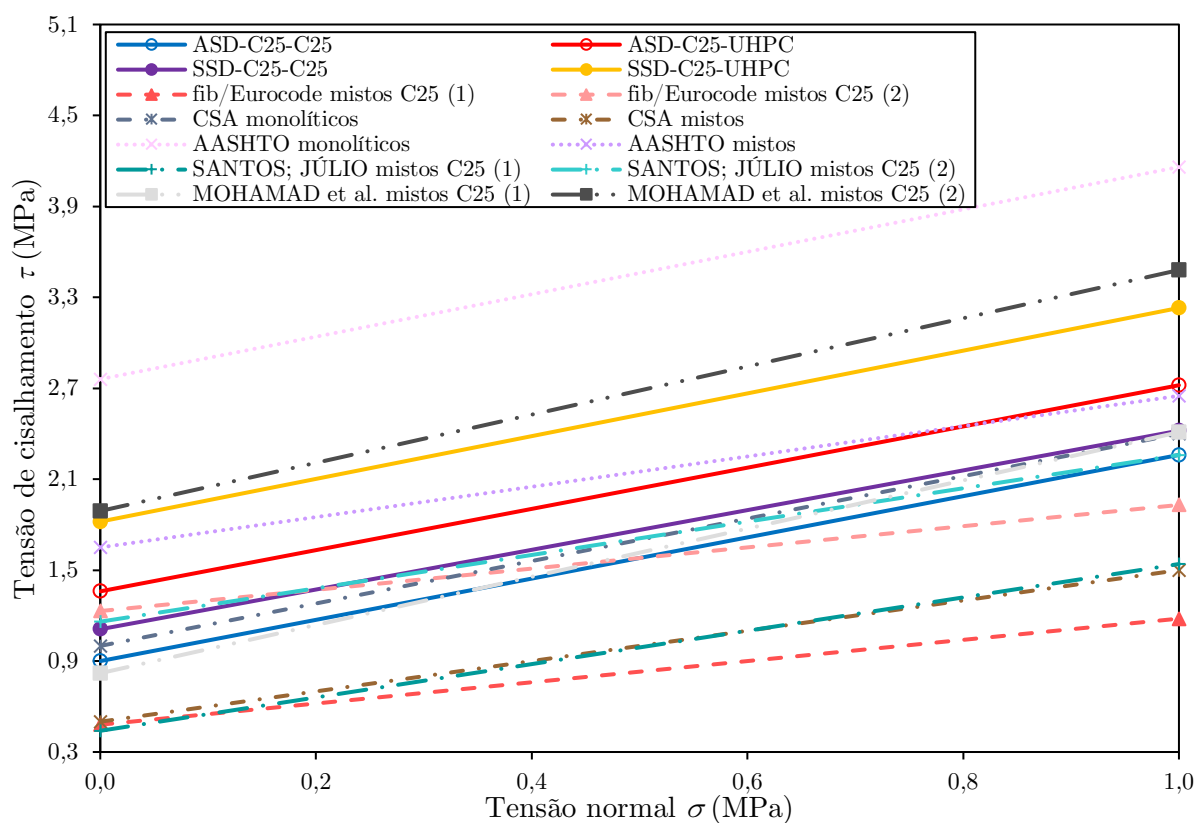
Os modelos SSD-C45-C45 e ASD-C60-C60 obtiveram resistências quase idênticas, o que confirma mais uma vez a que quanto maior a resistência do reparo, maior a necessidade de se utilizar a condição de umedecimento SSD no substrato.

Analisando os modelos com resistências mais baixas, que foram em ordem decrescente, respectivamente: ASD-C25-UHPC, ASD-C45-C45, SSD-C25-C25 e ASD-C25-C25, confirma-se que existe influência, mesmo que pequena, da superfície SSD em concretos com substrato de baixa resistência.

Nos modelos com substrato em concretos C25 e C45, mesmo com condições de umedecimento ASD, quando foi utilizado o UHPC como reparo a resistência da ligação alcançou valores superiores aos modelos SSD com reparo em NSC.

Ainda, pode-se comparar as envoltórias de ruptura de Mohr-Coulomb para os modelos estudados com os modelos teóricos da literatura. A comparação dos resultados com concreto C25 como substrato está ilustrada na Figura 4.23.

Figura 4.23 – Comparação de envoltórias de Mohr-Coulomb para os modelos mistos C25 experimentais e referências



Notas: ⁽¹⁾: Resultados a partir do f_{ctd} teórico, calculado segundo as normas MC 2010 (FIB, 2013) e Eurocode 2 (CEN, 2004); ⁽²⁾: Resultados substituindo a parcela f_{ctd} pela resistência média resistência à tração indireta do concreto de reparo, obtida em ensaios experimentais no presente trabalho.

Fonte: O autor

Os coeficientes adotados para modelos mistos pela AASHTO LRFD (AASHTO, 2012) são válidos apenas para descrever o modelo SSD-C25-UHPC.

Ao utilizar o valor de f_{ctd} como os valores teóricos calculados pelas normas, os modelos de fib *Model Code* 2010 (FIB, 2013) e Eurocode 2 (CEN, 2004) e Santos e Júlio (2010) descrevem com margem de segurança todos os modelos ensaiados. O método de Mohamad *et al.* (2015) descreve todos os modelos ensaiados com reparo em UHPC.

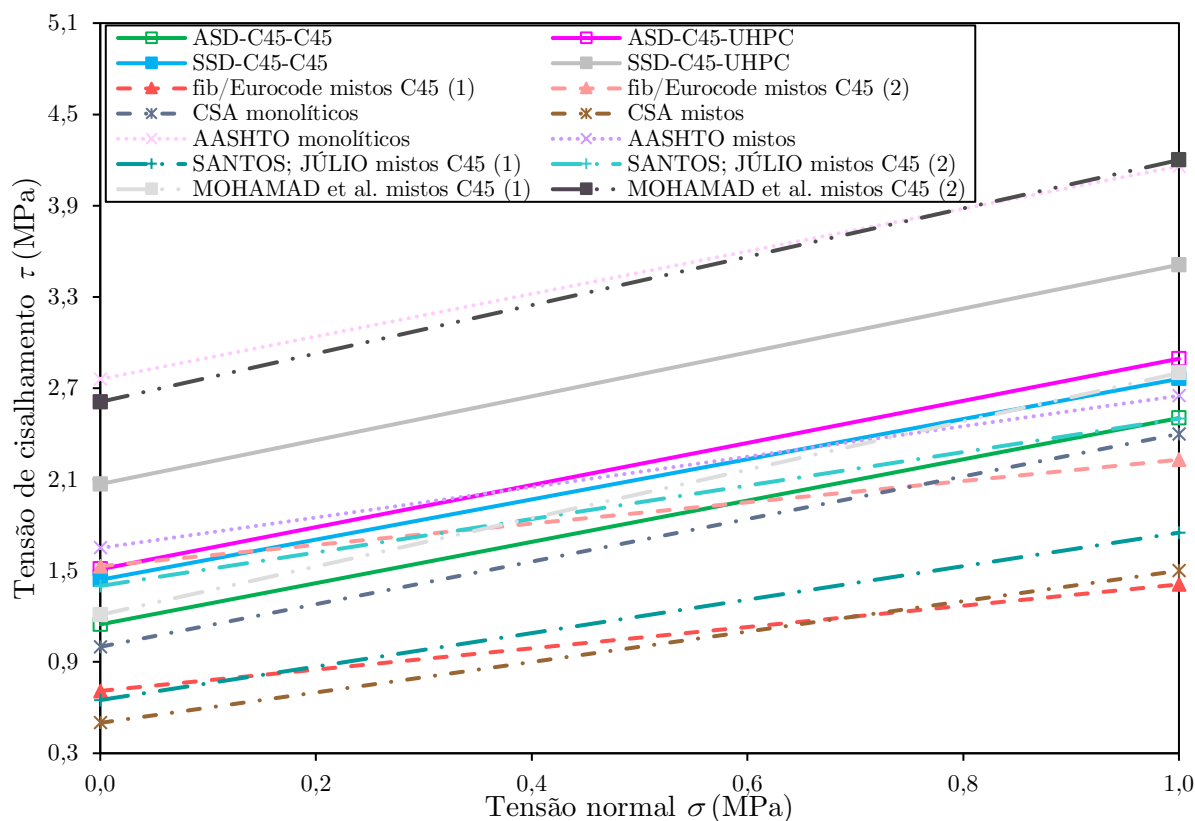
Ao substituir a parcela de f_{ctd} pelos valores experimentais de resistência à tração do concreto, os modelos de Santos e Júlio (2010) e fib *Model Code* 2010 (FIB, 2013) e Eurocode 2 (CEN, 2004) descrevem com margem de segurança os modelos com reparo em UHPC. Já o modelo de Mohamad *et al.* (2015) não descreve nenhum modelo, estando os valores acima dos resultados encontrados experimentalmente.

O modelo para concretos monolíticos da norma CSA S6-14 (CSA, 2014) descreve com margem de segurança os modelos em que foi utilizado o UHPC como material de reparo. Já o modelo para concretos mistos, descreve com margem de segurança todos os modelos ensaiados.

O modelo mais conservador é o proposto pela fib *Model Code* 2010 (FIB, 2013) e Eurocode 2 (CEN, 2004). Os demais modelos mais conservadores são, respectivamente, CSA S6-14 (CSA, 2014) e Santos e Júlio (2010).

A comparação de envoltórias de Mohr-Coulomb dos modelos com concreto C45 como substrato e modelos teóricos da literatura como está ilustrada na Figura 4.24.

Figura 4.24 – Comparação de envoltórias de Mohr-Coulomb para os modelos mistos C45 experimentais e referências



Notas: ⁽¹⁾: Resultados a partir do f_{ctd} teórico, calculado segundo as normas MC 2010 (FIB, 2013) e Eurocode 2 (CEN, 2004); ⁽²⁾: Resultados substituindo a parcela f_{ctd} pela resistência média resistência à tração indireta do concreto de reparo, obtida em ensaios experimentais no presente trabalho.

Fonte: O autor

Para esses modelos, os coeficientes adotados pela AASHTO LRFD (AASHTO, 2012) são válidos apenas para descrever o SSD-C45-UHPC.

Da mesma forma que nos modelos C25, ao utilizar o valor de f_{ctd} como os valores teóricos calculados pelas normas, os métodos de fib *Model Code* 2010 (FIB, 2013) e Eurocode 2 (CEN, 2004) e Santos e Júlio (2010) descrevem com margem de segurança todos os modelos estudados. O modelo de Mohamad *et al.* (2015) descreve todos os modelos com reparo em UHPC.

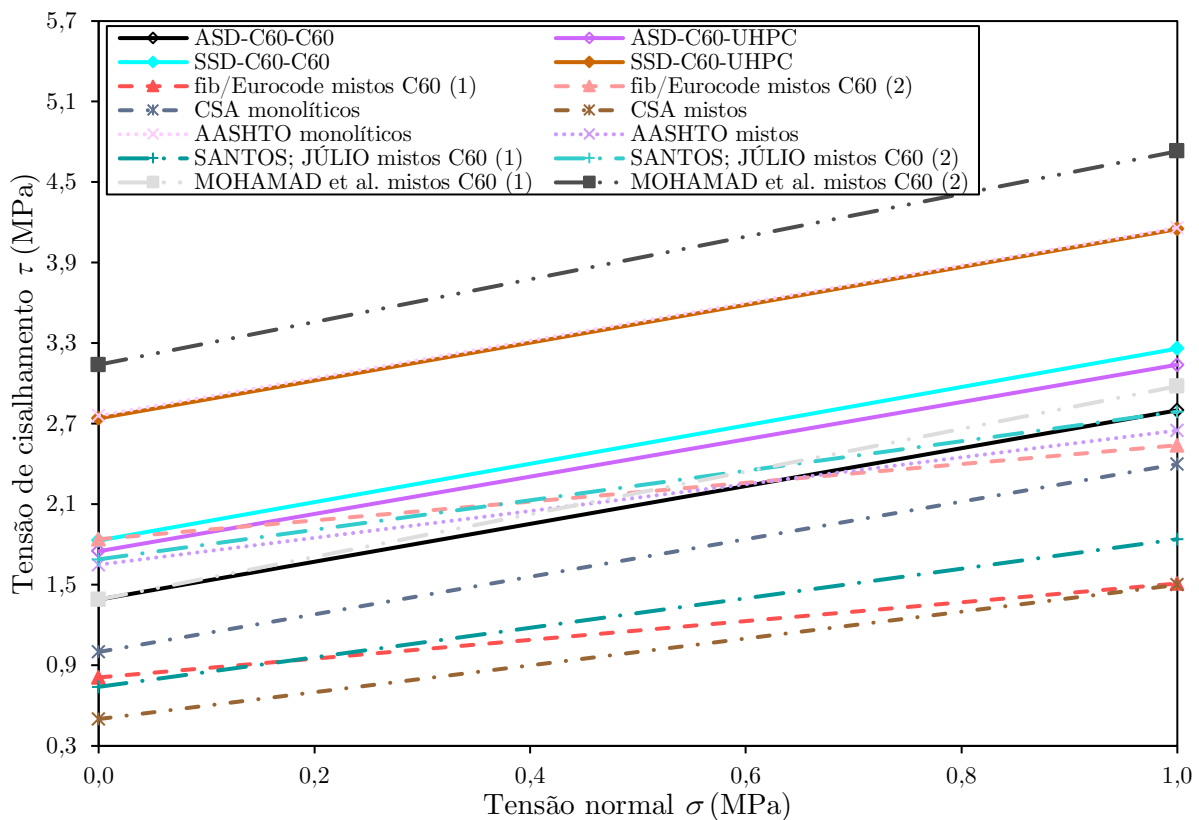
Ao utilizar o valor de f_{ctd} como os valores experimentais de resistência à tração do concreto, os modelos de fib *Model Code* 2010 (FIB, 2013) e Eurocode 2 (CEN, 2004) e Santos e Júlio (2010) descrevem com margem de segurança todos os modelos, com exceção do ASD-C45-C45. Já o método de Mohamad *et al.* (2015) não descreve nenhum modelo estudado.

O método para concretos monolíticos da norma CSA S6-14 (CSA, 2014) descrevem com margem de segurança todos os modelos ensaiados.

Da mesma forma que nos modelos C25, o método mais conservador é o proposto pela fib *Model Code* 2010 (FIB, 2013) e Eurocode 2 (CEN, 2004). Os demais modelos mais conservadores são, respectivamente, CSA S6-14 (CSA, 2014) e Santos e Júlio (2010).

A comparação de envoltórias de Mohr-Coulomb dos modelos com concreto C60 como substrato e modelos teóricos da literatura como está ilustrada na Figura 4.25.

Figura 4.25 – Comparação de envoltórias de Mohr-Coulomb para os modelos mistos C60 experimentais e referências



Notas: ⁽¹⁾: Resultados a partir do *ftd* teórico, calculado segundo as normas MC 2010 (FIB, 2013) e Eurocode 2 (CEN, 2004); ⁽²⁾: Resultados substituindo a parcela *ftd* pela resistência média resistência à tração indireta do concreto de reparo, obtida em ensaios experimentais no presente trabalho.

Fonte: O autor

Os coeficientes adotados para modelos mistos pela AASHTO LRFD (AASHTO, 2012) são válidos para descrever todos os modelos estudados, com exceção do ASD-C60-C60.

Da mesma forma observada nos modelos C25 e C45, ao utilizar o valor de f_{ctd} como os valores teóricos calculados pelas normas, os métodos de fib *Model Code* 2010 (FIB, 2013) e Eurocode 2 (CEN, 2004) e Santos e Júlio (2010) descrevem com margem de segurança todos os modelos. O modelo de Mohamad *et al.* (2015) descreve todos os modelos com reparo em UHPC e o SSD-C60-C60.

Substituindo f_{ctd} pelos valores experimentais de resistência à tração do concreto, os modelos da fib *Model Code* 2010 (FIB, 2013) e Eurocode 2 (CEN, 2004) e Santos e Júlio (2010) descrevem com margem de segurança todos os modelos, com exceção do ASD-C60-C60. Já o método de Mohamad *et al.* (2015) não descreve nenhum modelo, estando acima dos resultados encontrados experimentalmente.

O método para concretos monolíticos da norma CSA S6-14 (CSA, 2014) descreve com margem de segurança todos os modelos ensaiados.

Para modelos com concretos C60, o método mais conservador foi o de modelos mistos da CSA S6-14 (CSA, 2014). Um pouco diferente dos modelos C25 e C45, outros modelos mais conservadores são, respectivamente, fib *Model Code* 2010 (FIB, 2013) e Eurocode 2 (CEN, 2004) e Santos e Júlio (2010).

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou a investigação da ligação entre concretos de resistência normal e alta resistência e concretos de ultra-alto desempenho em diferentes estados de tensão, como cisalhamento, compressão e tração. Ensaaios experimentais foram realizados, assim como estudados os parâmetros como condições de umedecimento e resistência mecânica do substrato, fixando-se o tratamento superficial.

Foi possível avaliar o comportamento da ligação em diversas condições, comparando os resultados encontrados aos concretos monolíticos de referência. Ainda, foram analisadas as envoltórias de ruptura de Mohr-Coulomb de cada modelo ensaiado comparando-as com os métodos de previsão de resistência da ligação entre concretos, presentes em normas técnicas internacionais e outras pesquisas. As principais conclusões podem ser destacadas:

- Existe carência de conteúdo de reparo em estruturas de concreto em normas técnicas nacionais;
- Mesmo utilizando-se um misturador de baixa eficiência (betoneira de eixo horizontal) pôde-se produzir um concreto de ultra-alto desempenho sem fibras com resistência à compressão de 120 MPa aos 28 dias;
- Os resultados demonstraram que ao alterar as condições de umedecimento do substrato de SSD para ASD, a resistência da ligação diminui em todos os modelos estudados;
- Os ganhos mais expressivos de resistência acontecem em modelos SSD com substratos com resistências mais baixas e UHPC como material de reparo;

- Assim como, confirma-se que as maiores reduções de resistência da ligação ocorrem em modelos ASD com substratos mais resistentes e HSC ou UHPC como material de reparo;
- Para modelos NSC-NSC, quando utilizado concretos de baixa resistência como material de reparo, as condições de umedecimento do substrato tiveram baixa influência na resistência da ligação;
- Portanto, sugere-se a utilização do substrato SSD sempre que houver emprego de concretos de alta resistência ou UHPC como reparo;
- Quanto a variação de resistência do substrato, os resultados demonstraram que ao utilizar substratos com resistências mais baixas, a resistência da ligação diminui em comparação com os modelos com concretos C60;
- O único modelo misto estudado que foi classificado como suficiente, em relação aos requisitos mínimos da norma ACI 546-3R-14 (ACI, 2014) foi o SSD-C60-UHPC. No entanto, diversos outros modelos receberam a classificação da ligação como “Excelente” ou “Muito boa”, segundo os critérios de Sprinkel e Ozyildirim (2000);
- Quando analisado os métodos de previsão de resistência da ligação entre concretos, o método da norma AASHTO LRFD (AASHTO, 2012) demonstrou ser válido apenas para os modelos com substrato SSD e UHPC como reparo;
- O método mais conservador foi proposto pela fib MC2010 (FIB, 2013) e EC2 (CEN, 2004). O menos conservador, no entanto, foi o método proposto por Mohamad *et al.* (2015), não representando os modelos estudados;
- Para descrever os modelos com reparo em UHPC, sugere-se nos métodos da fib MC2010 (FIB, 2013) e EC2 (CEN, 2004) e de Santos e Júlio (2010) substituir a parcela f_{ctd} pela média da resistência à tração do concreto do substrato obtida experimentalmente, ou pelos valores teóricos de f_{ctm} ;
- O método de Mohamad *et al.* (2015) utiliza o valor de f_{ctm} , não representando nenhum dos modelos estudados. No entanto, ao substituir essa parcela por f_{ctd} , o método é o que melhor representa os modelos NSC-UHPC estudados;

- Por fim, destaca-se que há carência de modelos de previsão de ligação entre concretos que levam em consideração outros parâmetros além da rugosidade do substrato. Sugere-se estabelecer coeficientes de coesão e fricção, levando em consideração a resistência do reparo, resistência do substrato e as suas condições de umedecimento.

Como indicação para futuros estudos sugere-se:

- A verificação da influência da incorporação de fibras metálicas na composição do UHPC em relação as propriedades do material e ao desempenho da ligação;
- A investigação da ligação entre concretos com a medição do deslizamento (*slip*) da interface com a incorporação de dispositivos de medição de deslocamento (*displacement gauges*);
- A avaliação de outros métodos de tratamento superficial, quantificando a rugosidade da superfície e comparando a outras pesquisas e normas;
- A análise da ligação entre concretos e UHPC com diferentes idades de cura, de modo a avaliar a evolução da resistência da ligação em relação ao tempo;
- A aplicação do reparo em UHPC no estado endurecido com agente de ligação (resina epóxi ou outros);
- A análise de mais parâmetros de condições de umedecimento do substrato, como *Air Surface Wet* (ASW) e *Saturated Surface Wet* (SSW);
- A realização de mais ensaios experimentais de investigação da ligação, de modo a traçar as envoltórias de ruptura de Mohr-Coulomb de forma mais precisa;
- A proposição de um novo modelo de previsão de ruptura de ligação entre concretos e UHPC, levando em consideração além da rugosidade da superfície, as condições de umedecimento e a resistência mecânica do substrato e do reparo;
- A análise numérica da ligação entre concretos e UHPC.

REFERÊNCIAS

AALETI, S.; SRITHARAN, S. **Investigation of a Suitable Shear Friction Interface between UHPC and Normal Strength Concrete for Bridge Deck Applications (Report no. InTrans Project 10-379)**. Ames: Iowa State

University, maio 2017. Disponível em:

<https://intrans.iastate.edu/app/uploads/2018/03/UHPC->

[NC_interface_for_bridge_decks_t2.pdf](https://intrans.iastate.edu/app/uploads/2018/03/UHPC-NC_interface_for_bridge_decks_t2.pdf). Acesso em: 23 maio 2020.

AALETI, S.; SRITHARAN, S. Quantifying Bonding Characteristics between UHPC and Normal-Strength Concrete for Bridge Deck Application. **Journal of Bridge Engineering**, v. 24, n. 6, p. 04019041, jun. 2019. DOI 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001404. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001404](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001404). Acesso em: 10 dez. 2019.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO LRFD Bridge Design Specifications**. 6. ed.

Washington: AASHTO, 2012.

ABBAS, S.; NEHDI, M. L.; SALEEM, M. A. Ultra-High Performance Concrete: Mechanical Performance, Durability, Sustainability and Implementation Challenges.

International Journal of Concrete Structures and Materials, v. 10, n. 3, p.

271–295, set. 2016. DOI 10.1007/s40069-016-0157-4. Disponível em:

<https://doi.org/10.1007/s40069-016-0157-4>. Acesso em: 14 nov. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11579: Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 μm (nº 200)**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine)**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16607: Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16889: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16916: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água.** Rio de Janeiro: ABNT, 2021a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16917: Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água.** Rio de Janeiro: ABNT, 2021b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2018c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8522: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão.** Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ABO SABAH, S. H.; HASSAN, M. H.; MUHAMAD BUNNORI, N.; MEGAT JOHARI, M. A. Bond strength of the interface between normal concrete substrate and GUSMRC repair material overlay. **Construction and Building Materials**, v. 216, p. 261–271, ago. 2019. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.270. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.270>. Acesso em: 23 set. 2019.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 546.3R-14: Guide to Materials Selection for Concrete Repair.** Farmington Hills: ACI, 2014.

AHMAD, S.; RASUL, M.; ADEKUNLE, S. K.; AL-DULAIJAN, S. U.; MASLEHUDDIN, M.; ALI, S. I. Mechanical properties of steel fiber-reinforced UHPC mixtures exposed to elevated temperature: Effects of exposure duration and fiber content. **Composites Part B: Engineering**, v. 168, p. 291–301, jul. 2019. DOI 10.1016/j.compositesb.2018.12.083. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.083>. Acesso em: 6 nov. 2019.

AKHNOUKH, A. K.; BUCKHALTER, C. Ultra-high-performance concrete: Constituents, mechanical properties, applications and current challenges. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, p. e00559, dez. 2021. DOI 10.1016/j.cscm.2021.e00559. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00559>. Acesso em: 5 jul. 2021.

AL-OSTA, M. A.; ISA, M. N.; BALUCH, M. H.; RAHMAN, M. K. Flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with ultra-high performance fiber reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 134, p. 279–296, mar. 2017. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.094. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.094>. Acesso em: 7 out. 2019.

AL-OSTA, M. A.; SHARIF, A. M.; SUHOOTHI, A. C. M.; NAJAMUDDIN, S. K. Strengthening of axially and eccentrically compression loaded RC columns with UHPC jacketing system: Experimental investigation and finite element modeling. **Engineering Structures**, v. 245, p. 112850, out. 2021. DOI 10.1016/j.engstruct.2021.112850. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112850>. Acesso em: 5 ago. 2021.

ALHALLAQ, A. F.; TAYEH, B. A.; SHIHADA, S. Investigation of the Bond Strength Between Existing Concrete Substrate and UHPC as a Repair Material. **International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)**, v. 6, n. 3, p. 8, fev. 2017. Disponível em: <https://www.ijeat.org/wp-content/uploads/papers/v6i3/C4871026317.pdf>. Acesso em: 6 set. 2019.

ANDREASEN, A. H. M.; ANDERSEN, J. Ueber die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten). **Kolloid-Zeitschrift**, v. 50, n. 3, p. 217–228, mar. 1930. DOI 10.1007/BF01422986. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF01422986>. Acesso em: 16 jun. 2020.

ANDREW, R. M. Global CO2 emissions from cement production. **Earth System Science Data**, v. 10, n. 1, p. 195–217, jan. 2018. DOI 10.5194/essd-10-195-2018. Disponível em: <https://essd.copernicus.org/articles/10/195/2018/>.

ARORA, A.; ALMUJADDIDI, A.; KIANMOFRAD, F.; MOBASHER, B.; NEITHALATH, N. Material design of economical ultra-high performance concrete (UHPC) and evaluation of their properties. **Cement and Concrete Composites**, v. 104, p. 103346, nov. 2019. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2019.103346. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103346>. Acesso em: 13 nov. 2019.

ASSUNÇÃO, J. W. **Curvas de dosagem para concretos convencionais e aditivados confeccionados com materiais da região Noroeste do Paraná**. 2002. 254 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C1404/C1404M-98: Standard Test Method for Bond Strength of Adhesive Systems Used With Concrete as Measured by Direct Tension**. West Conshohocken: ASTM International, 1998. <https://doi.org/10.1520/C1404>.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C1583/C1583M-13: Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-off Method)**. West Conshohocken: ASTM International, 2013a. https://doi.org/10.1520/C1583_C1583M-13.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C39/C39M-18: Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens**. West Conshohocken: ASTM International, 2018a. https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-18.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C496/C496M-17: Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens**. West Conshohocken: ASTM International, 2017. https://doi.org/10.1520/C0496_C0496M-17.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C78/C78M-18: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)**. West Conshohocken: ASTM International, 2018b. https://doi.org/10.1520/C0078_C0078M-18.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C882/C882M-13a: Standard Test Method for Bond Strength of Epoxy-Resin Systems Used With Concrete By Slant Shear**. West Conshohocken: ASTM International, 2013b. https://doi.org/10.1520/C0882_C0882M-13a.

AUSTIN, S.; ROBINS, P.; PAN, Y. Shear bond testing of concrete repairs. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 7, p. 1067–1076, jul. 1999. DOI 10.1016/S0008-8846(99)00088-5. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00088-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00088-5). Acesso em: 15 abr. 2020.

BLAIS, P. Y.; COUTURE, M. Precast, Prestressed Pedestrian Bridge World's First Reactive Powder Concrete Structure. **PCI Journal**, v. 44, n. 5, p. 60–71, maio 1999. DOI 10.15554/pcij.09011999.60.71. Disponível em: [https://www.pci.org/PCI_Docs/Publications/PCI_Journal/1999/Sept-Oct/Precast Prestressed Pedestrian Bridge - World's First Reactice Powder Concrete Structure.pdf](https://www.pci.org/PCI_Docs/Publications/PCI_Journal/1999/Sept-Oct/Precast_Prestressed_Pedestrian_Bridge_-_World's_First_Reactive_Powder_Concrete_Structure.pdf). Acesso em: 7 nov. 2019.

BRÜHWILER, E.; DENARIÉ, E. Rehabilitation and Strengthening of Concrete Structures Using Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete. **Structural Engineering International**, v. 23, n. 4, p. 450–457, nov. 2013. DOI 10.2749/101686613X13627347100437. Disponível em: <https://doi.org/10.2749/101686613X13627347100437>. Acesso em: 7 nov. 2019.

BRÜHWILER, E.; DENARIÉ, E. Rehabilitation of concrete structures using Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete. mar. 2008. **Proceedings of Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete [...]**. Kassel: University of Kassel, mar. 2008. p. 1–8. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.370.4686&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 6 set. 2019.

CARBONELL MUÑOZ, M. A. **Compatibility of ultra high performance concrete as repair material: bond characterization with concrete under different loading scenarios**. 2012. 168 f. Michigan Technological University, Michigan, 2012. Disponível em: <https://digitalcommons.mtu.edu/etds/225/>. Acesso em: 8 dez. 2020.

CARBONELL MUÑOZ, M. A.; HARRIS, D. K.; AHLBORN, T. M.; FROSTER, D. C. Bond Performance between Ultrahigh-Performance Concrete and Normal-Strength Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 26, n. 8, p. 04014031, ago. 2014. DOI 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000890. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000890](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000890). Acesso em: 7 set. 2019.

CEN. **EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings**. Bruxelas: CEN, 2004.

CLÍMACO, J. C. T. S.; REGAN, P. E. Evaluation of bond strength between old and new concrete in structural repairs. **Magazine of Concrete Research**, v. 53, n. 6, p. 377–390, dez. 2001. DOI 10.1680/mac.2001.53.6.377. Disponível em: <https://doi.org/10.1680/mac.2001.53.6.377>. Acesso em: 6 jul. 2020.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **S6-14: Canadian Highway Bridge Design Code**. Mississauga: CSA Group, 2014.

DONG, Y. Performance assessment and design of ultra-high performance concrete (UHPC) structures incorporating life-cycle cost and environmental impacts. **Construction and Building Materials**, v. 167, p. 414–425, abr. 2018. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.037. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.037>. Acesso em: 13 nov. 2019.

ELKEM MATERIALS SOUTH AMERICA. **Boletim Técnico: Elkem Microsilica 920U**. Diadema: [s. n.], 2020.

ESPECHE, A. D.; LEÓN, J. Estimation of bond strength envelopes for old-to-new concrete interfaces based on a cylinder splitting test. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 3, p. 1222–1235, mar. 2011. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2010.09.032. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.032>. Acesso em: 24 set. 2019.

FARZAD, M.; SHAFIEIFAR, M.; AZIZINAMINI, A. Experimental and numerical study on bond strength between conventional concrete and Ultra High-Performance Concrete (UHPC). **Engineering Structures**, v. 186, p. 297–305, maio 2019. DOI 10.1016/j.engstruct.2019.02.030. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.02.030>. Acesso em: 6 set. 2019.

FEHLING, E.; SCHMIDT, M.; WALRAVEN, J.; LEUTBECHER, T.; FRÖHLICH, S. **Ultra-High Performance Concrete UHPC: Fundamentals, Design, Examples**. 1. Berlim: Wilhelm Ernst & Sohn, 2014. <https://doi.org/10.1002/9783433604076>.

FEDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **fib Model Code for Concrete Structures 2010**. Berlim: Wilhelm Ernst & Sohn, 2013.

FUNK, J. E.; DINGER, D. R. **Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions: Applied to Ceramic Manufacturing**. 1. ed. Boston: Springer Science+Business Media New York, 1994. DOI 10.1007/978-1-4615-3118-0. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3118-0>. Acesso em: 22 jul. 2021.

GANESH, P.; RAMACHANDRA MURTHY, A. Simulation of surface preparations to predict the bond behaviour between normal strength concrete and ultra-high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 250, p. 118871, jul. 2020. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2020.118871. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118871>. Acesso em: 6 abr. 2020.

GCP APPLIED TECHNOLOGIES. **Especificação Técnica: ADVA 458**. Sorocaba: [s. n.], 2020.

GRAYBEAL, B. A. Compressive Behavior of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 104, n. 2, p. 146–152, mar. 2007. DOI 10.14359/18577. Disponível em: <https://doi.org/10.14359/18577>. Acesso em: 6 nov. 2019.

GU, C. P.; YE, G.; SUN, W. Ultrahigh performance concrete-properties, applications and perspectives. **Science China Technological Sciences**, v. 58, n. 4, p. 587–599, abr. 2015. DOI 10.1007/s11431-015-5769-4. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11431-015-5769-4>. Acesso em: 14 nov. 2019.

HABEL, K.; VIVIANI, M.; DENARIÉ, E.; BRÜHWILER, E. Development of the mechanical properties of an Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC). **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 7, p. 1362–1370, jul. 2006. DOI 10.1016/j.cemconres.2006.03.009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.03.009>. Acesso em: 6 nov. 2019.

HACK, R. Mohr-Coulomb Failure Envelope. *In*: BOBROWSKY, P. T.; MARKER, B. (orgs.). **Encyclopedia of Engineering Geology**. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 667–669. DOI 10.1007/978-3-319-73568-9_207. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-319-73568-9_207. Acesso em: 19 jun. 2020.

HARRIS, D. K.; SARKAR, J.; AHLBORN, T. M. Characterization of Interface Bond of Ultra-High-Performance Concrete Bridge Deck Overlays. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2240, n. 1, p. 40–49, jan. 2011. DOI 10.3141/2240-07. Disponível em: <https://doi.org/10.3141/2240-07>. Acesso em: 6 set. 2019.

HASSAN, A. M. T.; JONES, S. W.; MAHMUD, G. H. Experimental test methods to determine the uniaxial tensile and compressive behaviour of ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC). **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 874–882, dez. 2012. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.030. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.030>. Acesso em: 10 nov. 2019.

HUSSEIN, H. H.; WALSH, K. K.; SARGAND, S. M.; STEINBERG, E. P. Interfacial Properties of Ultrahigh-Performance Concrete and High-Strength Concrete Bridge Connections. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 5, p. 04015208, maio 2016. DOI 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001456. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001456](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001456). Acesso em: 21 nov. 2019.

INTERCEMENT BRASIL. **Boletim Técnico Apiaí: Cimento Cauê Estrutura CPV ARI 40 kg**. São Paulo: [s. n.], 2020.

JU, Y.; SHEN, T.; WANG, D. Bonding behavior between reactive powder concrete and normal strength concrete. **Construction and Building Materials**, v. 242, p. 118024, maio 2020. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2020.118024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118024>. Acesso em: 21 maio 2020.

JÚLIO, E. N. B. S.; DIAS-DA-COSTA, D.; BRANCO, F. A. B.; ALFAIATE, J. M. V. Accuracy of design code expressions for estimating longitudinal shear strength of strengthening concrete overlays. **Engineering Structures**, v. 32, n. 8, p. 2387–2393, ago. 2010. DOI 10.1016/j.engstruct.2010.04.013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.04.013>. Acesso em: 18 nov. 2019.

KHAYAT, K. H.; MENG, W.; VALLURUPALLI, K.; TENG, L. Rheological properties of ultra-high-performance concrete — An overview. **Cement and Concrete Research**, v. 124, p. 105828, out. 2019. DOI 10.1016/j.cemconres.2019.105828. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105828>. Acesso em: 6 set. 2019.

LE QUÉRÉ, C.; ANDREW, R. M.; FRIEDLINGSTEIN, P.; SITCH, S.; PONGRATZ, J.; MANNING, A. C.; KORSBAKKEN, J. I.; PETERS, G. P.; CANADELL, J. G.; JACKSON, R. B.; BODEN, T. A.; TANS, P. P.; ANDREWS, O. D.; ARORA, V. K.; BAKKER, D. C. E.; BARBERO, L.; BECKER, M.; BETTS, R. A.; BOPP, L.; ... ZHU, D. Global Carbon Budget 2017. **Earth System Science Data**, v. 10, n. 1, p. 405–448, mar. 2018. DOI 10.5194/essd-10-405-2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/essd-10-405-2018>. Acesso em: 21 jul. 2020.

MÁCA, P.; SOVJÁK, R.; VAVŘINÍK, T. Experimental Investigation of Mechanical Properties of UHPFRC. **Procedia Engineering**, v. 65, n. Concrete and Concrete Structures 2013 Conference, p. 14–19, 2013. DOI 10.1016/j.proeng.2013.09.004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.004>. Acesso em: 3 mar. 2020.

MANSOUR, W.; FAYED, S. Effect of interfacial surface preparation technique on bond characteristics of both NSC-UHPFRC and NSC-NSC composites. **Structures**, v. 29, p. 147–166, fev. 2021. DOI 10.1016/j.istruc.2020.11.010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.11.010>. Acesso em: 29 nov. 2020.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. 4. New York: McGraw-Hill Education, 2014. Disponível em: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071797870>.

MINERAÇÃO JUNDU. **Boletim Técnico: Areia Quartzosa - Sílica Moída # 325 - E**. Analândia: [s. n.], 2021a.

MINERAÇÃO JUNDU. **Boletim Técnico: Areia Quartzosa Industrial AG - 50/60 SE**. Analândia: [s. n.], 2021b.

MOHAMAD, M. E.; IBRAHIM, I. S.; ABDULLAH, R.; RAHMAN, A. B. A.; KUEH, A. B. H.; USMAN, J. Friction and cohesion coefficients of composite concrete-to-concrete bond. **Cement and Concrete Composites**, v. 56, p. 1–14, fev. 2015. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2014.10.003. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946514001954>. Acesso em: 3 jun. 2020.

MOMAYEZ, A.; EHSANI, M. R.; RAMEZANIANPOUR, A. A.; RAJAIE, H. Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 4, p. 748–757, abr. 2005. DOI 10.1016/j.cemconres.2004.05.027. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884604002297>. Acesso em: 24 fev. 2020.

MOMAYEZ, A.; RAMEZANIANPOUR, A. A.; RAJAIE, H.; EHSANI, M. R. Bi-Surface Shear Test for Evaluating Bond between Existing and New Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 101, n. 2, p. 99–106, mar. 2004. DOI 10.14359/13045. Disponível em: <https://doi.org/10.14359/13045>. Acesso em: 4 jun. 2020.

PASCHALIS, S. A.; LAMPROPOULOS, A. P.; TSIIOULOU, O. Experimental and numerical study of the performance of ultra high performance fiber reinforced concrete for the flexural strengthening of full scale reinforced concrete members. **Construction and Building Materials**, v. 186, p. 351–366, out. 2018. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.123. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.123>. Acesso em: 13 nov. 2019.

POURBABA, M.; ASEFI, E.; SADAGHIAN, H.; MIRMIRAN, A. Effect of age on the compressive strength of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 175, p. 402–410, jun. 2018. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.203. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.203>. Acesso em: 13 nov. 2019.

RAHEEM, A. H. A.; MAHDY, M. G.; MASHALY, A. A. Mechanical and fracture mechanics properties of ultra-high-performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 213, p. 561–566, jul. 2019. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.298. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.298>. Acesso em: 6 nov. 2019.

RAHMAN, A.; AI, C.; XIN, C.; GAO, X.; LU, Y. State-of-the-art review of interface bond testing devices for pavement layers: toward the standardization procedure. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 31, n. 2, p. 109–126, jan. 2017. DOI 10.1080/01694243.2016.1205240. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01694243.2016.1205240>. Acesso em: 18 nov. 2019.

RAMACHANDRA MURTHY, A.; KARIHALOO, B. L.; PRIYA, D. S. Flexural behavior of RC beams retrofitted with ultra-high strength concrete. **Construction and Building Materials**, v. 175, p. 815–824, jun. 2018. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.174. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.174>. Acesso em: 13 nov. 2019.

RICHARD, P.; CHEYREZY, M. Composition of reactive powder concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 25, n. 7, p. 1501–1511, out. 1995. DOI 10.1016/0008-8846(95)00144-2. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00144-2](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00144-2). Acesso em: 6 nov. 2019.

SANCHEZ-SILVA, M.; KLUTKE, G.-A.; ROSOWSKY, D. V. Life-cycle performance of structures subject to multiple deterioration mechanisms. **Structural Safety**, v. 33, n. 3, p. 206–217, maio 2011. DOI 10.1016/j.strusafe.2011.03.003. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2011.03.003>. Acesso em: 18 nov. 2019.

SANTOS, P. M. D.; JÚLIO, E. N. B. S. Factors Affecting Bond between New and Old Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 108, n. 4, p. 449–456, jul. 2011. DOI 10.14359/51683118. Disponível em: <https://doi.org/10.14359/51683118>. Acesso em: 24 set. 2019.

SANTOS, P. M. D.; JÚLIO, E. N. B. S. Recommended Improvements to Current Shear-Friction Provisions of Model Code. 2010. **Proceedings of 3rd fib International Congress** [...]. Washington: [s. n.], 2010. p. 21.

SEMENDARY, A. A.; SVECOVA, D. Factors affecting bond between precast concrete and cast in place ultra high performance concrete (UHPC). **Engineering Structures**, v. 216, p. 110746, ago. 2020. DOI 10.1016/j.engstruct.2020.110746. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110746>. Acesso em: 21 maio 2020.

SHAFIEIFAR, M.; FARZAD, M.; AZIZINAMINI, A. Experimental and numerical study on mechanical properties of Ultra High Performance Concrete (UHPC). **Construction and Building Materials**, v. 156, p. 402–411, dez. 2017. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.170. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.170>. Acesso em: 6 nov. 2019.

SHI, C.; WU, Z.; XIAO, J.; WANG, D.; HUANG, Z.; FANG, Z. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 741–751, dez. 2015. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.088. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.088>. Acesso em: 6 set. 2019.

SILVA, A. P. P. dos S. **Influência dos materiais nas propriedades mecânicas e trabalhabilidade de concretos de ultra-alto desempenho**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2021.

SPRINKEL, M. M.; OZYILDIRIM, C. **Evaluation of High Performance Concrete Overlays Placed on Route 60 over Lynhaven Inlet in Virginia (Report no. FHWA/VTRC 01-R1)**. Charlottesville: Virginia Transportation Research Council, ago. 2000.

TAYEH, B. A.; ABU BAKAR, B. H.; MEGAT JOHARI, M. A. Characterization of the interfacial bond between old concrete substrate and ultra high performance fiber concrete repair composite. **Materials and Structures**, v. 46, n. 5, p. 743–753, maio 2013. DOI 10.1617/s11527-012-9931-1. Disponível em: <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9931-1>. Acesso em: 6 set. 2019.

TAYEH, B. A.; ABU BAKAR, B. H.; MEGAT JOHARI, M. A.; VOO, Y. L. Mechanical and permeability properties of the interface between normal concrete substrate and ultra high performance fiber concrete overlay. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 538–548, nov. 2012. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.013>. Acesso em: 23 set. 2019.

TAYEH, B. A.; ABU BAKAR, B. H.; MEGAT JOHARI, M. A.; VOO, Y. L. Utilization of Ultra-high Performance Fibre Concrete (UHPFC) for Rehabilitation – A Review. **Procedia Engineering**, v. 54, n. The 2nd International Conference on Rehabilitation and Maintenance in Civil Engineering (ICRMCE), p. 525–538, 2013. DOI 10.1016/j.proeng.2013.03.048. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.048>. Acesso em: 6 set. 2019.

THIBAU, T.; TANNER, J. A. Construction of the first French road bridges in ultra high performance concrete. 2002. **Proceedings of 1st fib Congress: Concrete Structures in the 21st Century** [...]. Osaka: [s. n.], 2002. p. 39–40.

VALIKHANI, A.; JABERI, A.; MANTAWY, I. M.; AZIZINAMINI, A. Experimental evaluation of concrete-to-UHPC bond strength with correlation to surface roughness for repair application. **Construction and Building Materials**, v. 238, p. 117753, mar. 2020. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2019.117753. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117753>. Acesso em: 9 dez. 2019.

VANDERLEI, R. D. **Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas**. 2004. 168 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

VEDACIT. **Ficha Técnica: CEMIX**. [S. l.: s. n.], 2018.

XI, F.; DAVIS, S. J.; CIAIS, P.; CRAWFORD-BROWN, D.; GUAN, D.; PADE, C.; SHI, T.; SYDDALL, M.; LV, J.; JI, L.; BING, L.; WANG, J.; WEI, W.; YANG, K.-H.; LAGERBLAD, B.; GALAN, I.; ANDRADE, C.; ZHANG, Y.; LIU, Z. Substantial global carbon uptake by cement carbonation. **Nature Geoscience**, v. 9, n. 12, p. 880–883, 21 dez. 2016. DOI 10.1038/ngeo2840. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/ngeo2840>. Acesso em: 21 jul. 2020.

XIE, J.; FU, Q.; YAN, J.-B. Compressive behaviour of stub concrete column strengthened with ultra-high performance concrete jacket. **Construction and Building Materials**, v. 204, p. 643–658, abr. 2019. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.220. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.220>. Acesso em: 18 nov. 2019.

XUE, J.; BRISEGHELLA, B.; HUANG, F.; NUTI, C.; TABATABAI, H.; CHEN, B. Review of ultra-high performance concrete and its application in bridge engineering. **Construction and Building Materials**, v. 260, p. 119844, nov. 2020. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2020.119844. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119844>. Acesso em: 21 jul. 2020.

YOUM, H.-S.; LIM, W.-Y.; HONG, S.-G.; JOH, C.-B. Evaluation of interfacial performance of normal strength concrete strengthened with ultra-high performance fiber reinforced concrete through slant shear test. **Journal of the Korea Concrete Institute**, v. 30, n. 4, p. 391–401, 2018. DOI 10.4334/JKCI.2018.30.4.391. Disponível em: <https://doi.org/10.4334/JKCI.2018.30.4.391>. Acesso em: 24 set. 2019.

ZANOTTI, C.; RANDL, N. Are concrete-concrete bond tests comparable? **Cement and Concrete Composites**, v. 99, p. 80–88, maio 2019. DOI

10.1016/j.cemconcomp.2019.02.012. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.02.012>. Acesso em: 23 set. 2019.

ZHANG, Yang; ZHANG, C.; ZHU, Y.; CAO, J.; SHAO, X. An experimental study: various influence factors affecting interfacial shear performance of UHPC-NSC.

Construction and Building Materials, v. 236, p. 117480, mar. 2020. DOI

10.1016/j.conbuildmat.2019.117480. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117480>. Acesso em: 19 nov. 2019.

ZHANG, Yang; ZHU, P.; LIAO, Z.; WANG, L. Interfacial bond properties between normal strength concrete substrate and ultra-high performance concrete as a repair material.

Construction and Building Materials, v. 235, p. 117431, fev. 2020. DOI

10.1016/j.conbuildmat.2019.117431. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117431>. Acesso em: 19 nov. 2019.

ZHANG, Yang; ZHU, P.; WANG, X.; WU, J. Shear properties of the interface between ultra-high performance concrete and normal strength concrete.

Construction and Building Materials, v. 248, p. 118455, jul. 2020. DOI

10.1016/j.conbuildmat.2020.118455. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118455>. Acesso em: 6 abr. 2020.

ZHANG, Youyou; CHAI, Y. H. Numerical analysis of bridge deck rehabilitation by ultra-high-performance concrete (UHPC) overlay. **Structures**, v. 33, p. 4791–4802,

out. 2021. DOI 10.1016/j.istruc.2021.07.044. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.044>. Acesso em: 5 ago. 2021.

ZHOU, M.; LU, W.; SONG, J.; LEE, G. C. Application of Ultra-High Performance Concrete in bridge engineering. **Construction and Building Materials**, v. 186, p.

1256–1267, out. 2018. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.036. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.036>. Acesso em: 6 set. 2019.

ZHU, Y.; ZHANG, Y.; HUSSEIN, H. H.; CHEN, G. Flexural strengthening of reinforced concrete beams or slabs using ultra-high performance concrete (UHPC): A state of the art review.

Engineering Structures, v. 205, p. 110035, fev. 2020. DOI

10.1016/j.engstruct.2019.110035. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110035>. Acesso em: 23 abr. 2020.