

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

LISIANE PEREIRA PRADO

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

São Carlos

2020

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

LISIANE PEREIRA PRADO

Estudo da interface do Concreto Pré-moldado e Concreto de Altíssimo
Desempenho Reforçado com Fibras

VERSÃO CORRIGIDA

A versão original encontra-se na Escola de Engenharia de São Carlos

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Estruturas

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Carrazedo

Co-orientador: Prof. Dr. Mounir Khalil El Debs

São Carlos

2020

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

P896e Prado, Lisiane Pereira
Estudo da interface do Concreto Pré-moldado e
Concreto de Altíssimo Desempenho Reforçado com Fibras
/ Lisiane Pereira Prado; orientador Ricardo Carrazedo;
coorientador Mounir Khalil El Debs. São Carlos, 2020.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil (Engenharia de Estruturas) e Área de
Concentração em Estruturas -- Escola de Engenharia de
São Carlos da Universidade de São Paulo, 2020.

1. CAR. 2. UHPC. 3. Interface. 4. Rugosidade. 5.
Modelo numérico. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **LISIANE PEREIRA PRADO**.

Título da tese: " Estudo da interface do concreto pré-moldado e concreto de altíssimo desempenho reforçado com fibras".

Data da defesa: 28/05/2020

Comissão Julgadora

Resultado

Prof. Associado **Ricardo Carrazedo (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP)

APROVADA

Prof. Associado **Vladimir Guilherme Haach**
(Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP)

APROVADA

Prof. Dr. **Daniel de Lima Araújo**
(Universidade Federal de Goiás/UFG)

APROVADA

Prof. Associado **Antonio Domingues de Figueiredo**
(Escola Politécnica/EP-USP)

APROVADA

Profa. Dra. **Mônica Pinto Barbosa**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP – Ilha Solteira)

APROVADA

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
(Engenharia de Estruturas):

Prof. Associado **Vladimir Guilherme Haach**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

Agradecimentos

À Deus e a Nossa Senhora Aparecida pela fé e força concedida durante este trabalho.

Aos meus pais, Cicero e Zilda, e meu irmão Evandro pelos ensinamentos e incentivo.

Aos professores Ricardo Carrazedo e Mounir Khalil El Debs pela paciência, compreensão e orientação durante o trabalho.

À equipe do laboratório de estruturas da EESC-USP: Amaury, Fabiano, Luiz, Mauri e Romeu pelo suporte técnico e pelos momentos de descontração.

Aos técnicos Luiz Neves (departamento de metrologia) e José Dibo (departamento de arquitetura) pelo serviço e aprendizado.

Ao técnico Dorival, professor Vladimir e professora Alessandra pela contribuição dos seus conhecimentos nesta pesquisa.

Aos amigos pela compreensão e sábias palavras, em especial ao Alex pelo equilíbrio nos momentos finais com a minha pessoa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pesquisa de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos concedida.

Às empresas Holcim, Grace, Elkem e Mineração Jundu pela doação dos materiais.

O milagre acontece quando diante do impossível permanecemos acreditando

(autor desconhecido)

RESUMO

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

O concreto de alta resistência (CAR) tem sido muito utilizado na confecção de estruturas de concreto pré-moldado. Uma das dificuldades encontradas nesse sistema construtivo consiste em estabelecer uma ligação monolítica entre os elementos. A solução frequente consiste no preenchimento com moldagem no local utilizando o CAR e um arranjo de armadura específico. Atualmente, o concreto de altíssimo desempenho reforçado com fibras (UHPC – sigla em inglês), com propriedades mecânicas elevadas (resistência à tração e compressão) e boa durabilidade, surge como opção de preenchimento da região da ligação destes elementos. Neste caso, a eficiência da ligação para transmissão de esforços solicitantes dependerá da disposição da armadura nessa região, das propriedades mecânicas destes concretos (CAR e UHPC) e também das condições de rugosidade da interface entre eles. Neste estudo é feita uma investigação do comportamento da interface do concreto pré-moldado (CAR) e o concreto de preenchimento (UHPC), considerando diferentes tipos de preparo de superfície do substrato. As rugosidades das superfícies foram quantificadas pelos métodos de medição por coordenadas e mancha de areia. Os ensaios realizados para investigação da resistência e rigidez na interface foram: tração na flexão, cisalhamento direto, cisalhamento inclinado e tração por compressão diametral. Notou-se que os parâmetros quantitativos da rugosidade tiveram pouca correlação com a resistência da interface. Além disso, observou-se que o ensaio de resistência à tração na flexão foi o mais representativo do comportamento da interface à tração. A resistência obtida nas interfaces (CAR-UHPC) foi 10% superior à resistência de ligações monolíticas de CAR utilizadas como referência nos ensaios de cisalhamento direto e inclinado. Os comportamentos de resistência e rigidez das interfaces foram bem representadas por um modelo numérico de contato. Conclui-se que o tipo de superfície realizada no CAR para receber o UHPC vai depender do esforço predominante na interface.

Palavra-chave: CAR. UHPC. Interface. Rugosidade. Modelo numérico.

ABSTRACT

PRADO, L. P. Interface study of Precast Concrete and Ultra-High-Performance Reinforced Concrete. 2020. Thesis (PhD. in Civil Engineering (Structures)) – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2020.

The high-strength concrete (HSC) has used in the manufacture of precast concrete structures. One of the difficulties encountered in this building system is to establish a monolithic connection between the elements. The frequent solution is to fill with molding in situ using the CAR and a specific reinforcement arrangement. Currently, ultra-high-performance reinforced concrete (UHPC), with high mechanical properties (tensile and compressive strength) and good durability, appears as an option to fill in the region of the connection of these elements. In this case, the efficiency of the connection for transmission of efforts will depend on the arrangement of the reinforcement in that region, on the mechanical properties of these concretes (CAR and UHPC) and also on the roughness conditions of the interface between them. The study investigates the behavior of the precast concrete interface (CAR) and the filler concrete (UHPC), considering different types of substrate surface preparation. The surface roughness was quantified using the surface coordinate profile coordinates and sand patch test. The tests carried out to investigate the strength and stiffness at the interface were: flexural tensile, direct shear, slant shear and splitting tensile strength. It was noted that the quantitative parameters of the roughness had little correlation with the strength at the interface. Besides, it was observed that the flexural tensile strength test was the most representative of the behavior of the tensile interface. The strength obtained at the interfaces (CAR-UHPC) was 10% higher than the monolithic model in the direct shear and slant shear. The strength and stiffness behaviors of the interfaces were well represented by a numerical contact model. It is concluded that the type of surface made in the CAR to receive the UHPC will depend on the main effort at the interface.

Keyword: CAR. UHPC. Interface. Roughness. Numerical model.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	Objetivos.....	18
1.2	Metodologia empregada.....	18
2.	EMBASAMENTO TEÓRICO.....	19
2.1	Concreto de alta resistência (CAR) em pré-moldados.....	19
2.2	Concreto de altíssimo desempenho reforçado com fibras (UHPC) e seu uso em ligações.....	20
2.3	Mecanismos resistentes da ligação entre dois concretos.....	24
2.4	Ensaio para avaliar as propriedades das interfaces.....	26
2.4.1	<i>Ensaio de resistência à tração na flexão.....</i>	28
2.4.2	<i>Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....</i>	29
2.4.3	<i>Ensaio de resistência ao cisalhamento direto.....</i>	29
2.4.4	<i>Ensaio de resistência ao cisalhamento inclinado.....</i>	30
2.5	Tipos de interfaces na ligação entre o concreto e UHPC.....	32
2.6	Estado da arte da ligação entre o concreto e o UHPC.....	35
2.7	Análise quantitativa da rugosidade.....	45
2.7.1	<i>Método da mancha de areia.....</i>	49
2.7.2	<i>Medição por coordenadas.....</i>	50
2.7.3	<i>Parâmetros descritivos de rugosidade.....</i>	52
3.	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	58
3.1	Dosagem e produção do concreto.....	61
3.2	Propriedades mecânicas dos concretos.....	65
3.2.1	<i>Resistência à compressão e módulo de elasticidade.....</i>	65
3.2.2	<i>Resistência à tração por compressão diametral.....</i>	66
3.2.3	<i>Resistência à tração direta.....</i>	67
3.2.4	<i>Resistência à tração na flexão.....</i>	67
3.2.5	<i>Energia de fratura.....</i>	68
3.3	Procedimentos de preparo da superfície.....	70
3.4	Caracterização da rugosidade.....	75
3.4.1	<i>Medições por coordenadas.....</i>	75
3.4.2	<i>Método da mancha de areia.....</i>	77

3.5	Resistência à tração na flexão.....	78
3.5.1	<i>Geometria dos corpos de prova</i>	78
3.5.2	<i>Confecção da interface</i>	79
3.5.3	<i>Concretagem.....</i>	81
3.5.4	<i>Instrumentação e execução do ensaio</i>	81
3.6	Resistência ao cisalhamento direto.....	84
3.6.1	<i>Geometria dos corpos de prova.....</i>	84
3.6.2	<i>Confecção da interface</i>	86
3.6.3	<i>Concretagem.....</i>	88
3.6.4	<i>Instrumentação e execução do ensaio</i>	88
3.7	Resistência ao cisalhamento inclinado	91
3.7.1	<i>Geometria dos corpos de prova</i>	91
3.7.2	<i>Confecção da interface</i>	92
3.7.3	<i>Concretagem.....</i>	93
3.7.4	<i>Instrumentação e execução do ensaio</i>	94
3.7.5	<i>Análise de imagem.....</i>	96
3.8	Resistência à tração por compressão diametral.....	98
3.8.1	<i>Geometria dos corpos de prova</i>	98
3.8.2	<i>Confecção da interface</i>	100
3.8.3	<i>Concretagem.....</i>	101
3.8.4	<i>Instrumentação e execução do ensaio</i>	104

4. RESULTADOS E ANÁLISES

4.1	Propriedades mecânicas dos concretos.....	103
4.1.1	<i>Resistência à compressão e módulo de elasticidade</i>	103
4.1.2	<i>Resistência à tração por compressão diametral.....</i>	106
4.1.3	<i>Resistência à tração direta</i>	107
4.1.4	<i>Resistência à tração na flexão</i>	108
4.1.5	<i>Energia de fratura.....</i>	108
4.2	Caracterização da rugosidade da superfície	109
4.2.1	<i>Medições por coordenadas</i>	109
4.2.2	<i>Método da mancha de areia.....</i>	111
4.3	Resistência à tração na flexão	113
4.4	Resistência ao cisalhamento direto.....	123
4.5	Resistência ao cisalhamento inclinado	134
4.6	Resistência à tração por compressão diametral.....	152

5.	CORRELAÇÃO DE RESULTADOS	
5.1	Correlação da rugosidade com as resistências	160
5.2	Parâmetros resistentes e de rigidez da interface	164
6.	MODELO NUMÉRICO	174
6.1	Propriedades do concreto no Abaqus®	174
6.2	Propriedades da interface no Abaqus®	181
6.3	Parâmetros de entrada no modelo numérico no Abaqus®	185
6.3.1	<i>CAR e Concreto Intermediário</i>	185
6.3.2	<i>UHPC</i>	188
6.3.3	<i>Geometria do modelo numérico</i>	189
6.3.4	<i>Interface</i>	190
6.4	Análise dos resultados	192
6.4.1	<i>Calibração dos concretos</i>	192
6.4.2	<i>Ensaio de resistência à tração na flexão</i>	193
6.4.3	<i>Ensaio de resistência ao cisalhamento direto</i>	196
6.4.4	<i>Resistência ao cisalhamento inclinado</i>	200
7.	CONCLUSÕES	204
7.1	Conclusão	204
7.2	Sugestões para trabalhos futuros	206
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	207
	APÊNDICE	215
	Apêndice A – Caracterização dos materiais e resultados das propriedades mecânicas dos concretos	215
	Apêndice B – Resultado da caracterização da rugosidade	220
	Apêndice C – Resultado da resistência à tração na flexão	238
	Apêndice D – Resultado da resistência ao cisalhamento direto	249
	Apêndice E – Resultado da resistência ao cisalhamento inclinado	261
	Apêndice F – Resultado da resistência à tração por compressão diametral	279
	Apêndice G – Correlação de resultados	285

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras maiúsculas

A_{conc} - área de concreto na interface

A_0 - área da seção transversal

D - diâmetro do círculo

F - força aplicada

F_{ruptura} - força última

G_f - energia de fratura

H_s - profundidade média

L - dimensão do vão entre apoios

K_{nn} - parâmetro de rigidez na direção normal

K_{ss} / K_{tt} - parâmetro de rigidez na direção tangencial

V - volume de areia

R_a - altura média do perfil

R_q - desvio médio quadrático do perfil avaliado

$R_{\text{máx}}$ - altura máxima de pico-vale

R_{pi} - profundidade máxima do pico

R_{pm} - altura média de pico

R_{vi} - profundidade máxima do vale

R_{vm} - altura média de vale

$R_{z(\text{DIN})}$ - altura média pico-vale

$R_{z(\text{ISO})}$ - Altura dos dez pontos de pico-vale

Letras minúsculas

b - largura média do corpo de prova

c - coesão do material

d - altura ou diâmetro do corpo de prova

e - largura do entalhe

f_c - Resistência à compressão

$f_{ct,f}$ - resistência à tração na flexão

f_{ctm} - resistência média à tração do concreto

$f_{ct,sp}$ - resistência à tração por compressão diametral

h - altura da viga

l - comprimento do corpo de prova

l_m - comprimento de avaliação

Letras gregas

$\tau_{último}$ - tensão de cisalhamento último

τ_n - tensão de cisalhamento na interface

σ_n - tensão normal na interface

σ - tensão de ruptura

$\sigma_{v,int}$ - tensão vertical na interface

μ - coeficiente de atrito

ϕ - ângulo de atrito interno [$\phi = \tan^{-1}(\mu)$]

α - ângulo de inclinação

λ_c - comprimento de onda ou comprimento de amostragem

LISTA DE SIGLAS

CAR - concreto de alta resistência;

UHPC – concreto de altíssimo desempenho reforçado com fibras;

CPR – concreto pós-reativo;

A - agregado exposto

C - chave de cisalhamento

J - jato de areia

R - referência

T - tela de aço expandida

In - intermediária – fibra exposta

I - intermediária – monolítico

1. INTRODUÇÃO

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

Para elementos com seções transversais reduzidas e grandes vãos, com o emprego frequente da protensão, o uso do CAR tornou-se comum na produção de elementos no sistema construtivo de concreto pré-moldado, principalmente por ter uma elevada contribuição na protensão. El Debs (2017) relata que a utilização do CAR dentro desse sistema construtivo apresenta resultados significativos na redução de custos, decorrentes principalmente de mão-de-obra, serviço de protensão, transporte e montagem de vigas, como é o caso da aplicação de vigas de ponte com grandes vãos.

Quanto ao emprego do UHPC, algumas aplicações têm sido feitas, como a construção de passarela possibilitando a utilização de um sistema estrutural simples com viga retangular de espessura reduzida, influenciando no peso dos elementos, gerando um custo menor do que o sistema construtivo com material convencional (Lopez et al., 2016).

Outro uso eficiente do UHPC consiste na aplicação de ligações de lajes pré-moldadas, sendo que, devido a excelente interação entre o aço de reforço e o UHPC, permite-se adotar pequenas dimensões nas ligações, conforme pode ser visto na Figura 1.1 (VÍTEK et al., 2016).



Figura 1.1 - Ligação entre elementos de concreto preenchido com UHPC (Fonte: VÍTEK et al., 2016)

Li e Rangaraju (2016) corroboram que, devido aos inúmeros benefícios do UHPC, o mesmo é adequado para ser utilizado na região da ligação na construção de pontes que utilizam elementos

pré-moldados de concreto, sendo um material apropriado para a construção de chaves de cisalhamento, pois as mesmas precisam ser resistentes e duráveis.

Tayeh, Bakar e Johari (2012) apresentaram a utilização do UHPC como recuperação ou fortalecimento de estruturas de concreto antigo, sendo que, nesse tipo de utilização, o ponto crítico consiste na ligação entre esses dois materiais, devendo apresentar desempenho satisfatório para não ocasionar ruptura nessa região.

Diante dos argumentos, a pesquisa em questão consiste em estudar a transferência dos esforços solicitantes na interface do concreto de alta resistência (CAR) e o UHPC, justificada pelos itens:

- O uso do CAR nas fábricas de pré-moldados tem-se tornado uma prática comum em vista da necessidade de produtividade dos elementos de concreto em ambiente fabril;

- O UHPC é um material que possui um custo elevado em relação ao concreto convencional, favorecendo a sua utilização em pontos estratégicos no sistema estrutural, principalmente em regiões de maiores esforços solicitantes. A presença das fibras nesse concreto faz-se necessária para garantir maior ductilidade e evitar o comportamento frágil;

- As ligações de elementos pré-fabricados acaba sendo um dos pontos mais difíceis de execução nesse sistema construtivo e a utilização do UHPC como material de preenchimento proporciona um projeto mais simplificado, pelo fato de possuir propriedades mecânicas elevadas;

- A associação de dois concretos com propriedades distintas acaba tornando um elo crítico, em virtude dos diversos fatores que influenciam a ligação: grau de rugosidade da superfície, classe de resistência dos concretos e diferentes esforços solicitantes atuando na interface;

- Investigação dos tipos de superfície na interface do CAR e UHPC e de parâmetros que possam correlacionar a resistência com os deslocamentos e as deformações da interface de concretos moldados em etapas distintas faz-se necessária na obtenção de valores mínimos de resistência e determinação de parâmetros de rigidez para aplicação em projetos estruturais;

- O estudo experimental da interface de concretos moldados em etapas distintas vinculado ao modelo numérico permite melhor entendimento em relação ao comportamento do sistema estrutural com a aplicação do UHPC em pontos estratégicos na estrutura.

1.1 Objetivos

Estudar os fenômenos que ocorrem na interface do concreto de alta resistência (CAR) e o concreto de altíssimo desempenho reforçado com fibras de aço (UHPC). Os concretos foram

moldados em etapas distintas, mediante a variação dos tipos de superfície executadas no CAR com posterior preenchimento em UHPC.

Os objetivos específicos do trabalho foram:

- a) Avaliar a influência do tratamento e da rugosidade da interface do CAR e o UHPC na resistência e rigidez;
- b) Analisar a resistência, os mecanismos de ruína e rigidez da interface obtidos de diferentes métodos de ensaios: tração na flexão, cisalhamento direto, cisalhamento inclinado e tração por compressão diametral.
- c) Representar numericamente os ensaios realizados considerando os parâmetros de interface (rigidez, resistência e dano);

1.2 Metodologia empregada

A metodologia empregada no trabalho consistiu: determinação dos tipos de tratamento a serem feitos no CAR para receber o UHPC; caracterização da rugosidade nas superfícies realizadas no CAR; associação das partes, CAR e UHPC; analisar o comportamento das interfaces através dos ensaios; determinação da resistência e rigidez das interfaces; execução da modelagem numérica com base nas propriedades obtidas experimentalmente.

Tratamentos superficiais foram executados no CAR com o intuito de caracterizar a rugosidade das superfícies. Realizou-se a medição por coordenadas e pelo método da mancha de areia, para definir os perfis e extrair os parâmetros de rugosidade. Os mesmos foram correlacionados com as resistências obtidas dos ensaios.

Após a moldagem e os tratamentos superficiais nos modelos feitos com CAR efetuou-se a união com UHPC para realizar os ensaios de caracterização e determinar a resistência e os deslizamentos na interface.

Com as resistências e os deslocamentos, obtidos dos ensaios de caracterização da interface, foram possíveis determinar os parâmetros de rigidez na direção normal e tangencial e aplicar no modelo numérico utilizando o software Abaqus para comparar com os resultados experimentais.

2. EMBASAMENTO TEÓRICO

2.1 Concreto de alta resistência (CAR) em pré-moldados

A prática de confeccionar concretos com resistência à compressão elevada, também conhecido como Concreto de Alta Resistência (CAR), é um dos pontos positivos no sistema

construtivo em pré-fabricados diante da agilidade de produção. Isso é mais evidenciado nas peças protendidas, necessitando de rapidez na liberação das pistas e seções transversais reduzidas que consigam resistir aos mesmos esforços dos elementos de concreto convencional.

Em virtude da velocidade de produção das obras pré-fabricadas, o acabamento final das peças precisa ser o melhor possível, evitando tratamentos superficiais. Diante disso surge a necessidade de usar agregados miúdos e maiores teores de cimento e adições na mistura de concreto, requerendo elevadas dosagens de superplastificantes para aumentar a trabalhabilidade, conferindo o ganho de resistência à compressão. Outro fator que contribui para a produção do CAR nas fábricas de concreto consiste nas atividades envolvidas no processo fabril: especificações dos materiais, processo de moldagem e mistura, transporte dos materiais até o local do trabalho e o tipo de cura efetuada.

Em relação as especificações dos materiais, pode-se destacar a questão da rastreabilidade e a sua origem, além das condições de armazenamento, na qual os mesmos ficam condicionados em locais específicos, evitando a contaminação com outros materiais. O processo de dosagem e mistura dos materiais é automatizado, minimizando os erros e garantido melhor homogeneização da mistura. A questão do transporte, lançamento e adensamento do concreto recém-misturado até o local da moldagem, de modo geral, é mecânico ou automatizado, minimizando o contato humano. As condições de cura, executada de uma maneira mais controlada em relação as obras moldadas no local, acaba conferindo um ganho de resistência à compressão.

Pela classificação brasileira, segundo a ABNT NBR 8953: 2015, o concreto é subdividido em dois grupos: grupo I compreende os concretos com resistência à compressão de até 50 MPa e o grupo II aqueles com resistência à compressão variando de 55 MPa à 100 MPa. Para concretos de resistência superior não existe classificação pela norma brasileira, necessitando recorrer a normas e artigos internacionais.

De acordo com o American Concrete Institute – Report on High-Strength Concrete (ACI, 2010), o valor da resistência à compressão usada na classificação do concreto de alta resistência é de 55 MPa. Ainda nesse contexto, o ACI (2010) corrobora que a definição do limite de resistência para classificação do concreto como sendo de alta resistência à compressão sofre variação para cada região, sendo que, nas regiões onde o concreto comercial tem resistência à compressão de 62 MPa, o valor limite para definição do concreto de alta resistência à compressão pode variar de 83 MPa à 103 MPa e, nas regiões onde a resistência à compressão do concreto comercial é de 34 MPa, a resistência limite para aceitabilidade como concreto de alta resistência é de 62 MPa.

2.2 Concreto de altíssimo desempenho reforçado com fibras (UHPC) e seu uso em ligações

A evolução do CAR condiciona ao concreto de altíssimo desempenho, sendo que, para aprimorar as propriedades mecânicas excluiu-se o agregado graúdo da sua composição e aumentou a quantidade de finos e adições minerais, conferindo assim impermeabilidade do material, tornando mais durável. No entanto, para garantir a mesma trabalhabilidade e manter as propriedades mecânicas elevadas do concreto foi necessário o acréscimo de superplastificante e menor relação água/materiais cimentícios. O precursor desse concreto foi Pierre Richard em 1990. Pelo fato de conter somente agregado miúdo, o material deveria ser denominado como argamassa, mas a presença das fibras de aço nessa mistura garante a mesma função estrutural do concreto armado, por isso a nomenclatura de concreto de altíssimo desempenho reforçado com fibras (UHPC) (AÏTCIN, 2008).

O ganho de resistência à compressão no UHPC gera um comportamento frágil e pequenas deformações para o nível de resistência atingido. Para eliminar a ruptura explosiva e garantir maior ductilidade do UHPC recorre-se ao emprego de fibras com variados tamanhos e formatos. As mesmas precisam ter valores elevados de resistência e módulo de elasticidade para atuar como ponto de transferência dos esforços. Diante disso, as fibras de aço acabam sendo a melhor opção para a mistura de concreto. Porém o teor de fibras adicionado está relacionado aos requisitos especificados para a sua finalidade estrutural.

De acordo com Mehta e Monteiro (2014) os compósitos reforçados com fibras podem ser classificados em função do volume de fibras na mistura: baixa fração volumétrica (1%), na qual as fibras tem a função de reduzir a fissuração por retração; moderada (1% - 2%) e alta fração volumétrica (maior que 2%), em que a presença das fibras nessas frações aumentam o módulo de ruptura, tenacidade à fratura e resistência ao impacto dos elementos, gerando maior capacidade de absorção de energia.

Li e Fisher (2002) relatam que o concreto e a argamassa são materiais que possuem matrizes frágeis, perdendo sua capacidade de tração quase após a formação da primeira fissura da matriz. A adição de fibras nesse material aumenta a sua tenacidade, evitando a ruptura frágil, no entanto a resistência à tração e a capacidade de deformação até a formação da primeira fissura não sofrem significativas alterações.

Segundo Aïtcin (2008), o UHPC é baseado nos seguintes preceitos:

- Aumento na homogeneidade do material em virtude da ausência de partículas grossas;
- Limitação da quantidade de areia para evitar o contato entre si na mistura endurecida;
- Melhoria nas propriedades mecânicas da pasta de cimento hidratada;

- Eliminação da zona de transição na interface da pasta hidratada / agregados;

- Aumento da compacidade da matriz pelo aprimoramento do tamanho dos grãos que são usados no preparo da mistura.

- Refinamento da microestrutura da pasta endurecida por um tratamento de calor.

Fehling et al. (2014) expõem que, para produzir concretos de altíssimo desempenho com valores de resistência à compressão em torno de 150-200 MPa, deve-se atentar para as seguintes condições:

- O tamanho máximo do agregado utilizado na composição deve ser menor que o agregado utilizado nas misturas convencionais. Atualmente, o tamanho máximo de agregado para concreto de altíssimo desempenho não ultrapassa 2,00 mm;

- A quantidade de água deve ser suficiente para que todo o cimento seja hidratado, sendo que, o restante das partículas não hidratadas deve atuar como enchimento;

Racky (2004) e Tam et al. (2011) apresentam vantagens e desvantagens do UHPC em relação ao concreto convencional:

Vantagens:

- Propriedades mecânicas elevadas, refletindo em elementos de concreto com seções transversais reduzidas, minimizando o peso próprio da estrutura, além de permitir a execução de estruturas mais esbeltas, com custo total menor e maior aproveitamento do espaço útil em prédios.

- As seções transversais reduzidas acarretam em menor custo de transporte nas estruturas pré-moldadas;

- Maior durabilidade, aumentando a vida útil das estruturas e reduzindo a manutenção e reparo. Pelo fato de o UHPC ser um material quase impermeável, minimiza o processo de carbonatação ou penetração de cloretos e sulfatos e maior resistência ao gelo / degelo;

- Redução de impacto ambiental causado pelos resíduos de construção em caso de demolição no final da vida útil da construção em virtude das dimensões reduzidas das seções transversais;

- A redução ou eliminação de barras de aço reduz o custo da mão-de-obra, proporcionando maior liberdade arquitetônica, com execução de estruturas em diferentes formatos e atendendo melhor aos requisitos de sustentabilidade;

Desvantagens:

- Elevado teor de cimento, em torno de 800 - 1000 kg / m³, gerando efeitos negativos em relação ao calor de hidratação, podendo causar problemas de fissuração;

-É um material caro e não pode substituir o concreto convencional na maioria das aplicações onde as misturas convencionais podem suprir o critério de desempenho;

-Material relativamente novo que requer medidas adicionais para garantia de qualidade, como relatórios de especialistas;

-Não há uma normatização específica consolidada para o dimensionamento e uso do material UHPC, mas recomendações de projeto;

A ligação nas estruturas de concreto pré-moldado acaba sendo um elo crítico na transferência dos esforços entre os elementos, principalmente as que precisam ser executadas com preenchimento de concreto. Por possuir propriedades mecânicas elevadas, maior ductilidade e custos relativamente superiores, o UHPC tem sido muito usado nesses pontos estratégicos, que requerem maiores solicitações de esforços internos, cujo concreto convencional não consegue resistir.

Lagier, Massicotte e Charron (2016) citam que a resistência à tração do concreto é de elevada importância na resistência última do traspasse das armaduras, cujo mecanismo de resistência para ancorar o reforço da barra depende da resistência à tração e da energia pós-fissuração do concreto. Diante dessa necessidade, o UHPC aparece como uma alternativa em virtude da sua excelente propriedade de resistência à tração e capacidade de absorção de energia após a fissuração. Os autores afirmam que o uso do UHPC pode reduzir o comprimento de traspasse das armaduras, alcançando a máxima resistência das barras que é dependente do comportamento do concreto na ligação, além de simplificar os detalhes construtivos, reduzindo o trabalho no local e melhorando a durabilidade das ligações.

Maya et al. (2013) relatam em seu artigo que, nas estruturas de concreto pré-moldado, a ligação viga-pilar com reforço longitudinal é usualmente executada para estruturas resistentes a momento fletor e são consideradas como um fator importante devido à alteração do sinal do momento na ligação. Diante dessa situação e com o desenvolvimento do UHPC, os autores realizaram um estudo experimental para avaliar o uso do UHPC em emendas curtas com traspasse de barras utilizadas nas ligações de continuidade viga-pilar.

Na primeira etapa do ensaio, Maya et al. (2013) realizaram ensaios de flexão para avaliar experimentalmente o comportamento do traspasse das barras de aço com comprimento reduzido nos elementos submetidos a flexão simples. Os elementos ensaiados foram duas vigas pré-moldadas ligadas na região central pelo traspasse das armaduras e preenchida com UHPC. Para a segunda etapa do ensaio, Maya et al. (2013) analisaram uma ligação viga-pilar com comprimento de traspasse reduzido. Os autores notaram que a interface do concreto normal e do UHPC definiu uma

seção de descontinuidade e as principais fissuras foram observadas nessa interface ou próximo a ela (Figura 2.1).



Figura 2.1 - Detalhe da descontinuidade na interface do concreto normal e o UHPC (Fonte: MAYA et al., 2013)

Husein et al. (2017) realizaram vários estudos experimentais para determinar o comportamento da capacidade resistente da chave de cisalhamento feita de UHPC colocada entre dois elementos de concreto de alta resistência (CAR). As chaves de cisalhamento, usadas no projeto de superestrutura de ponte, são espaços deixados entre as vigas e preenchidas com argamassa (Figura 2.2). Devido ao tráfego e cargas ambientais, tensões de cisalhamento, flexão e normais de tração são geradas na ligação entre as chaves e os elementos de CAR. A configuração da ligação e a idade diferente da argamassa de preenchimento da chave, em relação ao elemento de CAR, gera fissuras longitudinais nas interfaces dos concretos. Nos estudos do preenchimento da chave de cisalhamento com UHPC os autores concluíram que a ruptura do elemento ocorre de maneira dúctil, sem formação de fissuras.

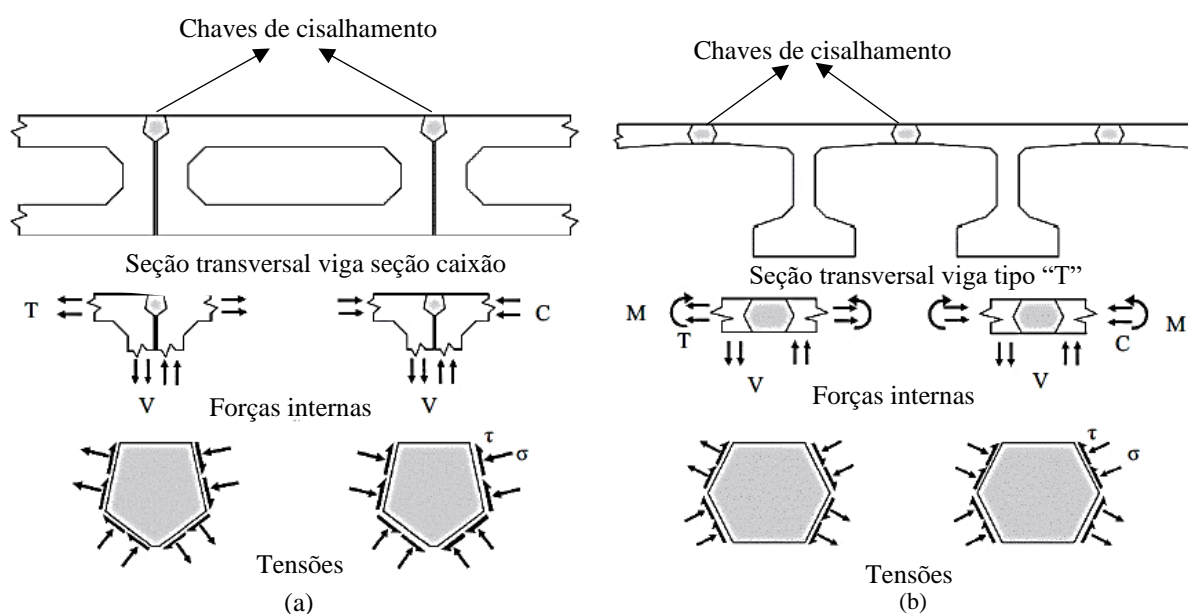


Figura 2.2 - Seções transversais típicas de ponte e distribuição dos esforços: (a) viga caixão adjacente; (b) viga de seção "T" (Fonte: HUSEIN et al., 2017)

2.3 Mecanismos resistentes da ligação entre dois concretos

A prática de associar concretos em etapas distintas de produção confere a denominação de elementos compostos ou estruturas compostas. De acordo com o MC-10 (fib, 2013) a associação entre dois concretos pode ser usada nas seguintes situações: reparação e reforço de elementos de concreto através de novas camadas de concreto; complementação de elementos de concreto pré-moldado com a utilização de concreto moldado no local; quando ocorre a interrupção no processo de concretagem e o novo concreto é lançado contra o concreto endurecido; elementos de concreto a ser instalados em elementos de concreto existentes para a introdução de carga.

Conforme o MC-10 (fib, 2013), a transferência dos esforços entre dois concretos está vinculada aos seguintes mecanismos:

-Transferência adesiva: ocorre devido ao efeito químico dos componentes do concreto fresco com o concreto endurecido, em que o gel de cimento envolve os agregados do concreto endurecido, formando uma ligação entre eles. No entanto, qualquer contaminação superficial pode comprometer este efeito. El Debs (2017) corrobora que esta parcela é limitada a solicitações baixas, pois assim que ocorre o deslizamento muito pequeno na superfície, a mesma é destruída.

-Transferência mecânica: relacionada ao intertravamento dos agregados e a rugosidade superficial do concreto. Considerando a interface dos concretos submetidos simultaneamente a tensões de cisalhamento e normais de compressão, depois que a ligação química é perdida o intertravamento dos agregados começa a atuar, tendendo a se separar devido as tensões de cisalhamento.

Os parâmetros que influenciam a transferência adesiva e mecânica são, de acordo com o MC-10 (fib, 2013):

- Rugosidade da superfície;
- Classe de resistência e rigidez do concreto novo e velho;
- Qualidade da camada superior do concreto velho;
- Porosidade e grau de umidade do concreto velho;
- Qualidade, composição e propriedade do concreto novo fresco;
- Idade do concreto;

-Transferência por atrito: a força de compressão perpendicular à interface permite o desenvolvimento de forças de atrito que está relacionada à intensidade da força normal e a

rugosidade superficial. A parcela da força de atrito pode ser intensificada com a presença de armaduras costurando a interface, que contribui para a resistência ao cisalhamento em relação ao efeito de pino e ao efeito do atrito-cisalhamento.

A resistência final da união entre os dois concretos consiste na sobreposição dos efeitos gerados: transferência adesiva, transferência mecânica, transferência por atrito e efeito de pino. A atuação da ação dos esforços vai ocorrer em diferentes etapas, sendo que, dependendo da superfície, da taxa de armadura da interface e das propriedades do concreto, alguns efeitos podem se sobressair em relação a outros.

Na interface dos concretos das estruturas compostas as tensões de cisalhamento são predominantes, na qual a resistência é governada pela transferência mecânica e adesiva. No entanto podem haver outros esforços, como as tensões de tração, resistida pelo mecanismo de adesão, e os esforços combinados, como tensões de cisalhamento e normal, resistida pela transferência adesiva e mecânica com o acréscimo da transferência por atrito, desenvolvida devido ao efeito da força normal.

De acordo com Randl (2013) nas estruturas compostas submetidas as tensões de cisalhamento interagem-se os vários mecanismos de transferência descritos em relação à interface. Após a falha da ligação adesiva, à medida que o deslizamento devido ao cisalhamento aumenta, o efeito do atrito devido ao intertravamento dos agregados também diminui rapidamente. A presença das armaduras cruzando a interface faz com que a transferência por atrito aumenta à medida que o deslizamento por atrito se torna maior. Randl (2013) cita que a contribuição real de cada um dos mecanismos para a resistência ao cisalhamento ao longo da interface dos concretos depende fortemente do nível de rugosidade, qualidade do concreto na ligação e quantidade de reforço na interface.

O MC-10 (fib, 2013) cita que a resistência última da interface de concretos moldados em etapas diferentes, sujeita a forças de cisalhamento, pode ser distinguida em dois comportamentos, de modo geral:

- Ligação adesiva forte - ligação rígida: a ligação adesiva é o principal mecanismo de contribuição na resistência ao cisalhamento. Nessa ligação, a presença de uma pequena taxa de reforço na intersecção da interface ($\rho \leq 0,05\%$) não deve ser levado em consideração.
- Ligação adesiva fraca - ligação não-rígida: o atrito-cisalhamento e o efeito de pino são os principais mecanismos de contribuição para a resistência ao cisalhamento. A quantidade de reforço é considerável ($\rho \geq 0,05\%$), as deformações são bem maiores e, as forças de atrito e a ação de pino são ativadas em função do deslizamento gerado pelo reforço.

2.4 Ensaios para avaliar as propriedades das interfaces

De acordo com Espeche e León (2010) alguns pesquisadores tentaram relacionar diferentes ensaios para caracterizar a resistência da interface com o critério de ruptura. Os ensaios de caracterização da resistência na ligação podem ser classificados de acordo com o método para produzir as tensões interfaciais, existindo três principais grupos: tração, podendo ser determinada a resistência à tração de forma direta (Figura 2.3-a) ou indiretamente (Figura 2.3-b, c, d); cisalhamento (Figura 2.4-e, f, g, h), na qual teoricamente é considerado puro, mas na prática tal situação é difícil de ser alcançada, podendo ocorrer a atuação de momento fletor das forças; e um estado combinado de cisalhamento e compressão (Figura 2.5-i, j).

Soetens e Matthys (2017) citam que os ensaios mais usados para investigar a resposta ao cisalhamento direto do concreto simples e armado, sem que ocorra o efeito da flexão para manter um estado puro de cisalhamento, são: ensaio de cisalhamento direto do tipo Z, em que duas peças de concreto com formato tipo “L” são ligadas entre si (Figura 2.4-e); ensaio de cisalhamento direto com encaixe duplo, que consiste no prisma com entalhe duplo para induzir um plano de fissura mais controlado (Figura 2.4-g); ensaio de cisalhamento direto com encaixe simples feito no prisma com entalhe no meio do vão (Figura 2.4-f).

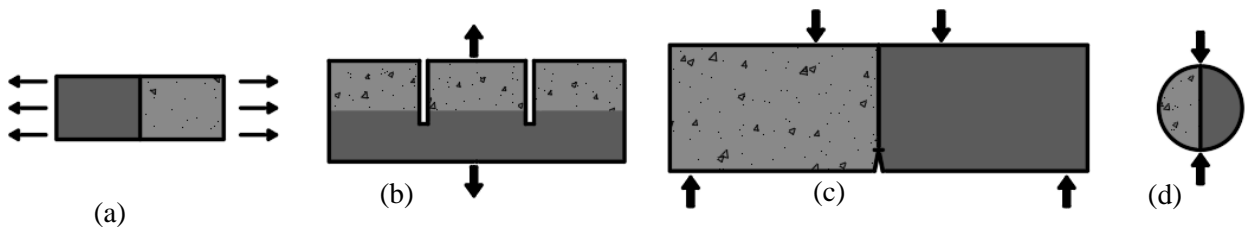


Figura 2.3 - Representação esquemática dos modelos de ensaio de tração (Fonte: ESPECHE E LEÓN, 2010)

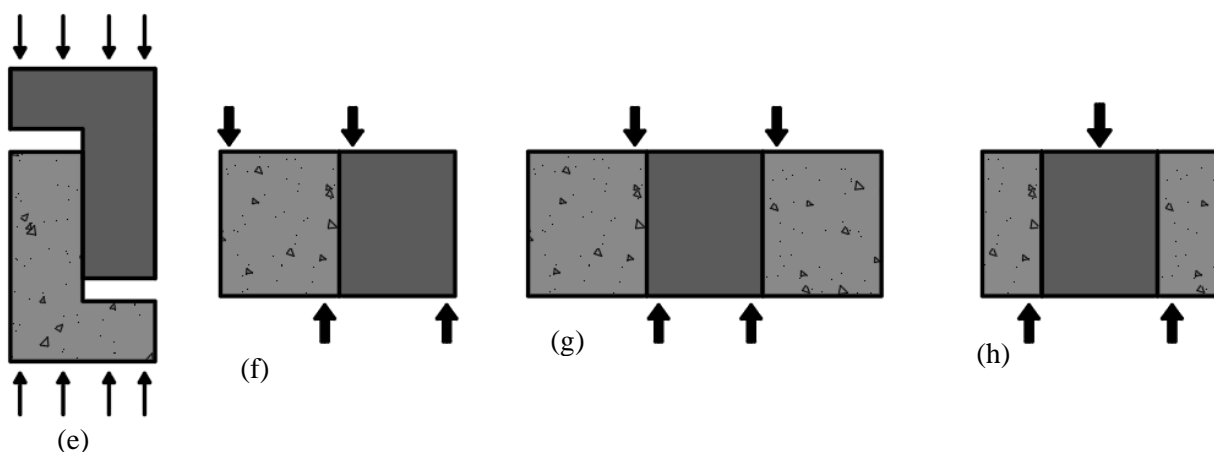


Figura 2.4 - Representação esquemática dos modelos de ensaio de cisalhamento (Fonte: ESPECHE E LEÓN, 2010)

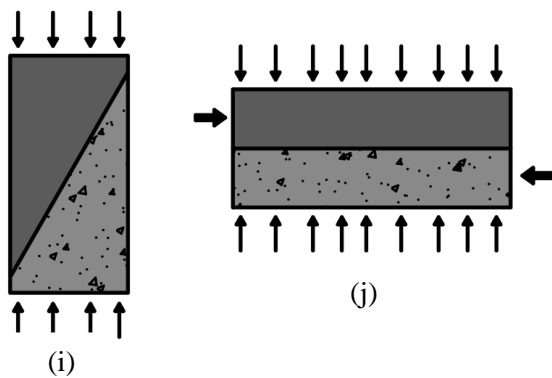


Figura 2.5 - Representação esquemática dos modelos de ensaio de cisalhamento combinado com compressão (Fonte: ESPECHE E LEÓN, 2010)

Para avaliar os mecanismos de esforços na interface, no presente trabalho foram abordados os ensaios de resistência à tração na flexão (Figura 2.3-c) e resistência à tração por compressão diametral (Figura 2.3-d) relacionado a adesão, ensaio de resistência ao cisalhamento direto (Figura 2.4-e) relativo a transferência mecânica e adesiva e, para analisar o efeito combinado da tensão de compressão e cisalhamento, com o acréscimo da transferência por atrito, foi realizado o ensaio de cisalhamento inclinado (Figura 2.5-i). Em relação ao efeito da compressão, como esse esforço é favorável para o concreto e não é considerado um ponto crítico, não foi realizado nenhum tipo de ensaio.

2.4.1 Ensaio de resistência à tração na flexão

O ensaio consiste em determinar a resistência à tração em peças de concreto solicitadas à flexão pura. A ABNT NBR 12142: 2010 estabelece o método de ensaio de tração por flexão de corpos de prova de concreto, empregando o princípio de viga simplesmente apoiada com duas forças concentradas nos terços do vão (Figura 2.6), calculado de acordo com a Equação (2.1). O ensaio é realizado em peças de concreto homogênea, mas adaptações podem ser feitas para analisar a interface de elementos de concreto moldados em idades diferentes (LI e RANGARAJU, 2016; HUSEIN et al., 2017).

De acordo com as recomendações do RILEM 89-FMC (RILEM, 1989), conforme indicado na Figura 2.6, a razão entre a distância dos apoios e a altura (l/d) da amostra deve ser pelo menos de 2,5 e a razão da profundidade do entalhe e a altura da viga (a/d) deve estar entre 0,15 e 0,5. Para induzir a ruptura na região da interface pode ser feito um entalhe, cuja a largura (e) deve ser tão pequena quanto possível e não deve exceder 0,5 o tamanho do agregado máximo. O RILEM 50 FMC (RILEM, 1985) recomenda que a largura (e) do entalhe na ponta deve ser inferior a 10 mm.

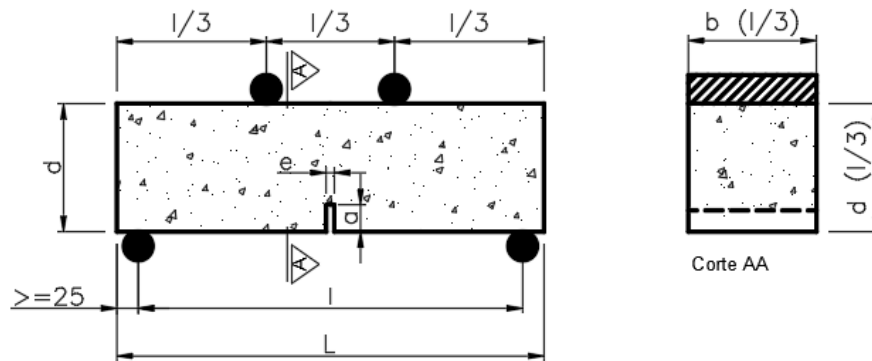


Figura 2.6 - Geometria das amostras sugeridas (Fonte: Adaptado de RILEM 89-FMC, 1989)

$$f_{ct,f} = \frac{F_{ruptura} \cdot l}{b \cdot d^2} \quad (2.1)$$

2.4.2 Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

A norma ABNT NBR 7222: 2011 consiste na determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos para concreto e argamassa, calculada de acordo com a Equação (2.2). Mesmo que o método seja usado para caracterizar corpos de prova homogêneo, adaptações podem ser feitas no ensaio para determinar a resistência da interface de dois concretos moldados em etapas distintas (ESPECHE E LÉON, 2011; GAO et al., 2018; ZHANG et al., 2020; TAYEH et al., 2012).

$$f_{ct,sp} = \frac{2F_{ruptura}}{\pi \cdot d \cdot l} \quad (2.2)$$

2.4.3 Ensaio de resistência ao cisalhamento direto

A transferência por cisalhamento nas interfaces de concreto ocorrem em diversas situações, principalmente nas estruturas pré-moldadas, cuja pratica de associar concretos com idades diferentes é mais usual do que nas estruturas de concreto moldadas no local. Mattock e Hawkins (1972) relatam que alguns dos fatores que afetam a transferência da resistência ao cisalhamento são: (1) característica do plano de cisalhamento; (2) característica da armadura que atravessa a região do plano de cisalhamento; (3) resistência do concreto; (4) tensões diretas agindo paralela e transversalmente ao plano de cisalhamento. Esses fatores podem ser estudados no ensaio de cisalhamento direto.

O ensaio de cisalhamento direto não é normatizado, porém é reconhecido e muito usado para estudar os mecanismos de transferência dos esforços de cisalhamento ao longo de um plano. O

elemento solicitado a ação de uma força concentrada distribui todos os esforços internos gerados por essa força para o plano conhecido. O ensaio apresenta boa facilidade de execução e é relativamente barato, pois não exige peças especiais para sua efetivação.

Armaduras cruzando a interface do corpo de prova são colocadas quando se deseja estudar o efeito combinado da resistência ao cisalhamento na interface dos concretos na presença da armadura. É usual a colocação de armaduras adicionais fora do plano de cisalhamento da interface para que não ocorra falha prematura da peça de concreto antes da ruptura da interface.

Vários autores adotaram o ensaio de cisalhamento direto tipo Z para caracterizar a resistência ao cisalhamento de interfaces de concretos, calculada de acordo com a Equação (2.3) (HUSSEIN et al., 2017; JANG, et al., 2018; LIU, et al., 2019; WU, et al., 2019; LEBLOUBA, et al., 2019).

$$\tau_{\text{último}} = \frac{F_{\text{ruptura}}}{A_{\text{conc}}} = c \quad (2.3)$$

2.4.4 Ensaio de resistência ao cisalhamento inclinado

A norma ASTM C882 / C882M: 2013 – Método de ensaio para resistência à aderência de sistema de resina epóxi usada em concreto, também denominada cisalhamento inclinado, consiste no ensaio para caracterizar a resistência da ligação entre dois concretos endurecidos ou misturados na hora e colados com uma interface de resina epóxi. Mesmo que o ensaio seja para caracterizar esse tipo de ligação, autores tem adotado o método para investigar o comportamento da interface de dois concretos moldados em etapas distintas, usando diferentes geometria de corpos de prova e ângulos de inclinação variado (SANTOS E JULIO, 2011; TAYEH et al. 2013; HARRIS, et al. 2015; ZANOTTI E BANTHIA, 2016; AALETI E SRITHARAN, 2017; WICHERT, 2019; JAFARINEJAD et al. 2019; SMENDARY E SVECOVA, 2020).

De acordo com Zanotti e Bantthia (2016) o ensaio de cisalhamento inclinado consiste em um dos métodos de caracterização do estado de tensão da interface de dois materiais. O resultado fornecido pelo ensaio é uma combinação de tensões de cisalhamento e compressão ao longo da interface, conforme apresentado na Figura 2.7. De acordo com os autores, o ensaio de cisalhamento inclinado é considerado um ensaio de fácil execução e com coeficientes de variações inferiores aos obtidos em outros ensaios. No entanto, as informações fornecidas pelo ensaio de cisalhamento inclinado podem ser enganosas, porque podem não ser totalmente representativas em relação ao tipo de interface analisada, já que a falha é dependente do ângulo de inclinação (α), impedindo que a mesma ocorra em um plano diferente (ZANOTTI E BANTHIA, 2016). A geometria proposta na

ASTM C882 / C882M: 2013 corrobora um ângulo de inclinação na região da interface com a vertical de 30°.

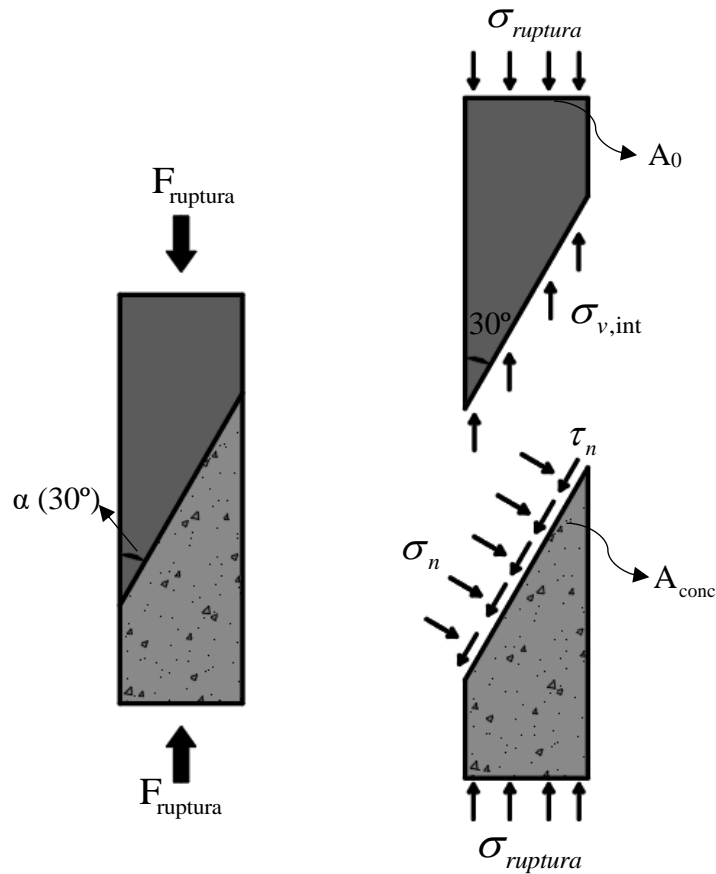


Figura 2.7 - Esforços envolvidos no ensaio de cisalhamento inclinado (Fonte: ZANOTTI E BANTHIA, 2016)

De acordo com a teoria de Coulomb, o critério de falha do material na interface por tensão de cisalhamento (τ_n) combinado com tensão normal (σ_n) ocorre quando a Equação (2.4) é satisfeita.

$$\tau_n = c + \sigma_n \cdot \mu = c + tg(\phi) \cdot \sigma_n$$

$$\mu = \frac{\tau_n - c}{\sigma_n} \tag{2.4}$$

Baseado na teoria de Coulomb usada para descrever o critério de falha por cisalhamento da ligação, Austin, Robins e Pan (1999) desenvolveram um método analítico que correlaciona a tensão de cisalhamento e a tensão normal com o ângulo de inclinação entre a interface da ligação e o eixo longitudinal, Equações (2.5) e (2.6), respectivamente. Deste modo, a tensão aplicada para gerar a falha por cisalhamento ao longo da interface pode ser escrito pela Equação (2.7).

$$\tau_n = 0,5 \cdot \sigma_0 \cdot \sin 2\alpha \tag{2.5}$$

$$\sigma_n = \sigma_0 \cdot \sin^2 2\alpha \tag{2.6}$$

$$\sigma_0 = c[\cot \alpha + \tan(\phi + \alpha)] \quad (2.7)$$

A fim de maximizar a probabilidade de falha na ligação, Austin, Robins e Pan (1999) criaram uma expressão do ângulo crítico (α_{crit}) que corresponde a força de ruptura mínima para a ligação (Equação (2.8)) e as forças de ligação mínima associadas a esse ângulo (Equações (2.9) e (2.10)).

$$\alpha_{crit} = 45 - \frac{\phi}{2} \quad (2.8)$$

$$\sigma_{min} = 2c \cdot \tan(45 + \frac{\phi}{2}) \quad (2.9)$$

$$\tau_{crit} = c(1 + \sin \phi) \quad (2.10)$$

2.5 Tipos de interfaces na ligação entre o concreto e UHPC

A junção de dois concretos em idades distintas requer alguns cuidados especiais, tanto na superfície do concreto endurecido quanto na superfície do concreto novo, pois o mesmo precisa ter um bom grau de adensamento e cura. Em relação à superfície do concreto endurecido, a mesma precisa estar livre de impurezas, ter um certo grau de umidade para não absorver a água do concreto novo e uma rugosidade, pois a área de contato entre os dois concretos acaba sendo maior.

Segundo a publicação do Eurocode 2 (CEN, 2004), a rugosidade da superfície pode ser dividida em quatro casos básicos:

-Superfície muito lisa: obtida com o uso de forma metálica, madeira ou plástico;

-Superfície lisa: obtidas com alisamento da superfície ou sem tratamento adicional após a vibração;

-Superfície rugosa: texturizada, por exemplo, com o uso de tela de metal expandida presa à forma durante a concretagem para dar o formato; com agregado exposto, seja pelo processo de vibração ou pelo lixamento com o uso de aditivo retardador de pega na superfície; superfície em que o concreto fresco foi jateado com água ou areia para expor o agregado.

-Superfície chanfrada: superfície propositadamente rugosa, como a moldagem da chave de cisalhamento;

Li e Rangaraju (2016) investigaram o efeito da rugosidade da superfície no concreto pré-moldado através do tratamento superficial com jato de areia durante 10 segundos, 30 segundos e 60 segundos em superfície de concreto serrada e moldada para receber o UHPC. Os autores observaram que a resistência na ligação obtida usando uma superfície moldada foi mais fraca do que quando foi usada a superfície serrada e concluíram que o jateamento com areia durante 10 segundos foi

suficiente para alcançar o comportamento da aderência adequada entre o UHPC e o concreto pré-moldado.

Tayeh, Bakar e Johari (2012) estudaram cinco tipos de texturas superficiais no concreto convencional para receber o UHPC, sendo elas: lisa (AC), com jato de areia (SB), fio escovado (WB), com furos (DH) e com ranhuras (GR) (Figura 2.8). Os autores estabeleceram que a resistência na ligação entre os dois concretos, determinada através do ensaio de cisalhamento inclinado e ensaio de tração por compressão diametral, aumentou na seguinte ordem de superfície: superfície moldada < superfície com furos < superfície escovada < superfície com ranhuras < superfície com jato de areia (Figura 2.9), na qual a superfície com jato de areia foi a rugosidade mais eficiente, fornecendo maior resistência na ligação.

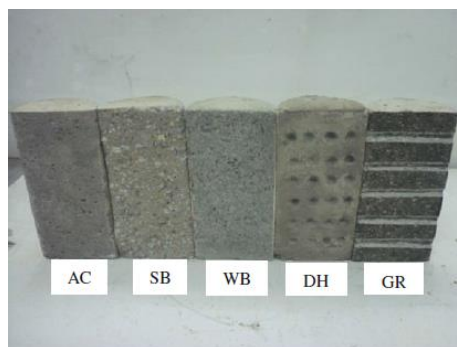


Figura 2.8 - Tipos de interfaces no concreto convencional (Fonte: TAYEH, BAKAR e JOHARI, 2012)

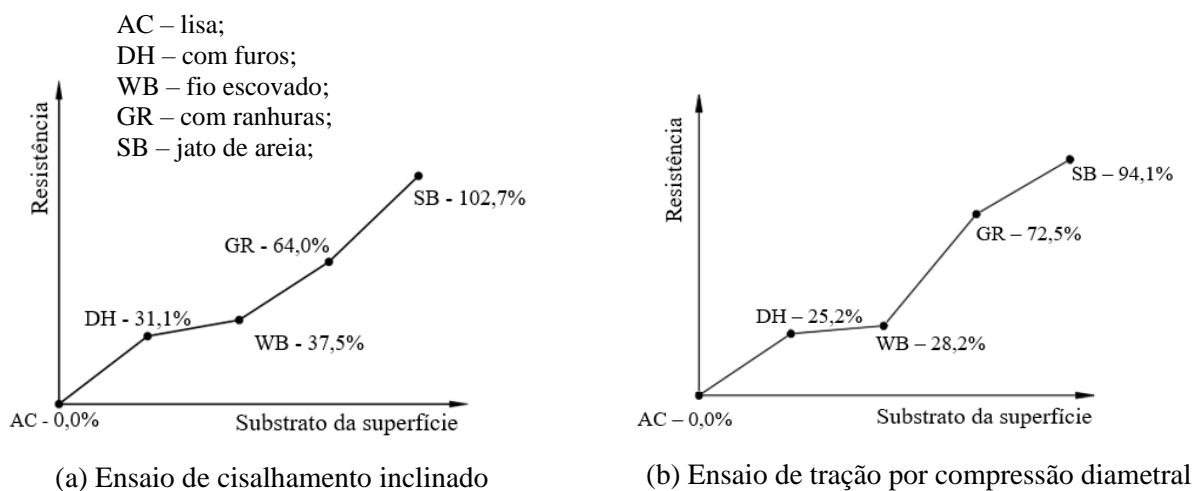


Figura 2.9 - Aumento relativo na resistência da ligação (Fonte: TAYEH, BAKAR e JOHARI, 2012)

Wichert, Matz e Empelmann (2019) estudaram diferentes tipos de tratamento na superfície do UHPC para aumentar a capacidade de aderência na ligação com a argamassa de alto desempenho: lisa (Figura 2.10-a); jato de areia (Figura 2.10-b); com furos de altura igual a 0,8 mm (Figura 2.10-c); com furos de altura igual a 10 mm (Figura 2.10-d). No ensaio de resistência ao cisalhamento inclinado da interface os autores concluíram que a superfície com furos apresentou maior resultado,

pois os furos não foram viáveis para garantir um total preenchimento da argamassa, mesmo sendo autoadensável.

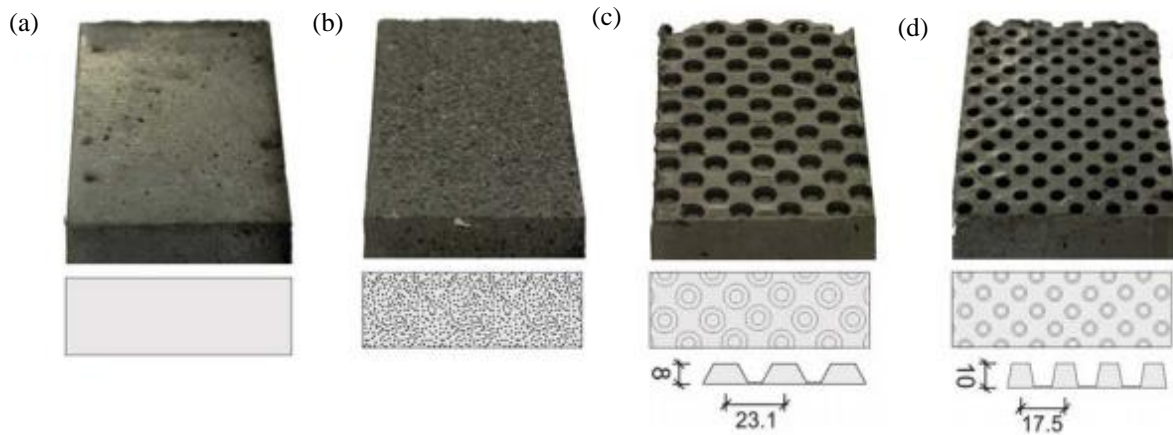


Figura 2.10 - Característica das interfaces: a) lisa, b) jato de areia, c) com furos de 8,0 mm, d) com furos de 10,0 mm (Fonte: WICHERT; MATZ; EMPELMANN, 2019)

Zhang et al. (2019) analisaram a resistência da interface do concreto de resistência normal e o UHPC pelo ensaio de cisalhamento direto. Os mesmos variaram o tipo da superfície no concreto normal: lisa, rugosa, com furos, nervurada e com vergalhões pré-instalados (Figura 2.11) e o teor de umidade: seco, úmido e úmido saturado. Sobre a rugosidade da interface, foi constatado que quanto maior o grau de rugosidade da interface maior é a capacidade de resistência ao cisalhamento, comprovando que essa resposta está vinculada com a adesão e o intertravamento mecânico dos componentes. Em relação ao teor de umidade, a resistência ao cisalhamento na interface e a força de formação de fissuras aumentou conforme o grau de umidade da superfície. As amostras tratadas com superfície úmida e super úmida aumentou 31,3% e 50,5% respectivamente, em comparação com a superfície de concreto seca, constatando que aumentar o grau de umidade da superfície de concreto pode melhorar significativamente a resistência ao cisalhamento da interface do concreto normal e o UHPC.

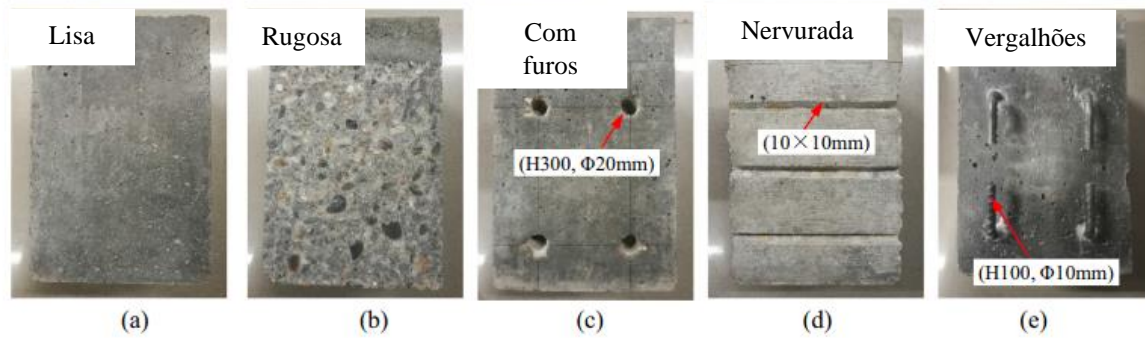


Figura 2.11 – Tipos de superfície executadas no concreto de resistência normal (Fonte: ZHANG et al., 2019)

2.6 Estado da arte da ligação entre o concreto e o UHPC

Diante das elucidações apresentadas, faz-se necessário o entendimento do comportamento dos esforços na interface do concreto e o UHPC através de estudos de diferentes ensaios de caracterização.

Li e Rangaraju (2016) investigaram o efeito da rugosidade da superfície no concreto pré-moldado e o UHPC com fibras de aço e sem fibras de aço, cujas propriedades estão indicadas na Tabela 2.1, através de diferentes métodos de ensaios de aderência: cisalhamento inclinado (Figura 2.12-a); resistência à tração na flexão (Figura 2.12-b); ensaio de arrancamento (Figura 2.12-c).

Para o ensaio de cisalhamento inclinado Li e Rangaraju (2016) observaram que os modos de falhas foram: falha no concreto pré-moldado, com maior quantidade de fissuras nesse concreto quando comparado com o UHPC; falha na ligação, com a perda de aderência na interface entre o concreto pré-moldado e o UHPC; falha em ambos os materiais, concreto pré-moldado e UHPC, com a formação das primeiras fissuras iniciais na porção de concreto pré-moldado se propagando para o UHPC quando ocorreu a ruptura da amostra (Figura 2.13). No ensaio de resistência à tração na flexão e no ensaio de arrancamento, o único modo de falha ocorreu no concreto pré-moldado, na qual indicou que tanto o UHPC 1 quanto o UHPC 2 tinham uma adequada aderência.

Considerando a consistência dos resultados e a facilidade de executar os ensaios, os autores concluíram que o ensaio de resistência à tração na flexão forneceu uma boa relação para determinar a aderência entre o concreto e o UHPC, logo o mesmo foi usado para estudar a influência da rugosidade da superfície com jato de areia. Os modos de falhas observados foram: falha no concreto pré-moldado e falha na interface da ligação entre o concreto pré-moldado e o UHPC, sendo que essa ocorreu somente quando o jato de areia não foi aplicado. Para a ligação submetida à flexão com rugosidade da superfície feita com jato de areia, Li e Rangaraju (2016) concluíram que a falha ocorreu na parte do concreto pré-moldado e o valor obtido para a tensão de ruptura foi

aproximadamente igual ao resultado obtido na resistência à flexão do concreto pré-moldado monolítico.

Tabela 2.1 - Propriedades mecânicas dos concretos usados no estudo (Fonte: LI; RANGARAJU, 2016)

Propriedade	Valor médio (7 dias) MPa	Valor médio (28 dias) MPa	Valor médio (56 dias) MPa
Concreto pré-moldado			
Resistência à compressão		49,1	49,2
Resistência à flexão		6,4	6,6
Módulo de elasticidade		28,961	
UHPC 1 (sem fibras)			
Resistência à compressão	87,5	123,5	
Resistência à flexão		13,9	
Módulo de elasticidade		53,468	
UHPC 2 (com fibras)			
Resistência à compressão	127,7	158,2	
Resistência à flexão		32,1	
Módulo de elasticidade		52,455	



(a)



(b)



(c)

Figura 2.12 - Amostras usadas nos ensaios de aderência: (a) cisalhamento inclinado; (b) resistência à tração na flexão; (c) ensaio de arrancamento (Fonte: LI; RANGARAJU, 2016)

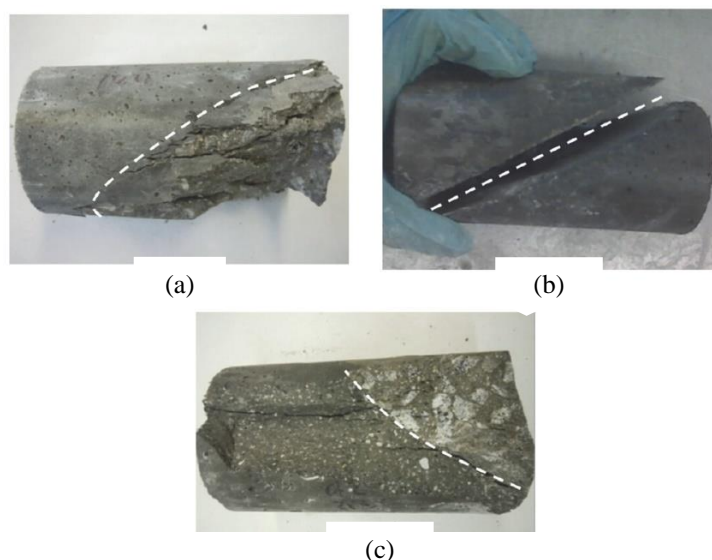
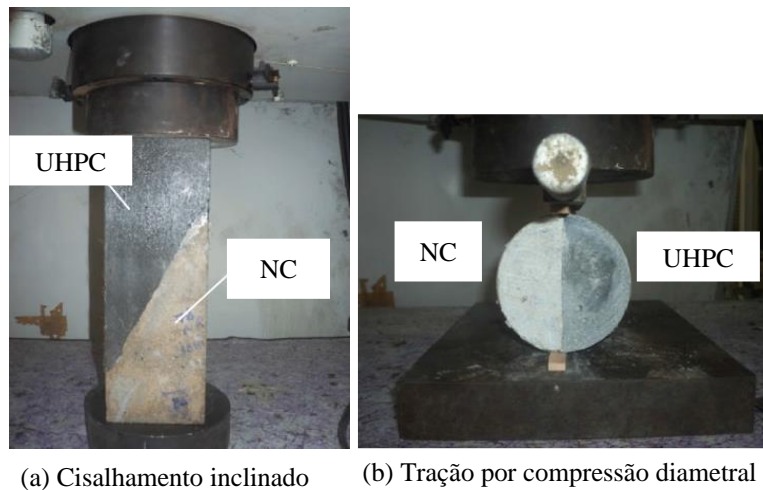


Figura 2.13 - Modos de falhas no ensaio de cisalhamento inclinado: (a) falha no concreto pré-moldado; (b) falha na ligação; (c) falha no concreto pré-moldado e UHPC (Fonte: LI; RANGARAJU, 2016)

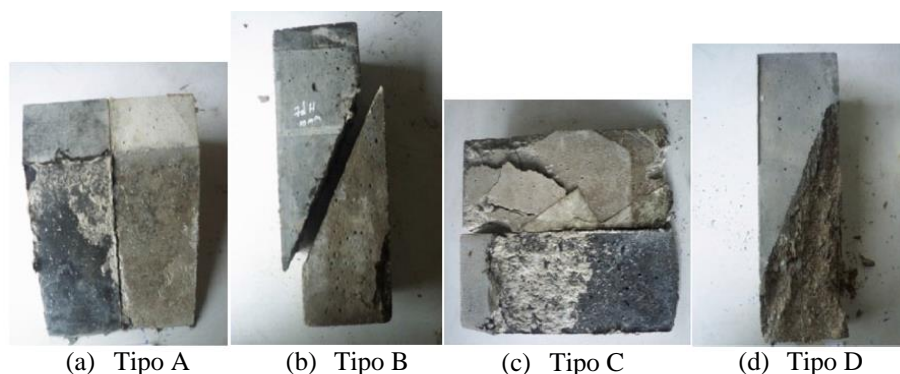
Tayeh, Bakar e Johari (2012) estudaram o efeito das características da superfície na ligação entre o concreto normal (NC), com resistência à compressão de 38 MPa e o UHPC, cuja resistência à compressão encontrada foi de 170 MPa, sendo ambos os valores de resistência para 28 dias. Para determinar a resistência da ligação entre os dois materiais foram executados o ensaio de cisalhamento inclinado, em amostras prismáticas de dimensão 100 x 100 x 300 (mm) e ângulo de inclinação de 30°, e o ensaio de tração por compressão diametral em amostras cilíndricas (Figura 2.14). As amostras de concreto normal (NC) foram curadas em água e mantida a temperatura ambiente até 28 dias, a partir da data de moldagem, e depois desse período foram submetidas a cura ambiente por 2 meses, com um tempo total de cura de três meses antes de receber o UHPC. Depois de moldado o UHPC, as amostras foram submetidas a cura à vapor por 48 horas na temperatura de 90° e 5 dias de cura úmida.



(a) Cisalhamento inclinado (b) Tração por compressão diametral

Figura 2.14 - Ensaio realizados para determinar os esforços na ligação entre o concreto normal (NC) e o UHPC (Fonte: TAYEH, BAKAR e JOHARI, 2012)

Tayeh, Bakar e Johari (2012) concluíram que os tipos e as características das superfícies do substrato têm influência significativa na força de ruptura, tanto para o ensaio de cisalhamento inclinado quanto para o ensaio de tração por compressão diametral. No ensaio de cisalhamento inclinado foram observados quatro modos de falhas (Figura 2.15), sendo elas: tipo A = falha interfacial (completo descolamento na zona de transição); tipo B = falha interfacial e fissuração ou menor dano do concreto normal; tipo C = falha interfacial e fratura do concreto convencional; tipo D = falha completa do concreto normal com boa interface entre os dois materiais. Para o ensaio de tração por compressão diametral foram observados três tipos de modos de falhas (Figura 2.16), sendo elas: tipo A = falha interfacial (completo descolamento na zona de transição); tipo B = falha interfacial com insuficiência parcial do substrato; tipo C = falha no substrato.



(a) Tipo A (b) Tipo B (c) Tipo C (d) Tipo D

Figura 2.15 - Modos de falhas para o ensaio de cisalhamento inclinado nos diferentes tipos de superfície (Fonte: TAYEH; BAKAR; JOHARI, 2012)

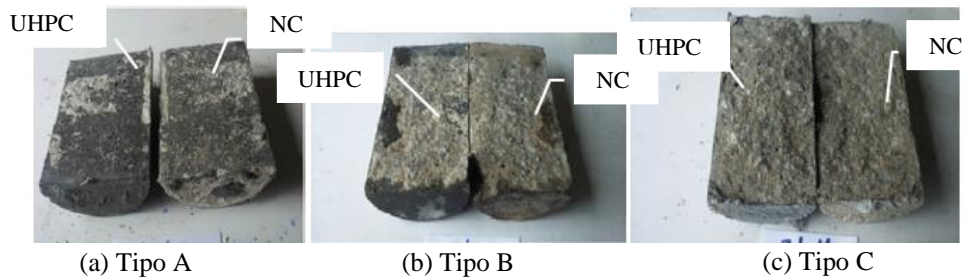


Figura 2.16 - Modos de falhas para o ensaio de tração por compressão diametral nos diferentes tipos de superfície (Fonte: TAYEH; BAKAR; JOHARI, 2012)

Espeche e León (2010) realizaram o ensaio de tração por compressão diametral para determinar a resistência à tração da ligação entre o concreto velho e o concreto novo. O semi-cilindro usado como concreto velho, com duas classes de resistência à compressão, foi obtido a partir da ruptura dos corpos de prova monolíticos do mesmo ensaio, conforme mostrado na Figura 2.17. Os mesmos foram colocados na fôrma e preenchidos com um concreto novo, auto-adensável com resistência à compressão de 75,2 MPa. Os autores constataram dois modos de falhas para os corpos de prova solicitados a carga de ruptura no ensaio de tração por compressão diametral: falha principal quase que na vertical ou uma falha principal seguido por uma formação secundária de fissura. Também averiguaram que a resistência à tração na ligação entre o concreto velho e o concreto novo não dependeu significativamente da qualidade do concreto antigo, evidenciada pela ocorrência de falhas na zona de transição, na qual a resistência da interface é governada pelas características de resistência do concreto novo, da aderência e adesão dos materiais e da rugosidade do substrato. Os autores ainda ressaltaram que o ensaio de tração por compressão diametral pode ser usado para fornecer parâmetros representativos na estimativa da força de ruptura da ligação entre dois concretos.



Figura 2.17 - Metade do corpo de prova do concreto velho no molde cilindro e configuração do ensaio de resistência à tração por compressão diametral (Fonte: ESPECHE; LEÓN, 2010)

Semendary e Svecova (2020) estudaram três diferentes métodos de ensaios com o objetivo de analisar a resistência da ligação entre o CAR ($f_{ck} = 57$ MPa) e o UHPC ($f_{ck} = 160,1$ MPa): arrancamento (Figura 2.3-b) para medir a resistência da ligação à tração direta; cisalhamento direto duplo (Figura 2.4-h) com o intuito de determinar a resistência da ligação na interface solicitada ao cisalhamento puro; cisalhamento inclinado (Figura 2.5-i) a fim de analisar o efeito combinado das tensões de compressão e cisalhamento. Os corpos de prova foram confeccionados com concreto produzido em uma fábrica de pré-moldados para garantir a representatividade da mistura e, após 24 horas, os mesmos foram desmoldadas e a interface do CAR foi lavada para expor o agregado e deixar a superfície o mais rugosa possível (Figura 2.18). Após a cura de 28 dias em câmara úmida, os corpos de prova foram armazenados em condições ambientais normais e reinseridos nos moldes com as interfaces preparadas para receber o UHPC. A superfície da interface foi mantida seca e limpa para determinar o valor da resistência da ligação o mais conservador possível. As idades de investigação dos ensaios foram de 2, 3, 7, 14 e 28 dias depois da concretagem do UHPC.



Figura 2.18 - Superfície com o agregado exposto no CAR para receber o UHPC (Fonte: SEMENDARY; SVECOVA, 2020)

Semendary e Svecova (2020) obtiveram as seguintes conclusões para os ensaios realizados:

a) Ensaio de arrancamento: para a idade de 2 dias não foi obtido resistência para executar o ensaio e com 3 dias foi alcançada uma resistência adesiva, em que a falha ocorreu na camada superior do UHPC. Já para as amostras ensaiadas na idade de 7 dias a falha ocorreu na interface do CAR e UHPC. Embora todas as amostras tivessem falhas na interface, houve uma ampla variação nos valores de resistência à tração, de 2,44 MPa a 4,19 MPa. A resistência da ligação aumentou 63% entre 3 e 7 dias e não houve variação da resistência da ligação de 7 para 14 dias. Para a idade de 28 dias a resistência da ligação foi de 3,6 MPa, a falha ocorreu no CAR e foi observado um menor coeficiente de variação nos resultados. Os autores recomendaram que um valor mínimo de resistência da ligação obtido do ensaio seja usado para determinar a resistência à tração na interface.

b) Cisalhamento direto duplo: a relação da força versus deslizamento na interface do CAR e UHPC foi linear até a força de ruptura para as amostras ensaiadas em diferentes idades. A resistência ao cisalhamento direto na idade de 2 dias foi de 3,20 MPa e na idade de 3 dias foi de 4,1 MPa, com um aumento de 28% entre 2 e 3 dias. De 3 para 7 dias houve um aumento da resistência de 58,5%.

Em relação a idade de 14 dias foi observada uma diminuição de 32% na resistência da ligação, relacionada a maturidade do concreto, e de 14 para 28 dias também ocorreu uma redução da resistência de 12,6%. De modo geral a ruptura do modelo ocorreu na interface do CAR com o UHPC ou no lado do CAR, com formação de fissuras. De acordo com os autores, os resultados indicam que a resistência à compressão do UHPC pode não ser o único fator que contribui para a resistência da ligação e os valores inconsistentes do ensaio de cisalhamento direto duplo pode estar relacionado com o tipo de ensaio executado.

c) Cisalhamento inclinado: foi observado que para a idade de 2 dias o UHPC fissurou durante o ensaio e as fissuras se propagaram para o lado do CAR (Figura 2.19-a). Para a idade de 3 dias foi analisado um aumento significativo no valor da resistência e a falha ocorreu no lado do CAR e o UHPC não apresentou nenhum dano (Figura 2.19-b), porém uma ligeira redução de 5% para a idade de 14 dias foi notada em comparação com a idade de 3 dias. A partir da idade de 7 dias houve fissuração apenas no lado do CAR, com a propagação da fissura ao longo da interface dos dois materiais, indicando que a resistência do UHPC era maior em comparação ao CAR. Nas idades entre 14 e 28 dias a resistência da ligação aumentou 9% e o modo de falha foi o esmagamento do CAR, sem sinal de fissuras no UHPC (Figura 2.19-c).

De modo geral, Semendary e Svecova (2020) concluíram que, após a execução dos ensaios, a resistência da interface independe da resistência à compressão do UHPC e geralmente depende do método de ensaio, sofrendo uma redução na seguinte ordem: cisalhamento inclinado, cisalhamento direto duplo e arrancamento. Além disso notou-se que o ensaio de arrancamento forneceu resultados mais conservadores em comparação com os outros métodos de ensaio, propiciando uma melhor correlação para ser usado na determinação da resistência da ligação em qualquer idade.

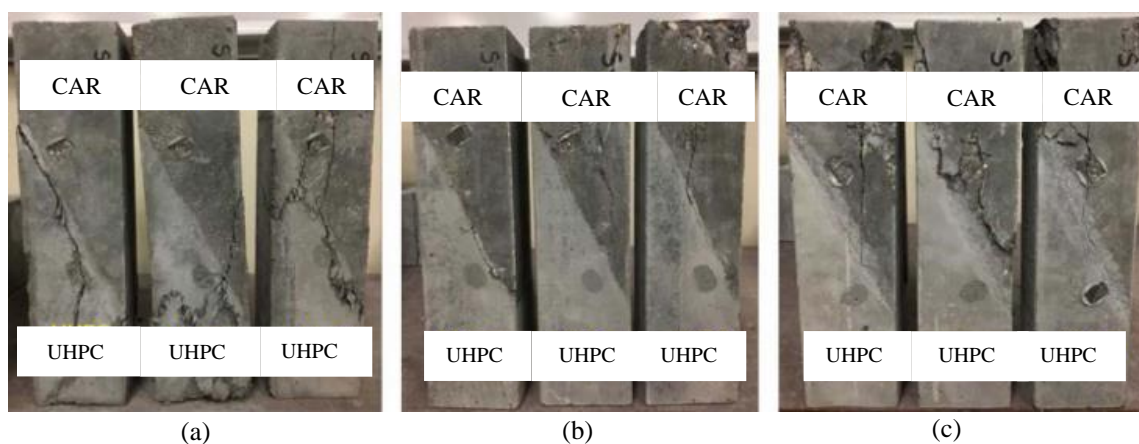


Figura 2.19 - Modos de falha obtidos das amostras do ensaio de cisalhamento inclinado: (a) 2 dias; (b) 3 dias; e (c) 7, 14, e 28 dias após a moldagem do UHPC (Fonte: SEMENDARY; SVECOVA, 2020)

Wichert, Matz e Empelmann (2019) fizeram um estudo experimental e teórico da aderência entre a argamassa de alto desempenho, com resistência à compressão variando de 123,3 MPa a 134,5 MPa, e o UHPC. A pesquisa foi realizada para simular ligações preenchidas com argamassa de alto desempenho nos nós de treliças pré-fabricadas feitas de UHPC. Os nós precisam ser capazes de transmitir tensões normais, de cisalhamento, flexão e torção. Na investigação experimental os autores realizaram o ensaio de cisalhamento inclinado (Figura 2.20), na qual foi possível simular diferentes condições de tensões e ângulos de inclinação. A espessura da junta de argamassa foi de 3,00 cm e o ângulo de inclinação da junta foi variado (0° , 30° , 40° , $47,5^\circ$, 55° e 60°).

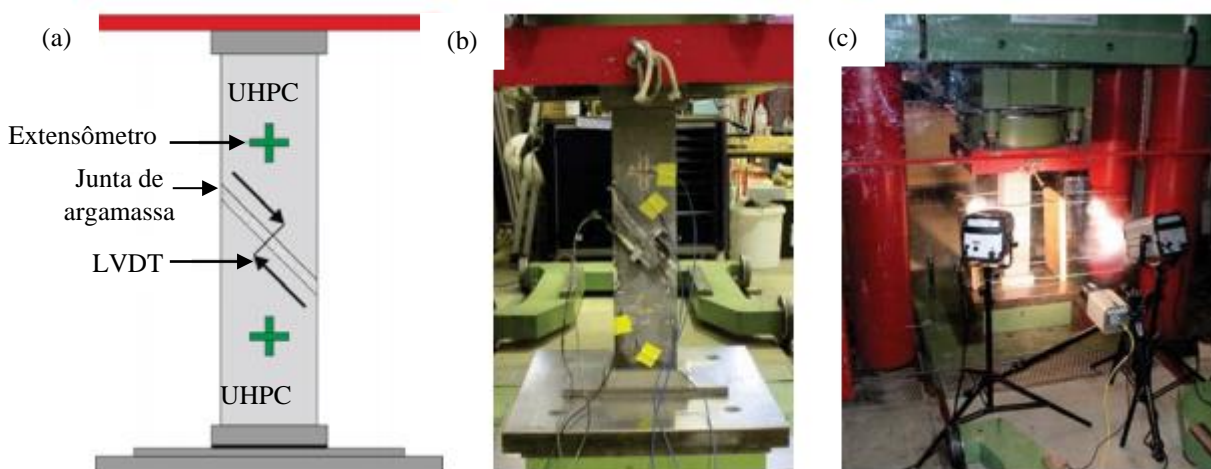


Figura 2.20 - Configuração do ensaio: a) medidores de movimento, b) amostra da máquina e ensaio, c) câmera de alta velocidade (Fonte: WICHERT; MATZ; EMPELMANN, 2019)

Quanto aos resultados obtidos experimentalmente por Wichert, Matz e Empelmann (2019) foram observados que todas as amostras apresentaram falhas muito quebradiças, sem aviso prévio, sendo constatadas dois modos: falha de compressão da junta, quando as tensões finais de compressão na junta do segmento atingiram a resistência à compressão da argamassa, na qual a falha começou na junta e progrediu para o segmento de UHPC das amostras; falha de cisalhamento na interface do UHPC e argamassa, quando a resistência ao cisalhamento da interface foi atingida (Figura 2.21).

Em relação ao deslocamento medido os autores observaram que todas as amostras apresentaram valores baixos e, em todos os casos, as deformações dos modelos inclinados estavam abaixo da deformação final de compressão feita somente com UHPC sem interface. Em relação ao ângulo de inclinação os autores concluíram que conforme o mesmo ia aumentando, as cargas finais iam diminuindo, porém a chance de falha por cisalhamento aumentava e não foi possível fazer uma padronização. Em relação a abordagem teórica da resistência ao cisalhamento, Wichert, Matz e

Empelmann (2019) concluíram que os valores fornecidos pelo código do Model Code 2010 e o Eurocode 2 foram menores do que os obtidos experimentalmente, indicando que a abordagem de projeto fornece resultados conservadores. De modo geral, os mesmos notaram que as juntas feitas de argamassa para ligações de segmentos feitos com UHPC são adequadas e altas tensões de cisalhamento podem ser transmitidas, desde que haja um tratamento da interface.

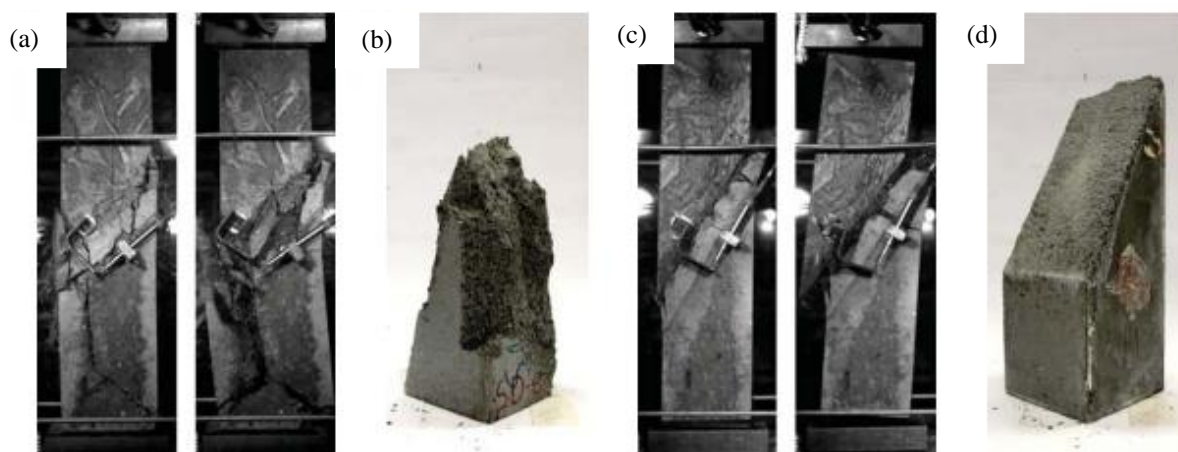


Figura 2.21 - Modos de falha: (a, b) falha por compressão com formação de cone de tensões; (c, d) falha por cisalhamento na interface com separação do segmento de UHPC (Fonte: WICHERT; MATZ; EMPELMANN, 2019)

Zhang et al. (2019) fizeram um estudo experimental em ensaios de cisalhamento direto duplo para analisar a resistência ao cisalhamento direto na interface do concreto de resistência normal (NSC) e o UHPC, com variáveis que poderiam influenciar o resultado: variação da resistência à compressão do concreto de resistência normal; idade do UHPC no período de aplicação da carga; variação do tipo de cura do UHPC, seco, úmido e saturado; adição de agentes expansivos no UHPC; presença de tensões de tração e compressão normal à interface. As amostras de concreto de resistência normal foram curadas em temperatura ambiente por 60 dias. Depois desse período o UHPC foi preenchido e as amostras prontas foram desmoldadas após 2 dias e curadas a temperatura normal até a data de execução do ensaio. Para as amostras solicitadas a cura com elevadas temperaturas, após a desmoldagem as mesmas foram submetidas a uma temperatura de 60°C por 3 dias ou uma temperatura de 90°C por dois dias.

Zhang et al. (2019) puderam concluir os seguintes itens:

a) Modos de falhas – Os autores observaram seis tipos de modos de falhas na interface do ensaio de cisalhamento direto: (1) Falha pura na interface (B) (Figura 2.22-a); (2) Falha parcial da interface e falha parcial do NSC (B / C) (Figura 2.22-b); (3) Falha completa do substrato de NSC (C) (Figura 2.22-c); (4) Falha de cisalhamento nos encaixes do UHPC e falha parcial do NSC (T /

BC); (5) Falha de cisalhamento das ligações nervuradas no UHPC e falha parcial do NSC (G / C) (Figura 2.22-d); (6) Falha de cisalhamento dos vergalhões pré-instalados (R / C) (Figura 2.22-f)

Os autores concluíram que cerca de 88% das amostras ensaiadas falharam na interface ou no lado do NSC. Houve a formação de microfissuras com 46% a 69% da carga de ruptura e à medida que o carregamento aumentava, as fissuras se propagavam continuamente na vertical ao longo da interface até a ruptura. Para as interfaces com parâmetros favoráveis, como rugosidade da superfície do NSC, superfície úmida saturada, cura aos 28 dias e sob uma combinação de tensões de compressão perpendicular à interface, foi observado falha no substrato NSC. Apenas em 4% das amostras ensaiadas foram observadas falha pura da interface (B). Para as interfaces com parâmetros desfavoráveis, como superfície lisa (Sm) do NSC, interface seca, cura aos 3 dias e sob uma combinação de tensões de tração e cisalhamento, ocorreu modo de falha do tipo B/C.

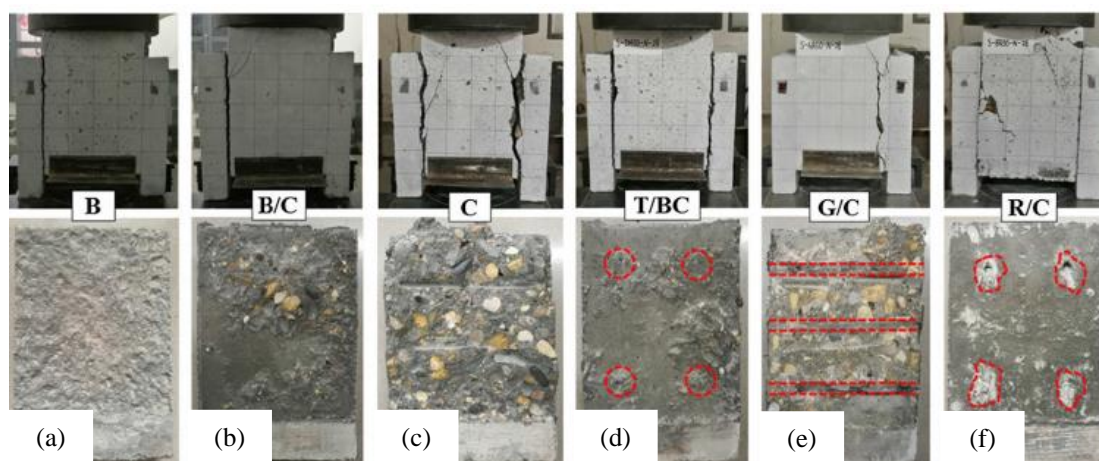


Figura 2.22 - Modos de falhas observados nos ensaios de cisalhamento direto duplo (Fonte: ZHANG et al., 2019)

b) Resistência à compressão do NSC: as forças de fissuras e falhas na interface UHPC - NSC aumentaram com o aumento da resistência à compressão do NSC. A força média de ruptura do C40 foi 14,9% maior que a do C30 e, a do C50 foi 25,6% maior que a do C40, mostrando que a resistência do substrato do NSC foi um fator importante que afetou as propriedades de cisalhamento da interface UHPC - NSC.

c) Idade do UHPC - com o aumento da idade do ensaio do UHPC, as fissuras e as forças de ruptura na interface aumentaram, não havendo mudanças significativas da força de ruptura aos 28 dias e 180 dias. Durante os 7 e 28 dias, a resistência ao cisalhamento na interface aumentou apenas 4,2%, tendendo a estabilização após 7 dias.

d) Método de cura para UHPC – apenas 1,2% de diferença foi observada na força de ruptura da interface entre as amostras curadas em temperatura normal por 28 dias e curados a uma temperatura de 60°C por 72 horas. Para o UHPC curado a 90°C por 48 h, a força de fissuração permaneceu a mesma e a capacidade final de cisalhamento diminuiu 12,9% em comparação com UHPC curado a temperatura normal. Segundo os autores as possíveis razões para a redução da capacidade de cisalhamento interfacial do UHPC-NSC curados a 90°C foi que o encolhimento do UHPC se desenvolveu rapidamente durante o período de cura a vapor, enquanto que o substrato do NSC apresentava pouco encolhimento no momento. O grande encolhimento do UHPC foi restringido pela interface do NSC, gerando um aumento de tensão de tração na camada de UHPC, resultando em danos na interface, aumentando ainda mais a tensão de cisalhamento adicional na interface UHPC-NSC, enfraquecendo a capacidade de cisalhamento na interface.

e) Adição de agentes expansivos no UHPC – a taxa de crescimento da resistência ao cisalhamento direto foi menor quando se utilizou agente expansivo comparado com o concreto sem agente expansivo. De acordo com os autores, a adição de agente expansivo era para compensar o encolhimento do UHPC e reduzir as tensões de cisalhamento geradas na interface, no entanto, não foi o que aconteceu, pois o mesmo gerou uma redução da resistência à compressão do concreto.

g) Estado de tensão na interface – O efeito das tensões perpendiculares à interface afeta significativamente o comportamento da resistência ao cisalhamento, sendo que a tensão de tração aplicada à interface reduz o efeito do cisalhamento e a tensão de compressão aumenta a resistência ao cisalhamento na interface.

2.7 Análise quantitativa da rugosidade

De acordo com Santos e Julio (2012), uma avaliação puramente qualitativa da rugosidade, baseado em inspeção visual, é comumente usada para verificar a condição superficial do substrato, no entanto apresenta limitações, pois é baseado em opiniões técnicas humanas, podendo ser subjetiva. Para superar essas limitações é necessário uma abordagem qualitativa completa, que consiste em: (1) medir a textura da superfície, definindo perfis 2D ou superfícies 3D; (2) avaliações dos parâmetros de rugosidade; (3) definição dos coeficientes de coesão e atrito por meio dos parâmetros de rugosidade; e (4) avaliação da resistência na ligação da interface concreto-concreto. A implementação dessa abordagem promove a padronização do método e a definição mais adequada para quantificar a rugosidade da superfície, além de ajudar a explicar porque interfaces de concreto com superfícies preparadas com métodos diferentes ou com o mesmo método, apresentando rugosidades semelhantes, levam a resultados diferentes.

Santos e Julio (2012) fizeram uma revisão sobre diferentes métodos para analisar a superfície do material e determinar a rugosidade, sendo eles:

-Análise da superfície de concreto: consiste na inspeção visual do técnico da superfície preparada de concreto e comparação com padrões de superfícies pré-definidas. Como exemplo pode-se citar os nove padrões de rugosidade crescente da superfície do concreto, denominado Perfil de Superfície do Concreto (Concrete Surface Profile – CSP) definido pelo Instituto de Reparação de Concreto (ICRI) (Figura 2.23).

-Medidor de vazão: é um método mais usado para avaliar a rugosidade da superfície de pavimentos de asfalto e concreto e fornecer um valor médio de rugosidade. O método consiste no posicionamento de um cilindro no topo da superfície com um anel de borracha que simula o contato de um pneu de veículo com o asfalto. O cilindro é enchido com água na qual é medido o tempo para que a mesma flua através dos vazios entre a superfície umedecida e o anel de borracha. A rugosidade da superfície é correlacionada com o tempo para a água fluir. Para superfície lisa a água flui mais lentamente porque a borracha vai estar rente ao pavimento limitando a passagem da água (Figura 2.24).

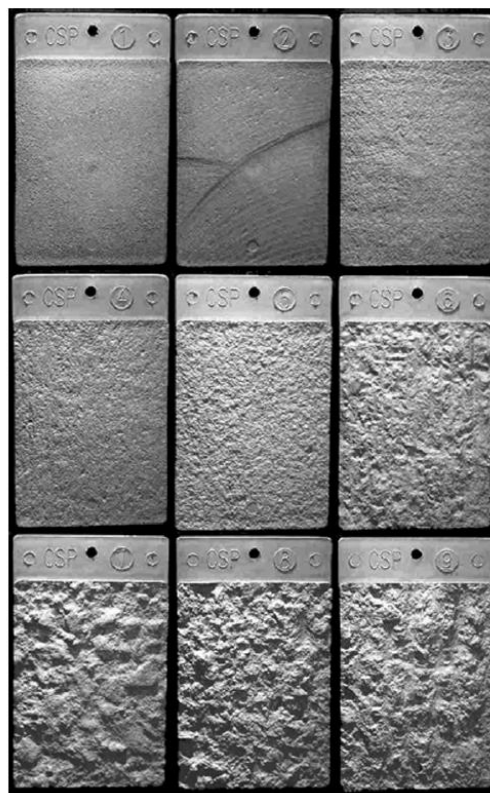


Figura 2.23 - Perfis de superfície de concreto (Fonte: ICRI Standard 310.2, 2016)

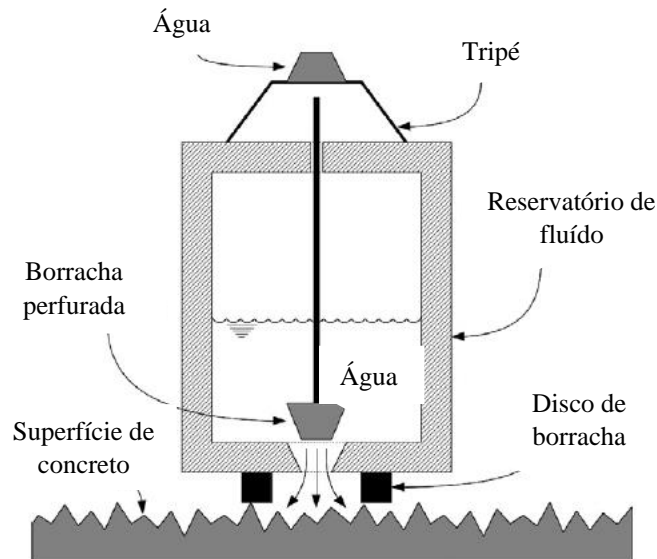


Figura 2.24 - Ilustração de medidor de vazão (Fonte: SANTOS; JULIO, 2012)

-Medidor de textura circular: também desenvolvido para pavimentos de concreto e consiste de um dispositivo de medição composto por um sensor de deslocamento a laser que é montado em um braço que gira executando um círculo, fornecendo o perfil da superfície. O uso desse método reduz a probabilidade de erro humano na avaliação da rugosidade da superfície em comparação com o método da areia.

-Medidor de rugosidade digital da superfície (rugosímetro): consiste de uma caixa de alumínio leve e portátil na qual é acoplado uma câmera e um laser que é operado contra a superfície horizontal. O laser gera as linhas de perfil e a câmera cria a imagem desse perfil. O sinal de vídeo gerado pela câmera é transmitido para um software que faz a leitura do perfil e calcula os vários parâmetros de rugosidade a partir dos perfis da superfície avaliada.

-Microscopia: pode ser óptica e eletrônica e são técnicas que podem ser usadas para inspecionar a superfície de um corpo usando um feixe de luz ou elétron, respectivamente, sendo o último mais preciso que o primeiro. Enquanto a microscopia óptica usa uma luz visível e um sistema de lentes para ampliar e focar a superfície inspecionada, a microscopia eletrônica usa um feixe de elétrons para gerar imagens.

-Método ultrassônico: técnica baseada no uso de ondas geradas por impacto que se propaga nos elementos de concreto e são refletidas por falhas internas, como fissuras e descolagem de elementos de concreto, e descontinuidades das superfícies externas. Pode ser aplicada em interfaces não acessíveis e visíveis para inspeção, no entanto, quando o concreto possui camadas heterogêneas, o ruído mascara e o eco dificulta a diferenciação entre superfície lisa e áspera. Os métodos ultrassônicos apresentam maior potencial no reparo e fortalecimento de estruturas de concreto.

-Método do gradiente de rugosidade – desenvolvido por Santos e Julio para caracterizar a rugosidade das superfícies de concreto. O perfil de rugosidade é avaliado usando um medidor de textura do perfil, composto por 500 agulhas de 0,8 mm de diâmetro e espaçadas de 1,0 mm e que caem livremente sobre a superfície do concreto, Figura 2.25. O perfil de rugosidade formado pelas agulhas é fotografado e, ao ampliar a fotografia, é possível fazer leituras mais precisas definindo uma série de ondas irregulares, determinando a profundidade de pico a vale e extraindo os parâmetros de rugosidade.

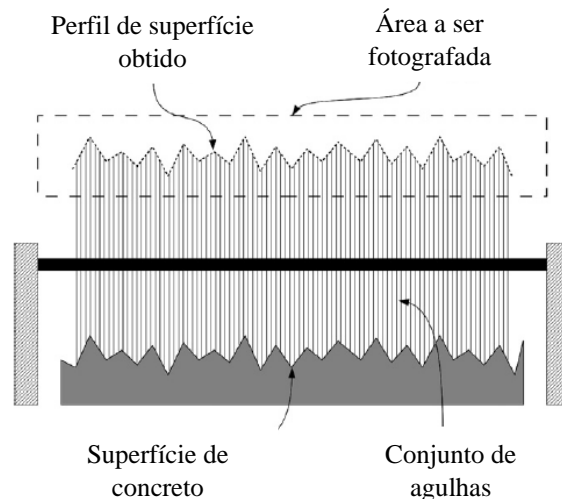


Figura 2.25 - Ilustração esquemática do medidor de textura do perfil formado por agulhas (Fonte: SANTOS; JULIO, 2012)

-Método fotogramétrico: as propriedades geométricas são determinadas usando várias imagens fotográficas tiradas de diferentes posições e ângulos, sendo que, a partir de pontos comuns, identificados em cada imagem, é gerado um modelo 3D usando algoritmos matemáticos. Os autores corroboram que o uso do método fotogramétrico para avaliar a rugosidade da superfície de concreto é raro.

-Método do vazamento de ar: utiliza o ar para prever a rugosidade da superfície do concreto. O dispositivo apresentado na Figura 2.26 é colocado na superfície de concreto, envolvido por uma saia rígida que está em contato com a superfície do substrato e, em seguida, o ar é bombeado. Como o contato entre a saia rígida e a superfície de concreto não é completamente perfeito, devido as irregularidades na superfície, o ar vaza e a pressão de dentro do reservatório varia. A variação da pressão é então comparada com o mesmo parâmetro medido usando os nove perfis padrão de concreto proposto pelo ICRI.

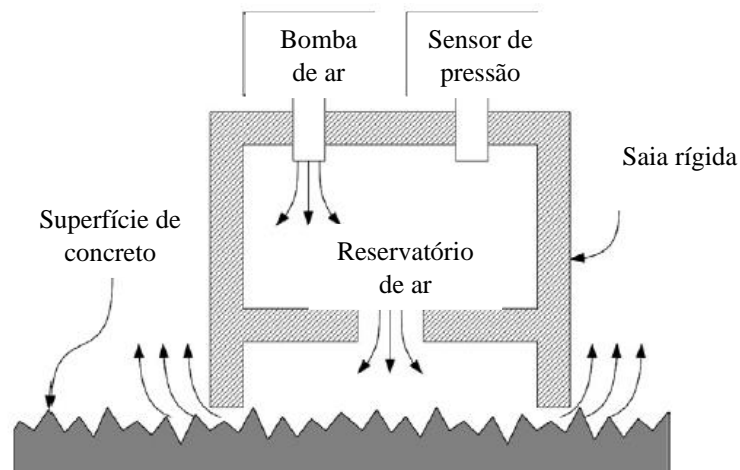


Figura 2.26 - Ilustração esquemática do método de vazamento de ar (Fonte: SANTOS; JULIO, 2012)

No presente trabalho foram abordadas as técnicas de medição da rugosidade pelo método da mancha de areia e medição por coordenadas, elucidadas a seguir.

2.7.1 Método da mancha de areia

O ensaio foi realizado de acordo com a ABNT NBR 16504: 2016 - Misturas asfálticas - Determinação da profundidade média da macrotextura superficial de pavimentos asfálticos por volumetria - Método da mancha de areia. O mesmo consiste em espalhar um volume conhecido de areia (V), com propriedades definidas, sobre a superfície por meio de movimentos circulares uniformes com o disco espalhador até formar uma área circular. Com a área circular formada sobre a superfície rugosa é medido o diâmetro do círculo (D) (Figura 2.27). A areia é espalhada por quatro vezes sobre a superfície rugosa para formar a área circular e determinar o diâmetro médio do círculo. A profundidade média da macrotextura da superfície (H_s) é calculada de acordo com a Equação (2.11) pela relação entre o volume da areia espalhada e o diâmetro médio do círculo formado pela areia.

$$H_s = \frac{4V}{\pi D^2} \quad (2.11)$$

Sendo: H_s (mm), V (mm^3), D (mm).

Santos e Julio (2012) corrobora que o método apresenta a vantagem de ser barato e fácil de executar, tanto no local quanto no laboratório, sendo limitado às superfícies horizontais do piso superior. Como desvantagens os autores citam que o método fornece um valor médio de profundidade da macrotextura da superfície, sendo insensível as características da microtextura.

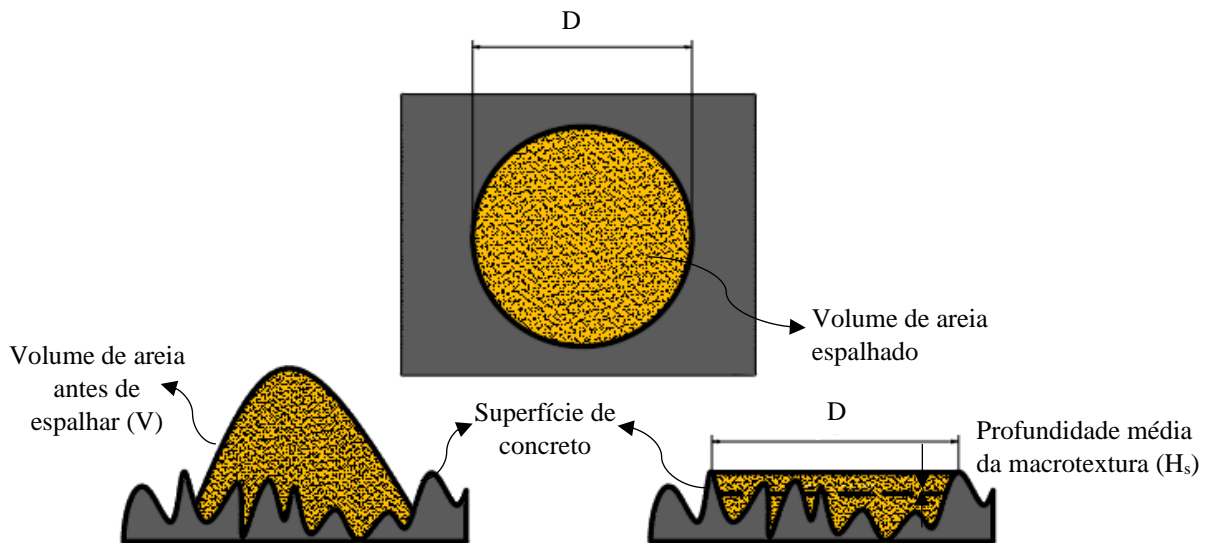


Figura 2.27 - Representação do ensaio da mancha de areia (Fonte: adaptado de SANTOS; JULIO, 2012)

2.7.2 Medição por coordenadas

A medição por coordenadas da superfície de rugosidade consiste de um dispositivo mecânico que representa o ponto através de um sistema de coordenadas (x , y , z) em condições de laboratório. O dispositivo mecânico é formado por um braço rígido com uma sonda de medição esférica acoplada (Figura 2.28), na qual possui livre translação e rotação. O equipamento é conectado ao computador e quando a sonda de medição toca a superfície ocorre o registro das coordenadas por meio de um software. A posição da sonda de medição para a leitura do ponto é sempre normal à superfície e se a mesma estiver inclinada a máquina cria um plano normal à superfície inclinada. A movimentação da sonda de medição para a leitura das coordenadas dos pontos na superfície rugosa pode ser manual, na qual os espaçamentos de medição são aleatórios, ou programável no computador, cuja medida dos espaçamentos é fixa.

Conforme *Surface Texture Analysis the Handbook* (1992), a altura do perfil da superfície medida é em relação ao plano normal de referência. Se a medida da superfície e o plano de referência normal à superfície não estão alinhados, a medida do perfil irá aparecer fora do nível, conforme apresentado na Figura 2.29. Isto não necessariamente significa que há erro de medição, mas indica que a seção transversal não está paralela à superfície. Essa correção de nivelamento do perfil pode ser feita pelo método dos mínimos quadrados. O método dos mínimos quadrados é uma técnica de otimização para encontrar o melhor ajuste na curva, na qual a soma dos quadrados das diferenças das alturas das ordenadas, medidas a partir do nivelamento da linha, é mínima, e a área abaixo da

curva do perfil é igual a área acima do perfil. A Equação 2.12 expressa o nivelamento da linha do perfil.

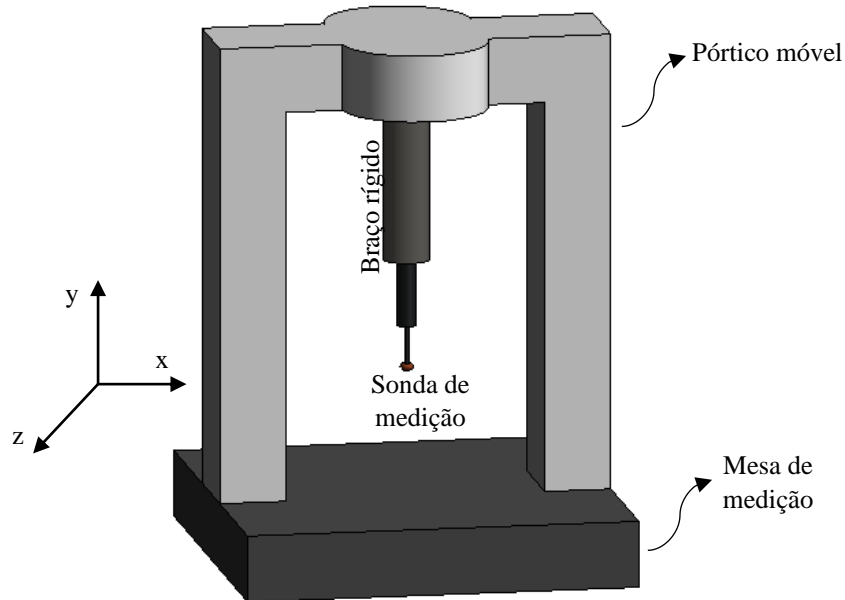


Figura 2.28 - Principias componentes da mesa de medição por contato (Fonte: Próprio autor)

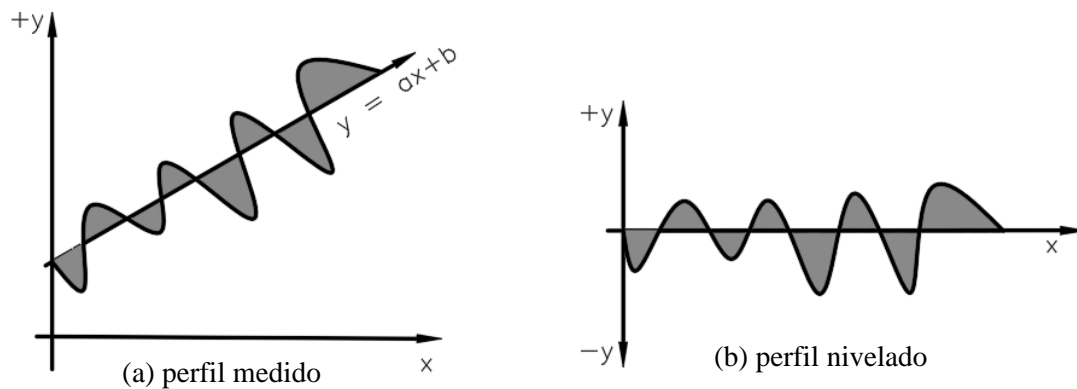


Figura 2.29 – Nivelamento do perfil pelo método dos mínimos quadrados (Fonte: Próprio autor)

$$y=ax+b \tag{2.12}$$

$$a = \frac{n \sum (x_i y_i) - \sum x_i \sum y_i}{n \sum (x_i)^2 - (\sum x_i)^2}$$

$$b = \frac{\sum y_i}{n} - a \frac{\sum x_i}{n}$$

$$\sum = \sum_{i=0}^n$$

De acordo com Santos e Julio (2012) o método de medição por coordenadas é um método de baixo custo e relativamente rápido de ser executado, sem necessidade de preparação da amostra. No entanto a precisão das medições é influenciada por parâmetros como: (a) tamanho e dureza da ponta da sonda; (b) tecnologia de aquisição de sinal; (c) velocidade de movimento e vibrações da peça; e (d) irregularidades na superfície e partículas suspensas.

Se a ponta da sonda de medição for muito grande pode haver dificuldade de realizar medições entre picos menos espaçados que o tamanho da ponta. Isso pode causar perda de informações sobre a superfície, principalmente relacionada a caracterização da macrotextura (rugosidade). Tal situação pode gerar uma suavização do perfil em relação ao perfil real, afetando os resultados dos parâmetros de rugosidade. Para evitar problemas o tamanho da ponta da sonda de medição precisa ser bem definido. A velocidade de movimento do braço rígido também pode ser um parâmetro crítico na influência do erro de medição, sendo que, se a velocidade for elevada pode não conseguir captar todos os pontos de medição da superfície, ocorrendo perda de informação (SANTOS; JULIO, 2012).

2.7.3 Parâmetros descritivos de rugosidade

De acordo com ABNT NBR ISO 4288: 2008 - Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade, o comprimento de amostragem ou comprimento de onda (λ_c) (Figura 2.30-a) deve ser arbitrado por meio de uma análise prévia no perfil estudado. A arbitragem do comprimento de amostragem é realizada através de medições prévias nas regiões da superfície que apresentam maior grau de rugosidade, podendo ser avaliada por inspeção visual, e maiores valores críticos dos parâmetros de rugosidade, R_a e R_z .

O parâmetro de rugosidade R_z é a soma da altura máxima do pico e a maior profundidade do vale. Já o parâmetro R_a consiste na média dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem. A altura máxima do pico (R_{pi}) é a maior altura dos picos do perfil Z_{pi} no comprimento de amostragem e a profundidade máxima do vale (R_{vi}) é a maior profundidade do vale do perfil no comprimento de amostragem (Figura 2.30 -a) (ABNT NBR 4288, 2008).

Com base nos parâmetros da medição prévia da superfície estudada é determinado o comprimento de amostragem pelos valores apresentados na Tabela 2.2, que não se aplica especificamente para superfícies de concreto, mas como não há uma normatização a mesma foi considerada. A direção da medição pode ser arbitrada e o comprimento de avaliação da rugosidade é tomado como sendo os cinco comprimentos de amostragem (Figura 2.30-b).

De acordo com Surface Texture Analysis the Handbook (1992) o comprimento de amostragem é selecionado para diferenciar rugosidade e ondulação e deve ser de pelo menos 2,5 vezes o espaçamento de pico a pico do perfil de rugosidade, isto significa que, pelo menos dois picos e dois vales são encontrados em cada comprimento de amostragem.

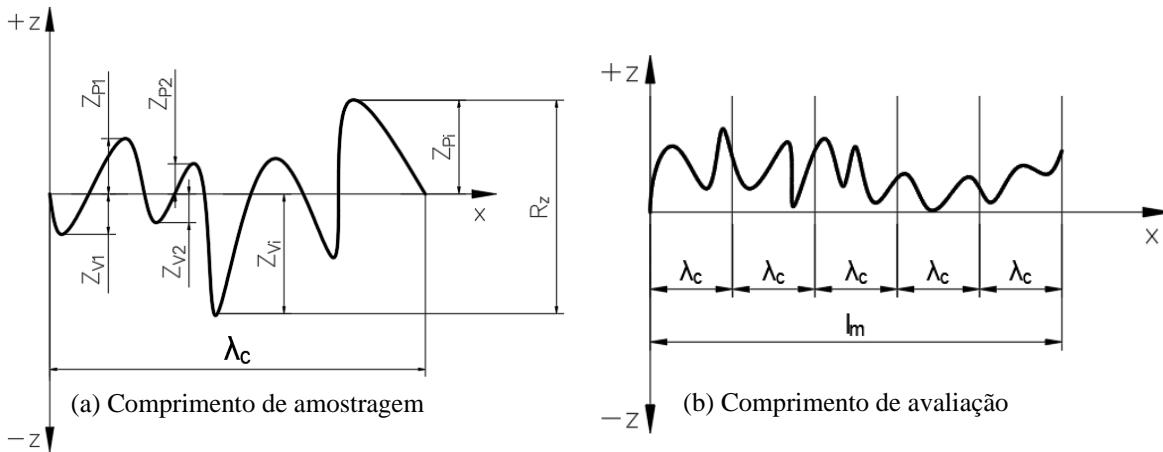


Figura 2.30 – Altura e comprimento do perfil (Fonte: ABNT NBR 4288, 2008)

Tabela 2.2 - Comprimento de amostragem de rugosidade para medições de R_a e R_z para perfis não periódicos (Fonte: ABNT NBR 4288, 2008)

R_a (μm)	R_z (μm)	Comprimento de amostragem (λ_c) (mm)	Comprimento de avaliação da rugosidade (l_m) (mm)
$0,006 < R_a \leq 0,2$	$0,025 < R_z \leq 0,1$	0,08	0,4
$0,02 < R_a \leq 0,1$	$0,1 < R_z \leq 0,5$	0,25	1,25
$0,1 < R_a \leq 2$	$0,5 < R_z \leq 10$	0,8	4
$2 < R_a \leq 10$	$10 < R_z \leq 50$	2,5	12,5
$10 < R_a \leq 80$	$50 < R_z \leq 200$	8	40

Os parâmetros referentes as máximas alturas de pico e vale, exposto pelo Surface Texture Analysis the Handbook (1992), são:

-Altura média de pico (R_{pm}): definido como a média da altura máxima do pico de cada comprimento de amostragem, dado pela Equação (2.13).

$$R_{pm} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 R_{pi} \tag{2.13}$$

-Altura média de vale (R_{vm}): definido como a média da profundidade máxima do vale de cada comprimento de amostragem, dado pela Equação (2.14).

$$R_{vm} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 R_{vi} \quad (2.14)$$

-Altura máxima de Pico-Vale (R_{max} ou R_z): definido como a soma da altura máxima de pico a vale no comprimento da amostragem, dado pela Equação 2.15.

$$R_{m\acute{a}x} = \max \{ R_{pi} + R_{vi} \} \quad (2.15)$$

-Altura média Pico-Vale ($R_{z(DIN)}$): definido como a média da soma da altura máxima de pico a vale no comprimento de avaliação, na qual cada comprimento de avaliação é definido como cinco comprimento de amostragem, dado pela Equação 2.16.

$$R_{z(DIN)} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 (R_{pi} + R_{vi}) \quad (2.16)$$

-Altura dos Dez Pontos ($R_{z(ISO)}$): é definida como a média da soma dos cinco picos mais altos com os cinco vales mais baixos no comprimento de avaliação, dado pela Equação 2.17.

$$R_{z(ISO)} = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 R_{pi} + \sum_{i=1}^5 R_{vi} \right) \quad (2.17)$$

Em relação aos parâmetros de amplitude referente a média das ordenadas, a ABNT NBR ISO 4287: 2002 apresentam o R_a , denominado de desvio médio do perfil avaliado e consiste na média dos valores absolutos das ordenadas $Z(x)$ no comprimento de amostragem (Equação (2.18)) e o R_q , denominado de desvio médio quadrático do perfil avaliado, representado pela raiz quadrada da média dos valores das ordenadas $Z(x)$ no comprimento de amostragem (Equação (2.19)).

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (2.18)$$

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z^2(x) dx} \quad (2.19)$$

De acordo com o Surface Texture Analysis the Handbook (1992) o R_a é mais usado para monitorar as mudanças graduais que podem ocorrer na superfície final devido a uma ferramenta de corte desgastada durante o processo de produção. Como é medido a superfície média, defeitos na superfície não influenciam muito o resultado. Logo pode haver três perfis com características diferentes, mas com o mesmo R_a , pois ele não diferencia o pico e vale (Figura 2.31).

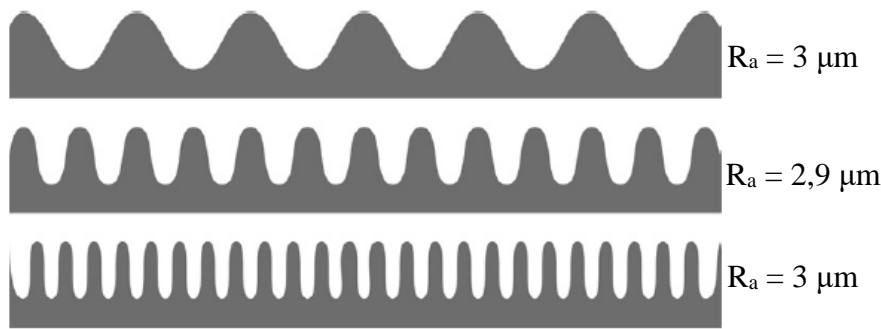


Figura 2.31 - Perfis com rugosidades diferentes, mas com o mesmo Ra (Fonte: SANTOS; JULIO, 2012)

Como o R_z não analisa a média dos perfis e sim as máximas alturas de pico e vale, esse parâmetro acaba sendo mais sensível as variações de superfície. O $R_{z(DIN)}$ é uma ferramenta mais usada para monitorar o processo de produção e $R_{máx}$ é uma indicação da altura máxima do defeito (pico ou vale) dentro do perfil avaliado e é útil em situações na qual não é permitido nenhum defeito. De modo geral o $R_{z(DIN)}$ e o $R_{máx}$ são usados juntos para monitorar a variação da superfície acabada durante o processo de produção. Quando os seus valores são similares indica uma superfície consistente acabada e quando há uma diferença significativa indica um defeito na superfície.

O MC-10 (fib, 2013) apresenta que a rugosidade da superfície pode ser classificada em diferentes categorias, dependendo do R_a e do método de rugosidade aplicado (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 - Classe de rugosidade em função do parâmetro e do tipo de tratamento (Fonte: MODEL CODE, 2010)

Categoria	Tratamento	Ra (mm)
Muito lisa	Moldada contra a fôrma de aço	Não medido
Lisa	Não tratada	<1,5 mm
	Moldada conta a fôrma de madeira	
Rugosa	Jato de areia	≥ 1,5 mm
	Jato de água	
Muito rugosa	Alta pressão de jato de água, Chanfrado	≥ 3,0 mm

Santos e Julio (2007) realizaram o ensaio de cisalhamento inclinado e arrancamento para avaliar a resistência à aderência ao cisalhamento inclinado e à tração, respectivamente, em peças de concreto com três tipos de interfaces moldadas em etapas distintas: (1) superfície lisa, com as

amostras moldadas na fôrma de aço; (2) superfície levemente rugosa, com amostras tratadas com escovação, sem expor os agregados; (3) superfície rugosa, com as amostras tratadas com jateamento de areia, expondo os agregados. Os mesmos cortaram amostras de 200 mm x 200 mm x 100 mm, com as mesmas interfaces das amostras usadas no ensaio de cisalhamento inclinado e arrancamento, e aplicaram uma resina epóxi que, depois de seca, a peça foi serrado num plano perpendicular à superfície para a criação da imagem digital, na qual foi passada por um tratamento para identificar a resina e o concreto. Levando em consideração uma altura máxima estimada entre pico e vale de aproximadamente 1 mm, o comprimento total da avaliação adotado foi de aproximadamente 50 mm (l_m), adequado para caracterizar a rugosidade do substrato de concreto.

A Tabela 2.4 apresenta os diversos parâmetros de rugosidade obtidos por Santos e Julio (2007) para as superfícies estudadas: moldada, fio escovado e jato de areia e a correlação com a resistência ao cisalhamento inclinado e à tração. Os resultados que apresentaram maiores valores de correlação foram altura máxima de pico, profundidade média do vale e profundidade máxima do vale. Os autores concluíram que a técnica adotada para a medição da rugosidade apresentou bons resultados e que é possível adotar os parâmetros de rugosidade para correlacionar a resistência na ligação.

Tabela 2. 4 - Parâmetros de rugosidade (mm) e coeficientes de correlação dos parâmetros com os resultados de resistência para as superfícies analisadas (Fonte: SANTOS E JULIO, 2007)

Parâmetros de rugosidade (mm)		Tipos de interface			Coeficiente de correlação	
		Moldada	Fio escovado	Jato de areia	Cisalhamento	Tração
Rugosidade média	R_a	0,031	0,099	0,203	0,9283	0,9306
Altura média do pico ao vale	R_z (DIN)	0,213	0,403	0,797	0,8966	0,8994
Altura máxima pico-vale	R_{max}	0,37	0,708	0,994	0,9776	0,9789
Média da terceira altura mais alta do pico ao vale	R_{3z}	0,118	0,252	0,628	0,8642	0,8673
Terceira altura máxima do pico ao vale	$R_{3z MAX}$	0,188	0,347	0,825	0,857	0,8602
Altura de dez pontos	R_z (ISO)	0,293	0,605	1,088	0,9271	0,9295
Altura total da rugosidade	R_y	0,37	0,847	1,231	0,9805	0,9817
Altura média do pico	R_{pm}	0,083	0,16	0,401	0,8535	0,8567
Altura máxima de pico	R_p	0,132	0,282	0,527	0,9219	0,9243
Profundidade média do vale	R_{vm}	0,13	0,243	0,396	0,9401	0,9423
Profundidade máxima do vale	R_v	0,238	0,565	0,704	0,995	0,997

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental consistiu na execução do ensaio de tração na flexão e cisalhamento inclinado em amostras prismáticas, tração por compressão diametral em cilindros e cisalhamento direto em prismas, sempre incluindo um tipo de interface de interesse em uma região estrategicamente selecionada da amostra.

Inicialmente confeccionou-se os concretos para a moldagem dos corpos de prova usados na execução do ensaio. Nas superfícies do CAR foram realizados diferentes tipos de preparo para receber o UHPC como a exposição dos agregados a partir da escovação, uso de chaves de cisalhamento, aplicação de jato de areia, nenhum preparo da superfície e utilização de tela de aço expandida. Também foi considerada uma superfície com fibras de aço expostas para receber o UHPC. As fibras de aço foram incorporadas no concreto com resistência à compressão intermediária ao CAR e o UHPC. Associou o concreto intermediário com fibras no CAR quando ambos estavam frescos, separados apenas por uma tela de aço, tornando uma estrutura única. Para todas as superfícies estudadas foram efetuadas as medições de rugosidade. A Figura 3.1 expõe o fluxograma das etapas do programa experimental e a Tabela 3.1 apresenta a imagem e nomenclatura das interfaces estudadas.

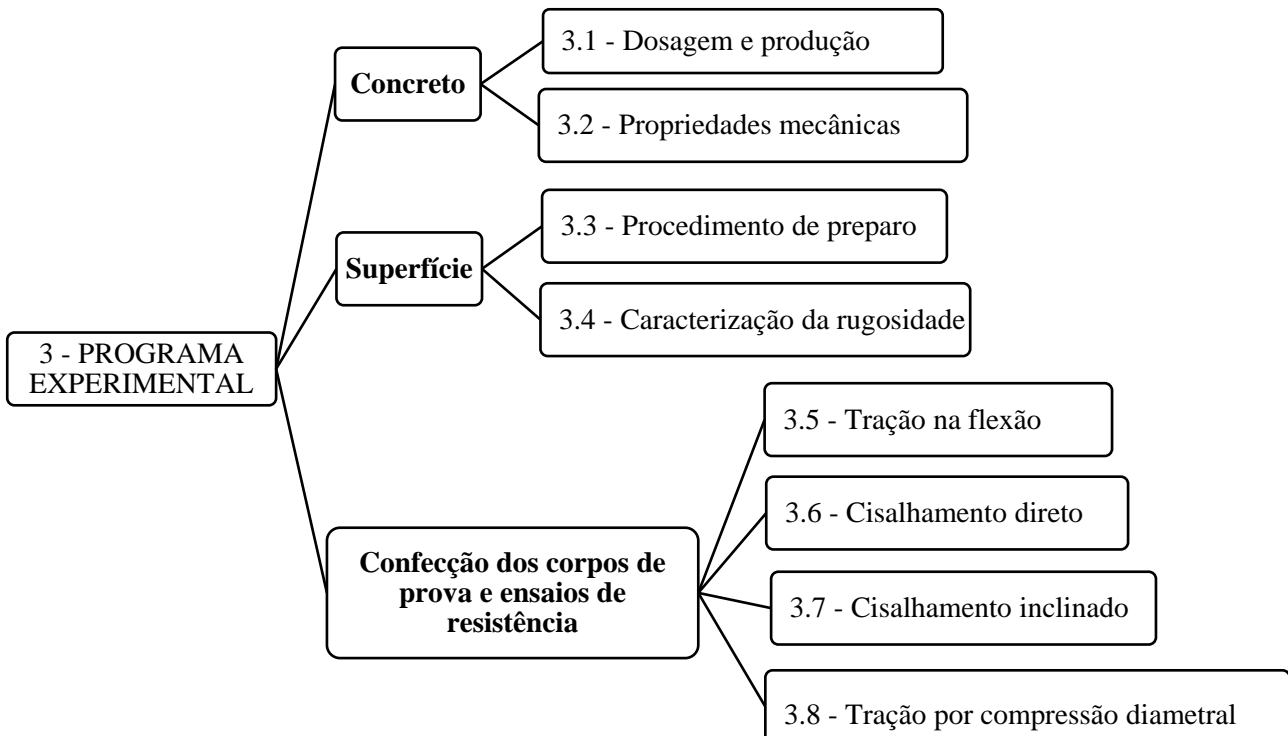









Figura 3.1 - Fluxograma das etapas do programa experimental

Tabela 3.1 - Interfaces executadas na pesquisa

Imagem da interface	Nome da interface (abreviação)
(a) 	Agregado exposto (A)
(b) 	Chave de cisalhamento (C)
(c) 	Jato de areia (J)
(d) 	Referência (R)
(e) 	Tela de aço expandida (T)
(f) 	Intermediária – fibra exposta (In)

No decorrer do ensaio de cisalhamento inclinado acrescentou a interface Intermediária – monolítica (I) devido ao tipo de ruptura da superfície Intermediária – fibra exposta (In) (Tabela 3.2). Essa interface consiste de um desmembramento da interface Intermediária – fibra exposta (In), sem o acréscimo do UHPC, na qual a associação ocorreu somente entre o CAR e o concreto intermediário com fibras, ambos no estado fresco.

Tabela 3.2 - Interface acrescentada na pesquisa

Imagem da interface	Nome da interface (abreviação)
	Intermediária – monolítico (I)

3.1 Dosagem e produção dos concretos

O traço do Concreto de Alta Resistência (CAR) utilizado para confecção dos corpos de provas está apresentado na Tabela 3.1.1. A base do traço proposto é a mesma utilizada em uma fábrica de concreto pré-fabricado. As especificações dos materiais encontram-se no apêndice A do trabalho.

Tabela 3.1.1 - Traço usado para CAR

Materiais	kg/m³
Cimento CPV Ultra Rápido Holcim	420
Brita 0	1050
Areia média	519,12
Areia fina	346,1
Água (Água/cimento = 0,37) (Água/materiais secos = 0,12)	155,4
Superplastificante (ADVA 585) (1,43% massa cimento)	6,006

A mistura dos materiais para produção do CAR consistiu na seguinte ordem:

1. Materiais secos (cimento, brita 0, areia média, areia fina) e 20% da água na betoneira desligada;
2. Mistura dos materiais secos e água por 5 minutos;
3. Acréscimo do superplastificante e 80% da água;
4. Mistura por 7 minutos (Figura 3.1.1);

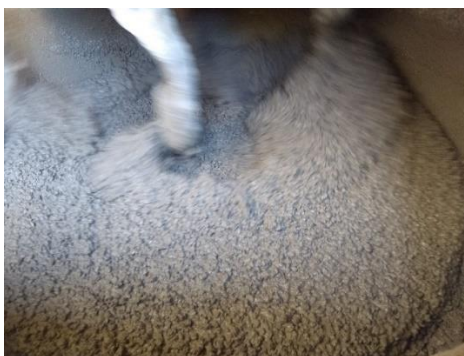


Figura 3.1.1 - Mistura do CAR

A consistência do concreto foi determinada pelo abatimento do tronco de cone de acordo com ABNT NBR NM 67: 1998, conforme apresentado na Figura 3.1.2, cujo valor médio foi de 283,75 mm com desvio padrão de 14,9 mm.



Figura 3.1.2 - Medição do abatimento do CAR

O traço do concreto de altíssimo desempenho reforçado com fibras (UHPC), desenvolvido pelo grupo de pesquisa da EESC São Carlos, aplicado na confecção dos corpos de provas está apresentado na Tabela 3.1.2. Os materiais utilizados na mistura foram nacionais, exceto pelas fibras de aço retas com revestimento de cobre (Figura 3.1.3), importada da China (Weixian Jinzhuwang Steel Fiber Manufacturing CO., LTD), cujo comprimento é de 12,0 mm +/- 10%, diâmetro de 0,2 mm +/- 10%, resistência à tração de 2900 N / mm² e razão de aspecto de 59.

Tabela 3.1.2 - Traço usado para UHPC

Materiais	kg/m³
Cimento CPV Ultra Rápido Holcim	757,2
Areia fina (Módulo de finura 80/100 - Mineração Jundu)	833,0
Pó de quartzo (SM 200 Mineração Jundu)	378,6
Sílica ativa não densificada (Elkem)	189,3
Superplastificante (ADVA 585)	68,2
Água (água/cimento = 0,37)	159,0
(água/aglomerantes = 0,168)	
(água/materiais secos = 0,07)	
Fibra (2% em volume)	157,0



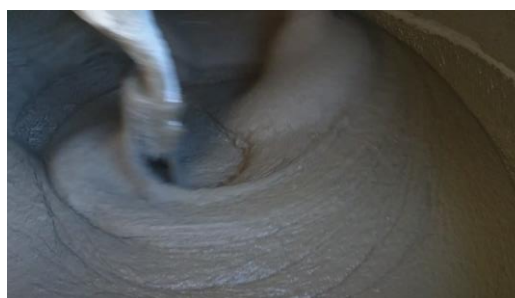
Figura 3.1.3 - Fibras retas usadas no UHPC

A mistura do UHPC foi realizada em um misturador de eixo de rotação vertical com capacidade de 250 litros e resumiu-se na seguinte ordem:

1. Areia e 10% da água para umidificar por 1 minuto;
2. Depois de 1 minuto foi acrescentado o cimento, a sílica ativa, o pó de quartzo e 75% da água, batendo por mais 5 minutos, totalizando 6 minutos;
3. Finalizado esse tempo de batida, a betoneira foi desligada para limpar as bordas e retirar o excesso de material grudado nas paredes da betoneira, pois o material ainda estava seco;
4. Limpada as bordas, a betoneira foi religada e o aditivo ADVA 525 foi colocado na mistura aos poucos (Figura 3.1.4-a) com o restante da água, batendo por 10 minutos, totalizando 16 minutos.
5. Após esse tempo, as fibras foram adicionadas com a betoneira ligada, batendo por mais 5 minutos (Figura 3.1.4-b), totalizando 21 minutos.



(a) Mistura do aditivo – tempo inicial de batida



(b) Mistura do aditivo e fibras – tempo final de batida

Figura 3.1.4 - Processo de mistura do UHPC

O espalhamento do UHPC foi determinado de acordo com a ABNT NBR 13276: 2016, exceto pelo fato de que não foi feita a batida da mesa para espalhamento, pois devido a sua alta fluidez, tal processo não foi necessário (Figura 3.1.5). O espalhamento médio foi de 597,50 mm com desvio padrão de 50 mm.



Figura 3.1.5 - Medição do espalhamento do UHPC

O traço do concreto Intermediário usado na interface com fibra exposta está apresentado na Tabela 3.1.3. A fibra de aço utilizada na mistura foi nacional (Maccaferri FS8 Wirand – 25 mm) com comprimento de 25,0 mm, diâmetro de 0,75 mm, resistência à tração de 1100 N / mm² e razão de aspecto de 33 (Figura 3.1.6). O comprimento das fibras foi determinado com base nas dimensões dos agregados e a fluidez da argamassa. Caso fosse adotado um comprimento maior, devido à alta densidade das fibras de aço em relação à fluidez do concreto, poderia haver formação de ouriços. A presença do gancho nas fibras foi considerada para que a mesma tivesse boa ancoragem e aderência no UHPC. As especificações dos outros materiais encontram-se no apêndice A do trabalho.

Tabela 3.1.3 - Traço usado para concreto Intermediário

Materiais	kg/m ³
Cimento CPV Ultra Rápido Holcim	720
Pó de quartzo (SM 200 Mineração Jundu)	120
Sílica ativa não densificada (Elkem)	240
Areia média	1200
Areia fina	120
Água	
(Água/cimento = 0,27)	
(Água/aglomerantes = 0,20)	191,952
(Água/materiais secos = 0,08)	
Superplastificante (ADVA 585)	64,667
Fibras (2% em volume)	156,875



Figura 3.1.6 - Fibras ancoradas usadas no concreto intermediário

A ordem de colocação dos materiais e o processo da mistura para o concreto intermediário seguiu o mesmo procedimento do UHPC, descrito anteriormente. O espalhamento médio foi de 730 mm com desvio padrão de 7,0 mm.

3.2 Propriedades mecânicas dos concretos

As propriedades mecânicas dos concretos utilizados na pesquisa (CAR, UHPC e Concreto Intermediário) foram determinadas através dos ensaios realizados na Instron modelo 300 HVL com capacidade de 1500 kN.

3.2.1 Resistência à compressão e módulo de elasticidade

O ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com a ABNT NBR 8522:2017. Aplicou-se a força continuamente no corpo de prova com controle de deslocamento constante de 0,005 mm / s, a fim de pegar o comportamento pós – pico. Para medição dos deslocamentos foram utilizados Clip-Gages, posicionados na face do concreto, e transdutores de deslocamento, dispostos nas bases da máquina do ensaio (Figura 3.2.1).

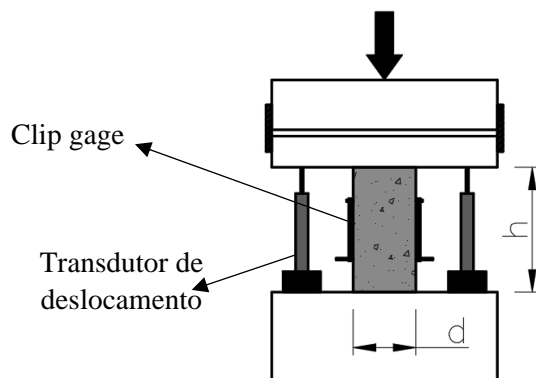


Figura 3.2.1 - Instrumentação e esquema de aplicação do carregamento para ensaio de resistência à compressão e módulo de deformação secante

Para o ensaio dos corpos de prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura do CAR sem fibras, os clip-gages, com comprimento inicial de 100 mm, foram retirados após atingir 60% da carga de ruptura, pois a mesma era explosiva. Na medição do deslocamento total do cilindro até a ruptura foram deixados os transdutores de deslocamento nas bases da máquina do ensaio.

No ensaio dos corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura do UHPC e do concreto Intermediário, os clip-gages, com comprimento inicial de 50 mm, foram

mantidos até a ruptura, pois a mesma não era explosiva, devido à presença das fibras. Como os clip-gages não eram capazes de registrar o comportamento pós pico, foram mantidos os transdutores de deslocamento nas bases da máquina do ensaio, para analisar esse comportamento.

A resistência à compressão foi calculada através da expressão proposta na ABNT NBR 5739: 2007 e o módulo de deformação secante - E_{cs} foi calculado pela ABNT NBR 8522: 2017.

Como a deformação obtida pela leitura dos transdutores de deslocamento é maior em relação à leitura obtida pelo clip gage, devido a acomodação entre as placas da máquina e amostra na qual os transdutores de deslocamento foram posicionados (Figura 3.2.2), a correção da curva $\sigma \times \varepsilon$ do transdutor de deslocamento foi feita com base na Equação (3.2.1) proposta por Baíran e Marí (2013).

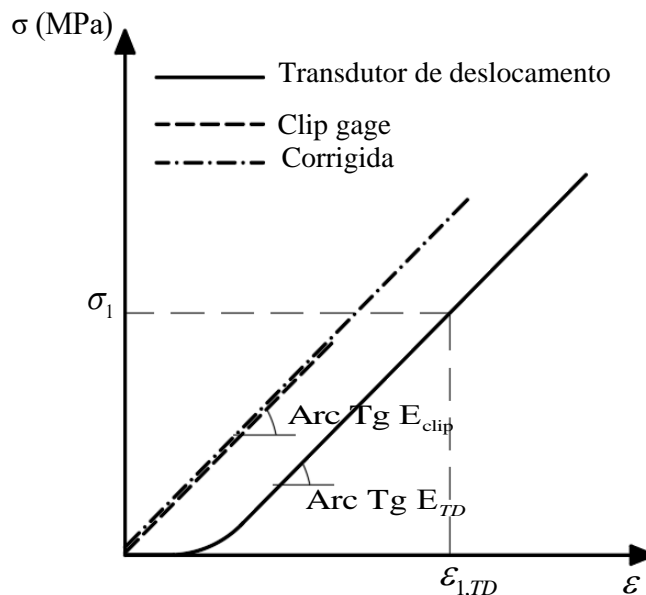


Figura 3.2.2 - Diferença da leitura tensão – deformação do Clip Gage e Transdutor de deslocamento

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{1,TD} - \frac{(E_{Clip} - E_{TD})}{E_{Clip} E_{TD}} \cdot \sigma_1 \quad (3.2.1)$$

3.2.2 Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi executado de acordo com ABNT NBR 7222: 2011. Aplicou-se a força continuamente no corpo de prova cilíndrico, com 100 mm de diâmetro e altura de 200 mm, com controle de deslocamento constante de 0,005 mm / s.

3.2.3 Resistência à tração direta

Aplicou-se a força continuamente no corpo de prova, cuja geometria está indicada na Figura 3.2.3, com controle de deslocamento constante de 0,005 mm / s, adaptada de Su – Tae Kang (2016). Para a medição dos deslocamentos verticais foram utilizados transdutores de deslocamento, com comprimento inicial de 80,00 mm (Figura 3.2.3).

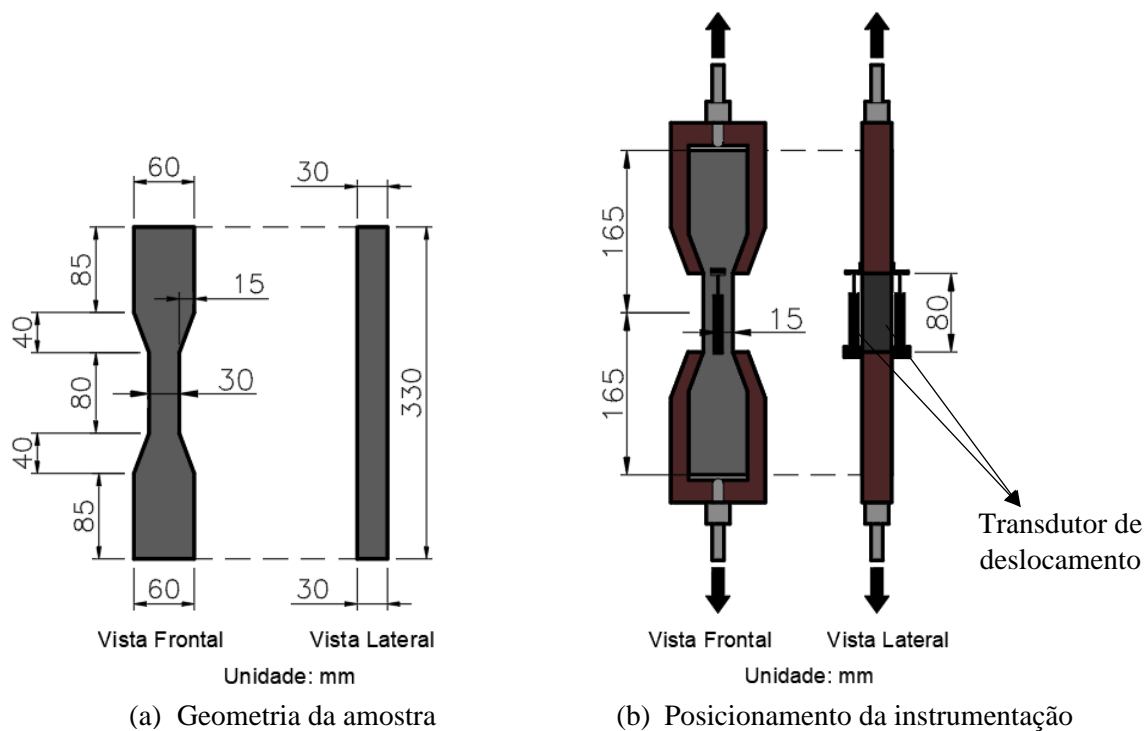


Figura 3.2.3 - Configuração do ensaio de resistência à tração direta

3.2.4 Resistência à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado de acordo com a ABNT NBR 12142: 2010. Aplicou-se a força no modelo com controle de deslocamento constante do Clip Gage de 0,0001 mm / s, adotada com base no trabalho de Oliveira Júnio (2012) e ensaios pilotos realizados.

Os corpos de prova usados na execução do ensaio foram prismáticos, de acordo com a ABNT NBR 5838:2003, com comprimento de 500 mm, seção transversal quadrada de 150 mm x 150 mm e entalhados no meio do vão (Figura 3.2.4). Para medição dos deslocamentos verticais foram utilizados transdutores de deslocamentos (TD) com curso de 25 mm e a medição da abertura do entalhe foi através do clip gage (Figura 3.2.5).

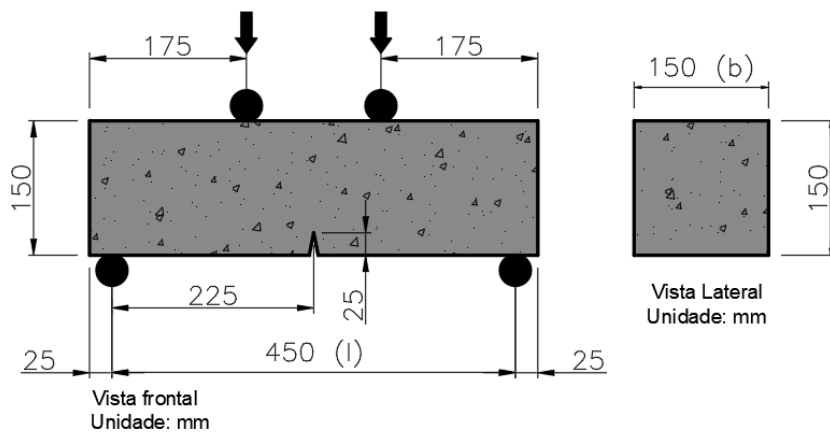


Figura 3.2.4 - Geometria do prisma e esquema de aplicação do carregamento para o ensaio de resistência à tração na flexão

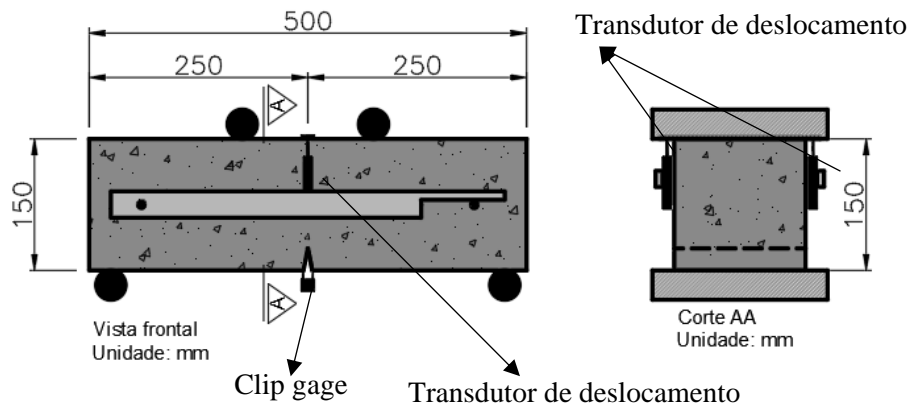


Figura 3.2.5 - Instrumentação adotada para o ensaio de resistência à tração na flexão

3.2.5 Energia de fratura

O ensaio de resistência à flexão em três pontos foi realizado de acordo com ASTM C293: 2016. Aplicou-se a força continuamente no modelo com controle de deslocamento constante do clip gage de 0,0001 mm / s, adotada com base no trabalho de Oliveira Júnio (2012) e ensaios pilotos realizados.

Os corpos de prova usados na execução do ensaio foram prismáticos, de acordo com a ABNT NBR 5838:2003, com comprimento de 500 mm, seção transversal quadrada de 150 mm x 150 mm e entalhados no meio do vão (Figura 3.2.6). Para medição dos deslocamentos verticais foram utilizados transdutores de deslocamentos (TD) com curso de 25 mm e a medição da abertura do entalhe foi pelo clip gage (Figura 3.2.7).

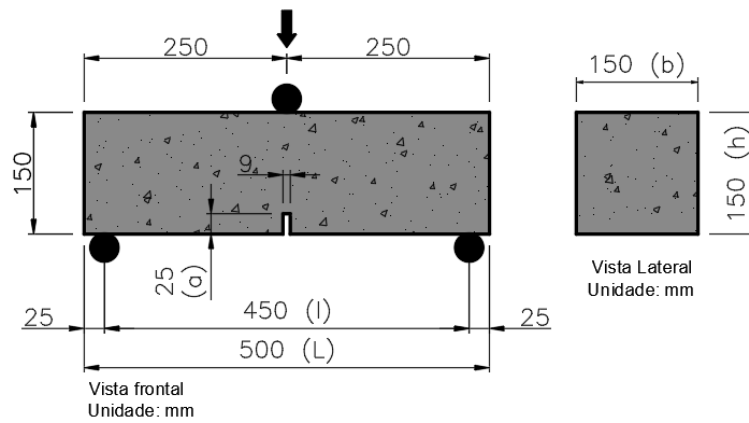


Figura 3.2.6 - Geometria do prisma e esquema de aplicação do carregamento para o ensaio de resistência à flexão em três pontos

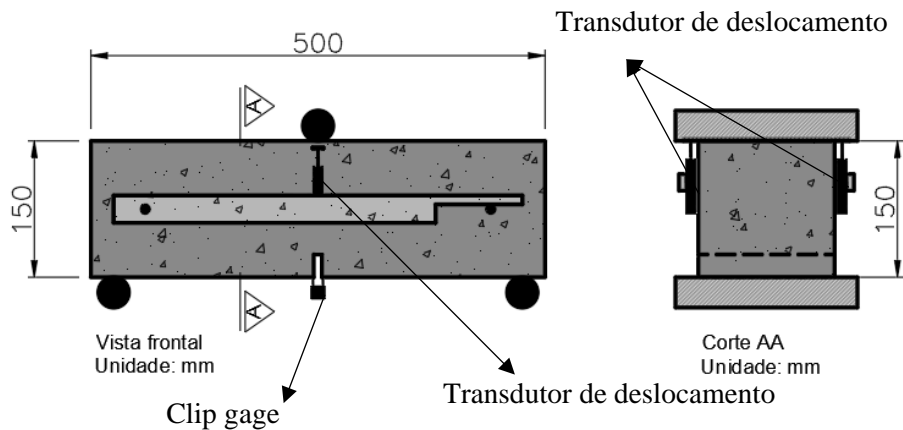


Figura 3.2.7 - Instrumentação adotada para o ensaio de resistência à flexão em três pontos

O cálculo da energia de fratura (G_f) no modo I, feito de acordo com a Equação (3.2.2) apresentada na recomendação do RILEM 50-FMC (1985), especifica o método para determinação da energia de fratura em argamassas e concreto através do ensaio de flexão em três pontos em vigas com entalhe. A mesma é definida como a energia necessária para criar uma área unitária de uma fissura.

$$G_f = \frac{W_0 + (m_1 + 2m_2) \cdot g \cdot \delta_u}{A_{lig}} \quad (3.2.2)$$

Sendo W_0 o trabalho produzido pela força P exercida pelo atuador durante a deformação do corpo de prova (área sob a curva $P - \delta$), m_1 a massa do corpo de prova entre os apoios, calculado como o peso da viga multiplicado por l / L ; m_2 a massa do equipamento que não está conectado ao atuador, mas que acompanha o deslocamento do corpo de prova durante o ensaio; g a aceleração da

gravidade, δu o deslocamento último registrado na ruptura do corpo de prova e $A_{lig} = b(h - a)$ a área da ligação acima do entalhe.

3.3 Procedimentos de preparo da superfície

Nas superfícies do CAR foram realizados diferentes tipos de preparo para receber o UHPC: Agregado exposto (A); Chave de cisalhamento (C); Jato de areia (J); Referência (R); Tela de aço expandida (T); e uma superfície moldada no concreto Intermediária – fibra exposta (In). Durante a execução do ensaio de cisalhamento inclinado, devido ao tipo de ruptura da superfície Intermediária – fibra exposta (In), houve a necessidade de acrescentar um outro tipo de interface, Intermediária – monolítico (I), que foi um desmembramento da superfície Intermediária – fibra exposta (In).

Nos corpos de prova confeccionados para os ensaios da interface do CAR e UHPC, as superfícies estudadas foram concebidas no CAR. Imediatamente antes da associação do UHPC no CAR, as superfícies foram limpas com jato de ar para a retirada de partículas e umidificada, de modo que a água presente no UHPC não percolasse para o concreto endurecido. A Figura 3.3.1 mostra a finalização da montagem do corpo de prova.

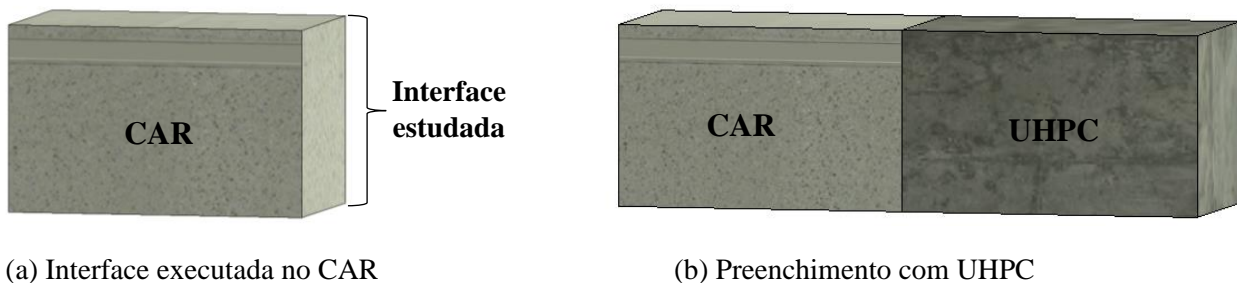


Figura 3.3.1 - Esquema da interface do CAR e UHPC

- **Agregado exposto (A):** Na divisória das fôrmas usadas na separação do CAR e UHPC foi deixado um tecido. Imediatamente antes do lançamento do CAR, o tecido foi umedecido com o aditivo retardador de pega superficial líquido MC – SR (densidade = 1,03 g/cm³ e ph = 9-10). Após a desforma do CAR, a superfície em contato com o tecido ficou lisa e, depois de passado por um processo de escovação com cerdas de aço, a argamassa saiu da superfície, ficando o agregado exposto (Figura 3.3.2).

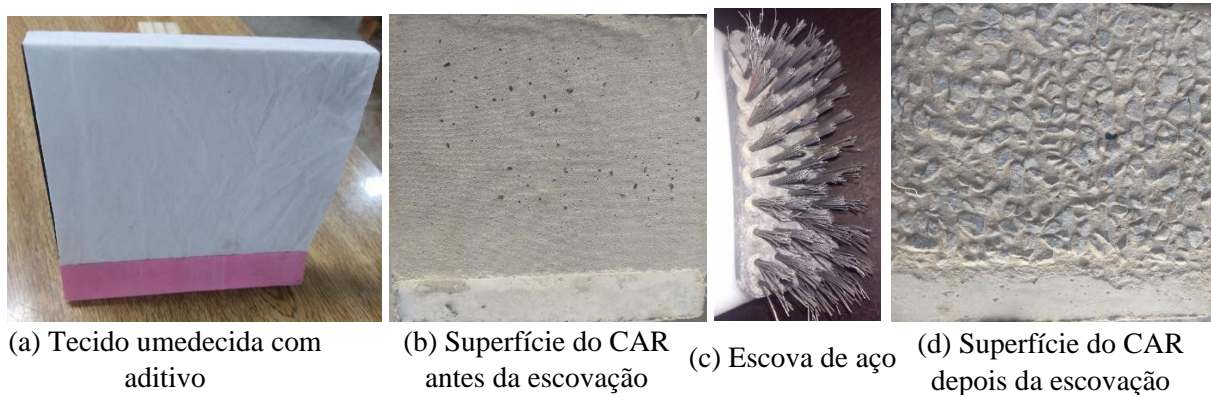


Figura 3.3.2 - Interface Agregado exposto (A)

- **Chave de cisalhamento (C):** Madeiras com seção trapezoidal espaçadas de 10 mm foram coladas na divisória das fôrmas usadas na separação do CAR e UHPC. As dimensões adotadas para o trapézio foram baseadas nos estudos feitos por Canha (2004), respeitando as dimensões do agregado e ângulo de inclinação da face de 45°, quando se deseja evitar a ruptura por deslizamento da chave. Após a desforma, a superfície do CAR adquiriu o formato da chave de cisalhamento (Figura 3.3.3).

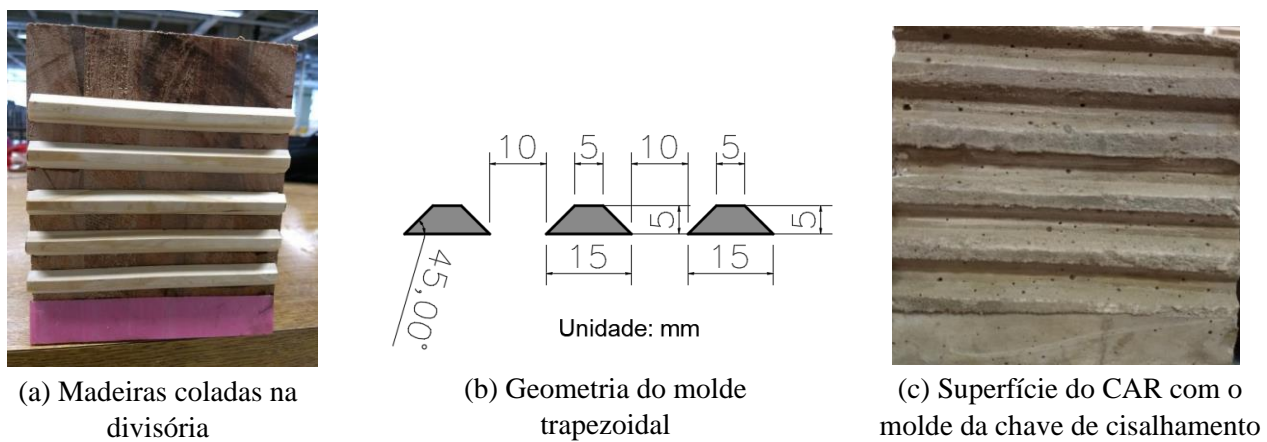


Figura 3.3.3 - Interface Chave de cisalhamento (C)

- **Jato de areia (J):** A divisória das fôrmas usadas na separação do CAR e UHPC foi lisa. O CAR, depois de 24 horas da sua concretagem, recebeu o tratamento com jato de areia, de modo a deixar os agregados expostos (Figura 3.3.4)



Figura 3.3.4 - Interface Jato de areia (J)

– **Referência (R):** A divisória das fôrmas usadas na separação do CAR e UHPC foi lisa. A superfície final no CAR está indicada na Figura 3.3.5.



Figura 3.3.5 - Interface referência (R)

- **Tela de aço expandida (T):** Fixou-se a tela de aço expandida na divisória das fôrmas (Figura 3.3.6-a) para a separação do CAR e UHPC, com as dimensões indicadas na Figura 3.3.6-b. A geometria da tela foi considerada para possibilitar uma boa desforma do concreto, sem haver lascamentos ou quebras de canto, e uma rugosidade adequada, seguindo as medidas comerciais. Após a desforma do CAR, a superfície adquiriu o formato da tela, conforme apresentado na Figura 3.3.6-c.

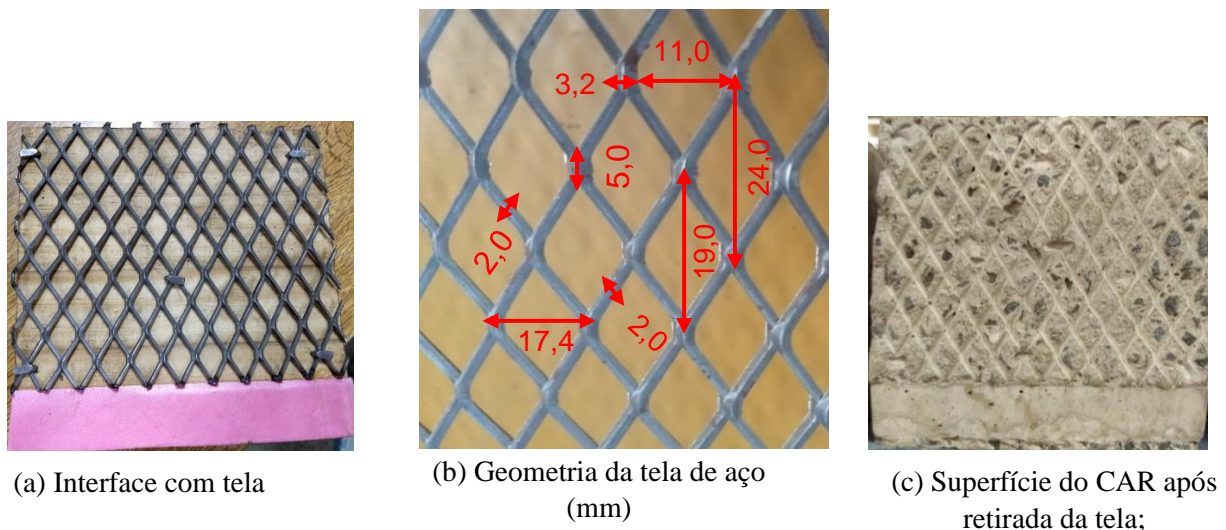


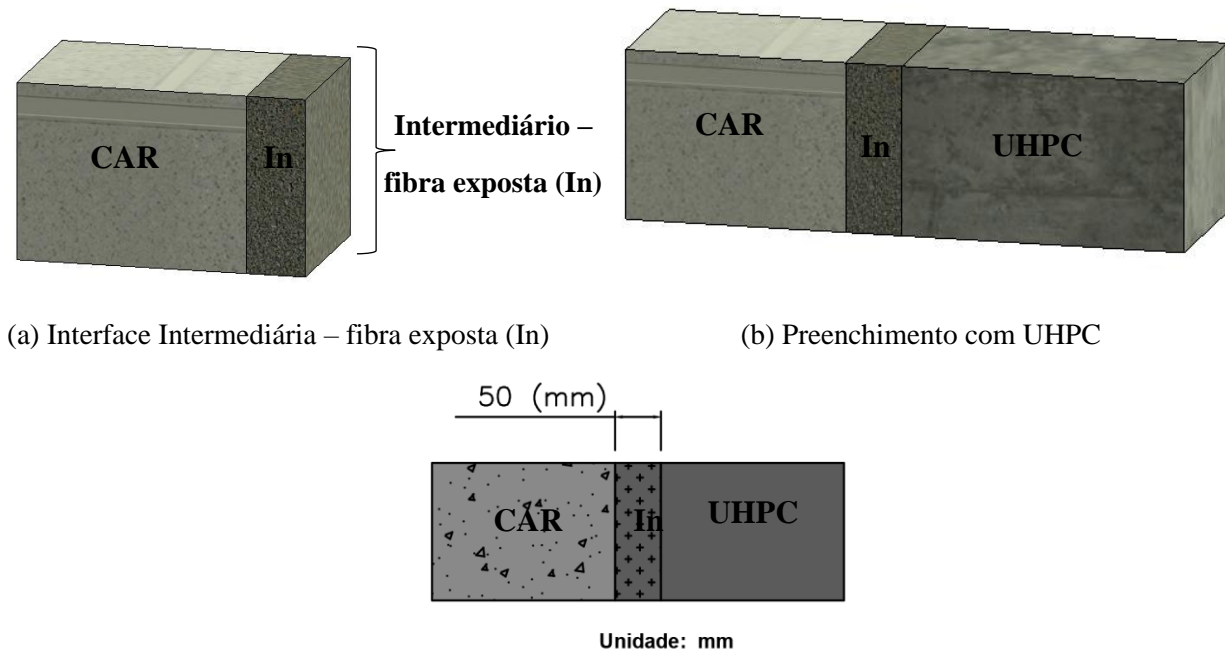
Figura 3.3.6 - Interface tela (T)

-Intermediária – fibra exposta (In): Entre o CAR e o UHPC foi colocado o concreto com resistência à compressão intermediária aos concretos estudados, com espessura de 50 mm e fibras de aço na mistura (Figura 3.3.7). Primeiramente foi lançado na fôrma o CAR e, em seguida, o concreto intermediário com fibras, com os dois concretos ainda no estado fresco, separados por uma tela de aço (Figura 3.3.8), para que a moldagem fosse em conjunto, permitindo a ligação química das pastas de cimento, de acordo com o modelo proposto por Zohrevand et al. (2014). As dimensões da tela de aço usada na separação dos dois concretos foram adotadas com base em estudos preliminares. A tela de aço não poderia ter aberturas grandes, de modo a impedir a passagem do agregado graúdo, e também não poderia haver dimensões reduzidas, pois a pasta de cimento do CAR deveria atravessar pela tela para unir ao concreto intermediário.

Inicialmente a divisória usada na separação do concreto Intermediário e o UHPC, na qual iria ficar a fibra de aço exposta, foi lisa. Porém, devido ao “efeito parede”, percebeu-se baixa concentração de fibras na interface. Diante desses resultados optou-se por deixar chaves de cisalhamento, com os mesmos espaçamentos e dimensões do molde usado na interface Chave de cisalhamento (Figura 3.3.3). De acordo com Alferes Filho, Monte e Figueiredo (2019), as condições de moldagem do concreto com fibras de elevada fluidez podem ter um papel importante para aumentar o efeito na concentração e orientação das fibras, que é dado pelo fluxo durante o processo de lançamento do concreto, onde o efeito parede é menos presente, sendo essa propriedade um fator relevante que pode ter interferência no comportamento mecânico.

Depois de desformada, a interface do concreto intermediário adquiriu o formato da chave de cisalhamento, com algumas fibras de aço aparente (Figura 3.3.8-c). Como a intenção era deixar maior quantidade de fibras de aço expostas, as chaves de cisalhamento foram quebradas (Figura

3.3.8-d). As fibras expostas no concreto intermediário permaneceram com o gancho na extremidade e inclinação aleatória.



(c) Espessura da interface Intermediária – fibra exposta (In)

Figura 3.3.7 - Esquema da interface Intermediária – fibra exposta e UHPC

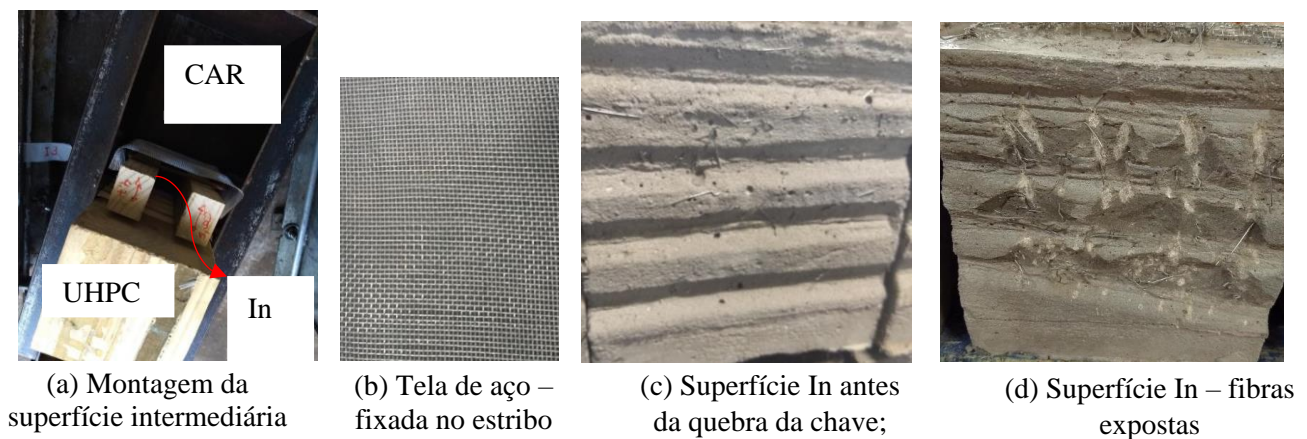


Figura 3.3.8 - Interface Intermediária – fibra exposta (In)

Intermediária – monolítico (I): Essa interface foi acrescida durante a execução dos ensaios da interface. A montagem do modelo da interface Intermediária - monolítica (I) foi parecida com a montagem da interface Intermediária – fibra exposta (In), porém sem a presença do UHPC. Associou-se o concreto intermediário no CAR ainda no estado fresco. Primeiramente foi lançado na fôrma o CAR e depois o concreto intermediário, separados por uma tela de aço, para que a moldagem dos dois concretos fosse em conjunto (Figura 3.3.9).



Figura 3.3.9 - Interface Intermediária – monolítico (I)

3.4 Caracterização da rugosidade da superfície

A caracterização da rugosidade nas superfícies feitas no CAR foi através da medição por coordenadas e pelo método da mancha de areia.

3.4.1 Medições por coordenadas

A medição por coordenadas na superfície foi realizada na máquina da Hexagon CROMA (Figura 3.4.1) com os perfis de medição automatizados no software. Foi adotada a sonda de medição por contato tipo esfera de rubi sintética com diâmetro de 2,0 mm. Esse diâmetro foi considerado por ser o menor disponível no laboratório, minimizando o efeito do desvio de forma.

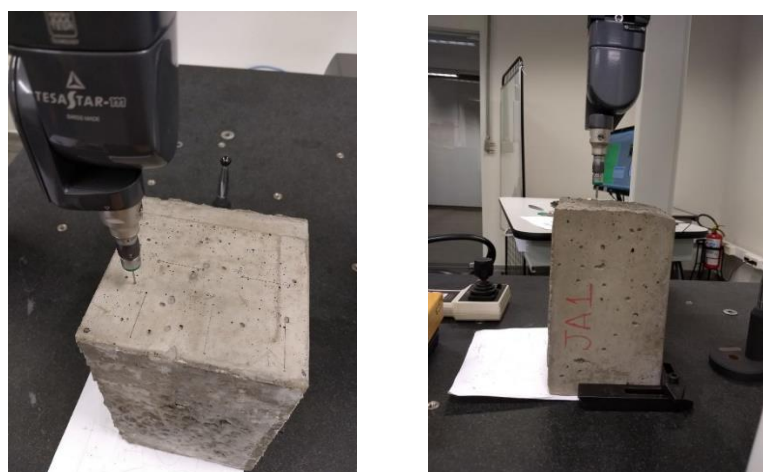


Figura 3.4.1 - Medição da rugosidade nas superfícies

Para a delimitação do comprimento de amostragem da medição da rugosidade realizou-se um estudo considerando a superfície Referência, na qual foi encontrado o valor de Ra maior que 80 μm . Diante desse resultado prévio e com os valores definidos na Tabela 2.2 (ABNT NBR ISO

4288:2008) foram determinados os comprimentos de medição. De acordo com a ABNT NBR ISO 4288: 2008, quanto maior o número de medições e mais longo for o comprimento de avaliação, maior é a confiabilidade. Diante dessas considerações foi discutido que cinco perfis de medição poderiam fornecer resultados consistentes dos parâmetros de rugosidade.

Para o projeto o comprimento de avaliação foi de 35 mm, comprimento de amostragem da rugosidade de 7,00 mm e espaçamento das medições de 0,20 mm, conforme ilustrado na Figura 3.4.2. Realizou-se as medições para a superfície Agregado exposto (A), Jato de areia (J) e Referência (R). Foram consideradas cinco medições de perfis para cada amostra, sendo três amostras de cada superfície estudada.

Na superfície com tela os perfis não foram bem representados com os comprimentos de medição adotados na Figura 3.4.2, sendo necessário realizar novas medições, considerando os critérios apresentados na Figura 3.4.3, respeitando o espaçamento das medições de 0,20 mm.

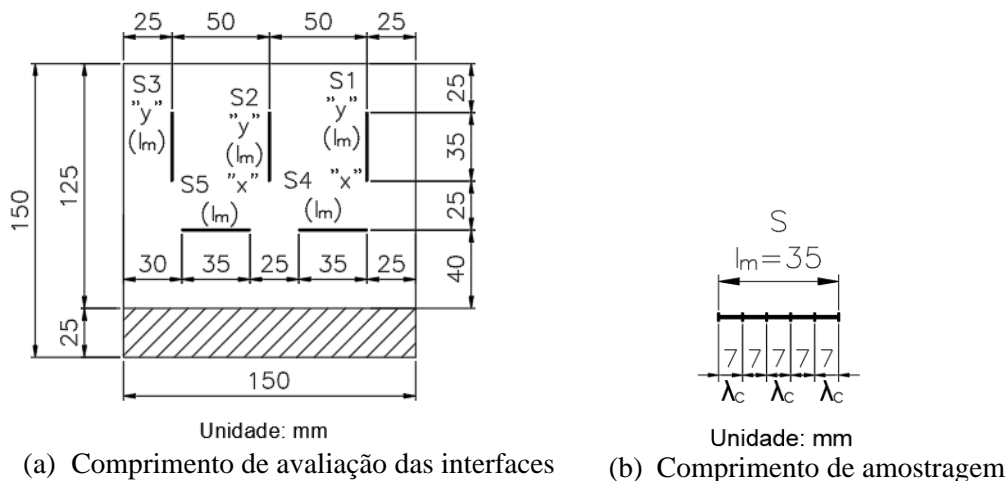


Figura 3.4.2 – Tamanho e posição do comprimento de avaliação para as interfaces Agregado exposto (A), Jato de areia (J) e Referência (R)

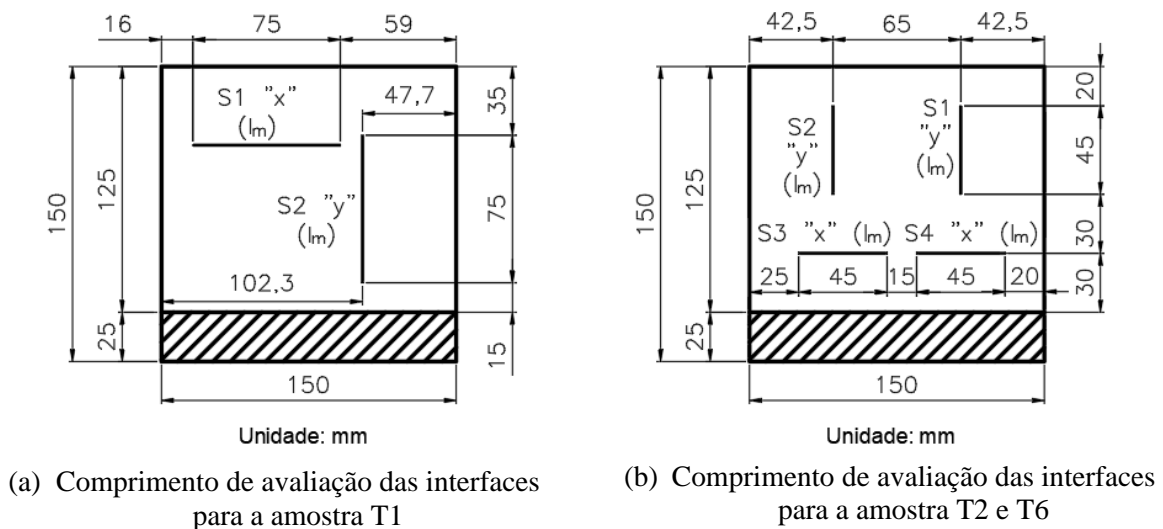


Figura 3.4.3 – Tamanho e posição do comprimento de avaliação para a interface Tela (T)

Após a medição do comprimento de avaliação, os mesmos foram corrigidos pelo método dos mínimos quadrados, conforme apresentado na Figura 3.4.4.

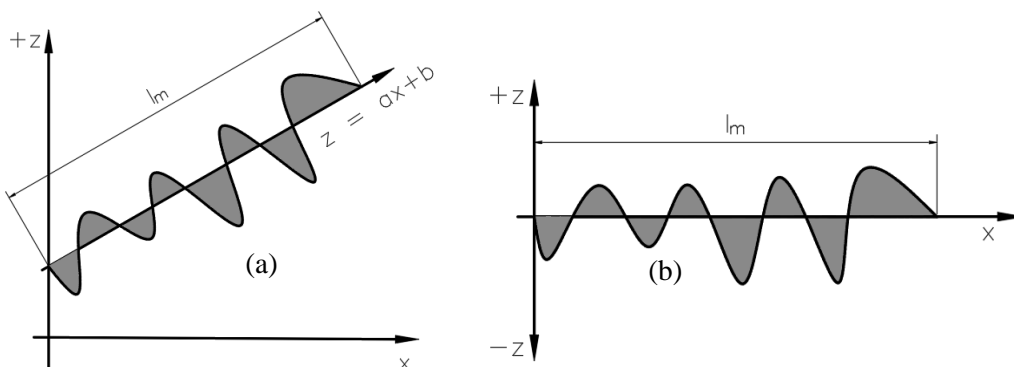


Figura 3.4.4 – Comprimento de avaliação: (a) medido; (b) nivelado

3.4.2 Método da mancha de areia

Para o ensaio do método da mancha de areia considerou-se areia fina de massa unitária igual 1,56 g/cm³. A mesma foi espalhada sobre a superfície seca do concreto (Figura 3.4.5-a) e, com o auxílio de um disco espalhador, formou o círculo (Figura 3.4.5-b) para medição do diâmetro (Figura 3.4.5-c). Com base no diâmetro medido e no volume de areia espalhado calculou a profundidade média. Realizou as medições para a superfície Agregado exposto (A), Jato de areia (J) e Tela (T). Foram consideradas quatro medições de diâmetro para cada amostra, sendo quatro amostras de cada superfície estudada.

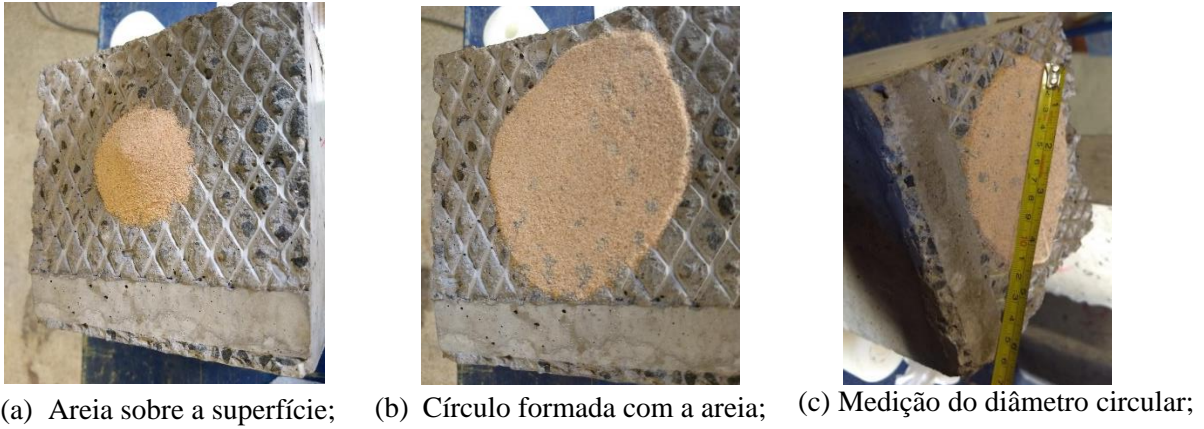


Figura 3.4.5 - Medição da profundidade média pelo método da mancha de areia

3.5 Resistência à tração na flexão

3.5.1 Geometria dos corpos de prova

Para o ensaio de resistência à tração na flexão usou o modelo prismático (ABNT NBR 12142: 2010) com dois tipos de corpos de prova: com as variações das superfícies executadas no CAR e posterior preenchimento com UHPC; e sem interface (monolítico), usado como referência em relação aos corpo de prova com interface, tanto para o CAR, quanto para o UHPC (Figura 3.5.1). A Tabela 3.5.1 exibe a quantidade de corpos de prova confeccionados para o ensaio de resistência à tração na flexão.

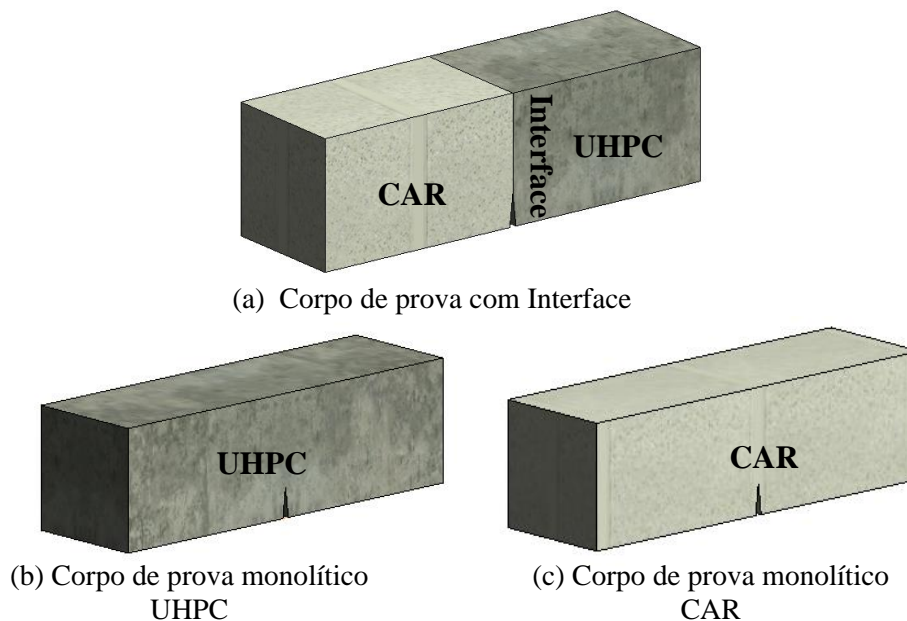


Figura 3.5.1 - Perspectiva dos corpos de prova para o ensaio de resistência à tração na flexão

Tabela 3.5.1 - Quantidade de corpos de prova concretados no ensaio de resistência à tração na flexão

Corpos de prova com interface	Quantidade de corpos de prova
Agregado exposto (A)	4
Chave de cisalhamento (C)	4
Jato de areia (J)	4
Referência (R)	4
Tela de aço expandida (T)	4
Intermediária – fibra exposta (In)	4
Monolítico	Quantidade de corpos de prova
CAR	3
UHPC	3

A geometria do modelo foi retangular com seção transversal de 150 mm x 150 mm, comprimento de 500 mm (ABNT NBR 5738: 2016) e entalhe triangular moldado na interface, de base 10 mm e altura de 25 mm (Figura 3.5.2). A delimitação da interface foi feita com uma divisória colocada no centro da fôrma. Os corpos de prova monolíticos foram concretados sem a divisória e entalhe retangular serrado, de base 10 mm e altura de 25 mm.

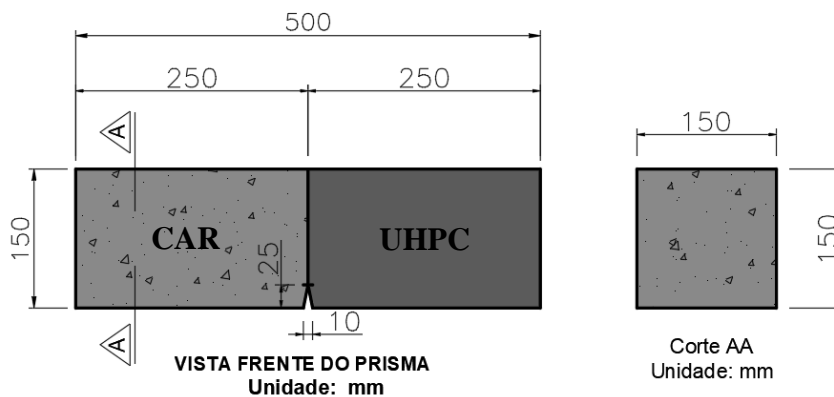


Figura 3.5.2 - Geometria do modelo prismático para o ensaio de resistência à tração na flexão - corpo de prova com interface

3.5.2 Confeção da interface

Antes da concretagem posicionou-se a divisória vertical no centro da fôrma, juntamente com os moldes, para formar a rugosidade das interfaces estudadas e o entalhe (Figura 3.5.3). Na superfície Referência (R) e Jato de areia (J), cujo jateamento foi feito após a concretagem, não foram

deixados nenhum molde na divisória, somente o entalhe. Na interface com Chave de cisalhamento (C) foram deixados 5 moldes trapezoidais (Figura 3.5.4).

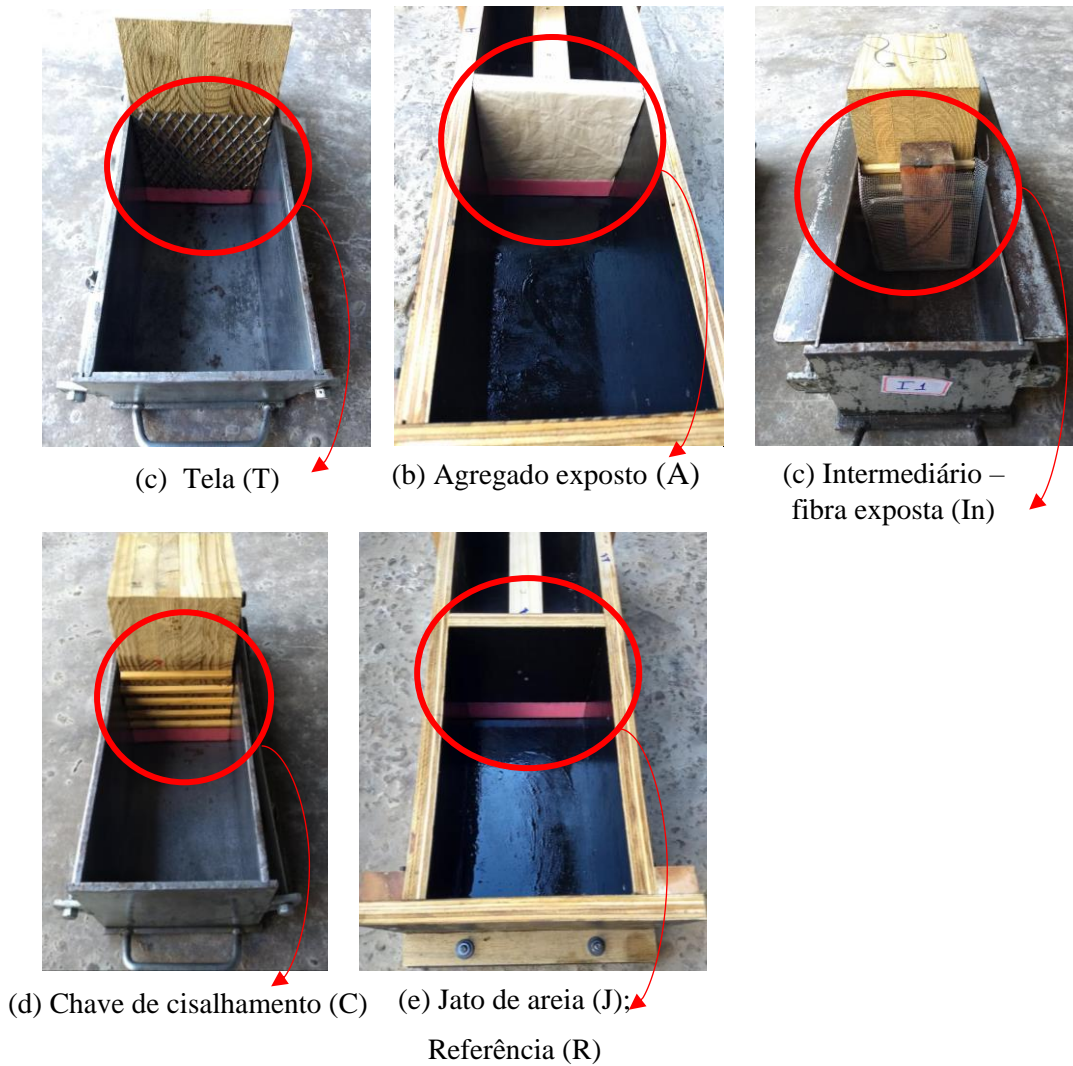


Figura 3.5.3 - Detalhe dos moldes na divisória para confecção das interfaces

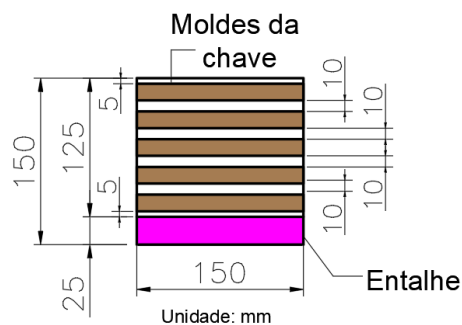


Figura 3.5.4 - Espaçamento da chave de cisalhamento no ensaio de resistência à tração na flexão

3.5.3 Concretagem

A concretagem das peças foi realizada em duas etapas. Na Etapa 1 efetuou-se o preenchimento da metade da fôrma com CAR. Depois de 84 dias foi efetuada a Etapa 2, com o preenchimento da outra metade da fôrma pelo UHPC (Figura 3.5.5). Durante o período entre a Etapa 1 e 2, as metades dos corpos de prova preenchidos com CAR sofreram cura seca em local coberto. Antes da concretagem da Etapa 2, as superfícies do concreto endurecido foram limpas com jato de ar e umidificadas para receber o UHPC. Após a concretagem da Etapa 2, os corpos de prova foram submetidos à cura úmida na câmara, de acordo com ABNT NBR 8522: 2017. Os corpos de prova usados na caracterização dos concretos (ensaio de resistência mecânica) foram submetidos ao mesmo tipo de cura dos corpos de prova usados no ensaio de resistência à tração na flexão.

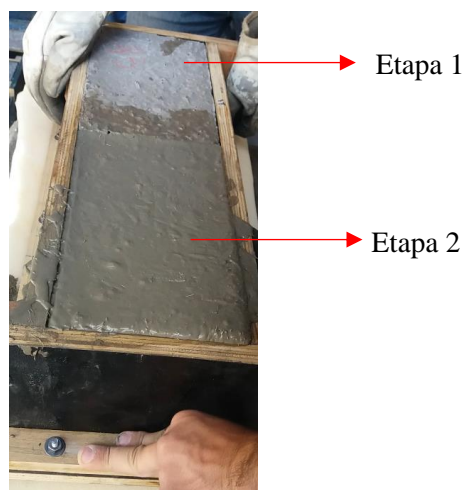


Figura 3.5.5 - Concretagem da Etapa 2 para o ensaio de resistência à tração na flexão

3.5.4 Instrumentação e execução do ensaio

Realizou-se o ensaio de resistência à tração na flexão, de acordo com a ABNT NBR 8522: 2017, na Instron modelo 300 HVL com capacidade de 1500 kN. A força foi aplicada no modelo com controle de deslocamento do clip gage e taxa de carregamento de 0,0001 mm / s, adotada com base no trabalho de Oliveira Júnior (2012) e ensaios pilotos realizados. A taxa de carregamento no corpo de prova com interface Referência (R) foi diferente das demais, pois devido a fragilidade da ligação, resolveu-se adotar o valor de 0,00001 mm / s. A Figura 3.5.6 apresenta a perspectiva da estrutura para o ensaio de resistência à tração na flexão.

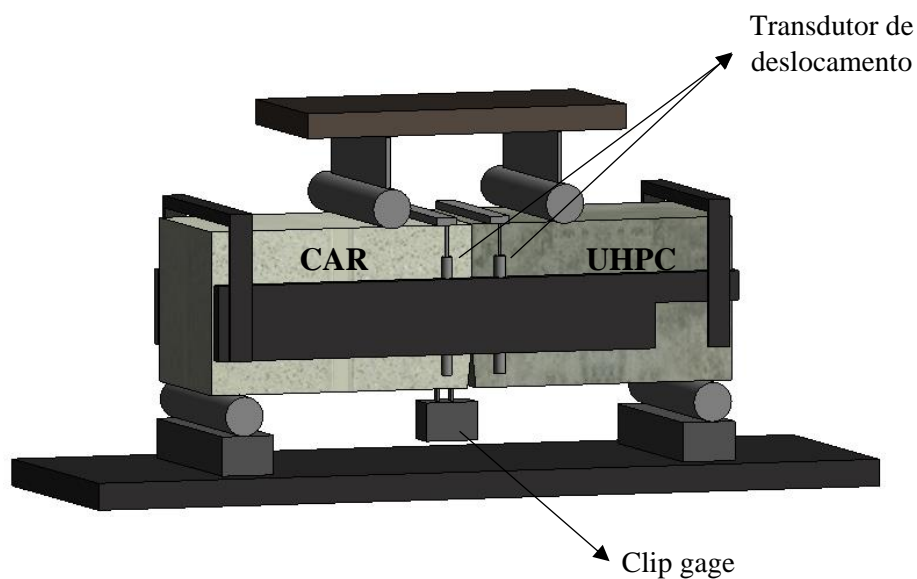


Figura 3.5.6 - Perspectiva do corpo de prova para o ensaio de resistência à tração na flexão

Para medição dos deslocamentos verticais foram utilizados transdutores de deslocamentos (TD) com curso de 25 mm e a medição da abertura do entalhe foi feita pelo clip gage. Em dois corpos de prova de cada interface foram posicionados extensômetros no topo do prisma para medição da deformação de compressão. A posição e nomenclatura dos instrumentos de medição podem ser vistas na Figura 3.5.7 e Figura 3.5.8 para os corpos de prova com interface e monolítico, respectivamente.

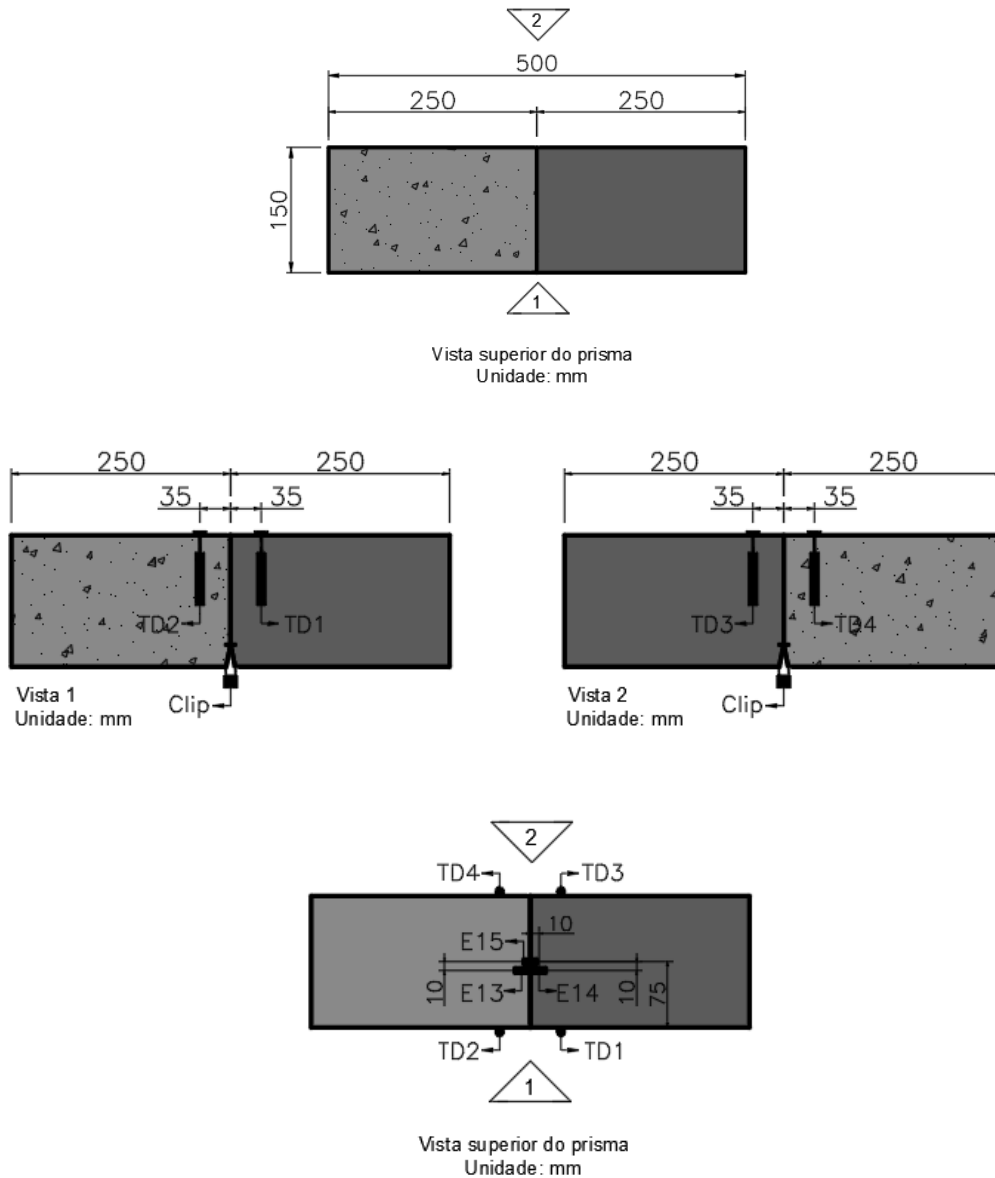


Figura 3.5.7 - Posicionamento e nomenclatura dos transdutores de deslocamento (TD), clip gage (Clip) e extensômetros usados no ensaio de resistência à tração na flexão – corpo de prova com interface

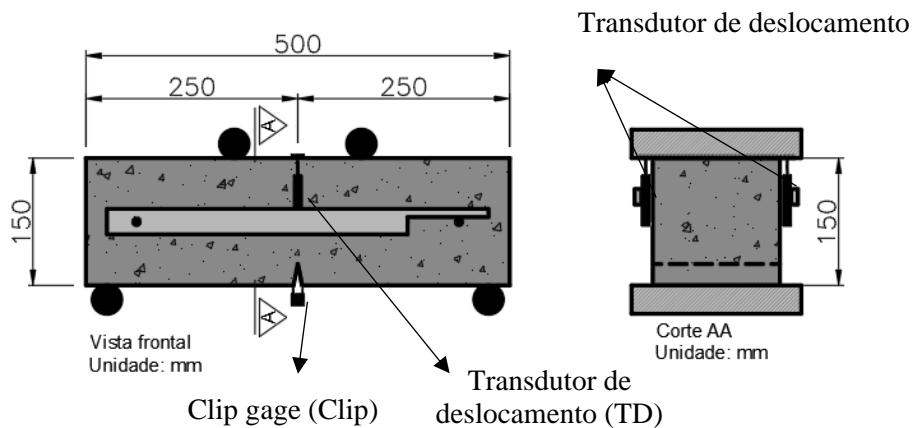


Figura 3.5.8 - Posicionamento e nomenclatura dos transdutores de deslocamento (TD) e clip gage (Clip) usado no ensaio de resistência à tração na flexão – corpo de prova monolítico

3.6 Resistência ao cisalhamento direto

3.6.1 Geometria dos corpos de prova

Para o ensaio de resistência ao cisalhamento direto usou o modelo de prisma com dois tipos de corpos de prova: com as variações de superfícies feitas no CAR e posterior preenchimento com UHPC; e sem interface (monolítico), usado como referência em relação aos corpos de prova com interface, tanto para o CAR, quanto para o UHPC (Figura 3.6.1). A Tabela 3.6.1 exibe a quantidade de corpos de prova confeccionados para o ensaio de resistência ao cisalhamento direto.

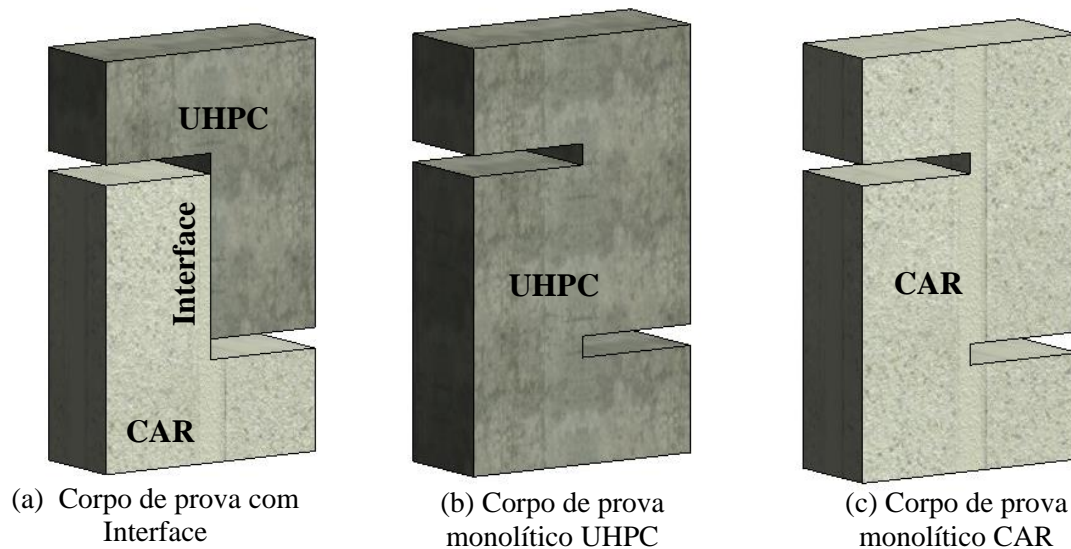


Figura 3.6.1- Perspectiva dos corpos de prova para o ensaio de resistência ao cisalhamento direto

Tabela 3.6.1 – Quantidade de corpos de prova concretados no ensaio de resistência ao cisalhamento direto

Corpos de prova com interface	Quantidade de corpos de prova
Agregado exposto (A)	3
Chave de cisalhamento (C)	3
Jato de areia (J)	3
Referência (R)	3
Tela de aço expandida (T)	3
Intermediária – fibra exposta (In)	3
Intermediária – monolítico (I)	3
Monolítico	Quantidade de corpos de prova
CAR	3
UHPC	3

A geometria do modelo foi retangular, com largura de 300 mm, altura de 500 mm e espessura de 150 mm (Figura 3.6.2). Para o estudo dos corpos de prova com interface colocou-se uma divisória no centro da fôrma com 200 mm de comprimento. Uma folga de 25 mm foi deixada entre os dois concretos, na parte superior e inferior da fôrma, para investigar o efeito do cisalhamento puro. A diferença dos corpos de prova com interface e sem interface (monolítico) foi a divisória colocada no centro da fôrma.

Para evitar a ruptura do concreto antes da ruptura da interface, os corpos de prova foram reforçados com barras de aço, de acordo com o esquema apresentado na Figura 3.6.3, utilizando espaçadores de 25 mm de cobrimento para garantir o posicionamento da armadura na fôrma. O detalhamento da armadura encontra-se no Apêndice D.

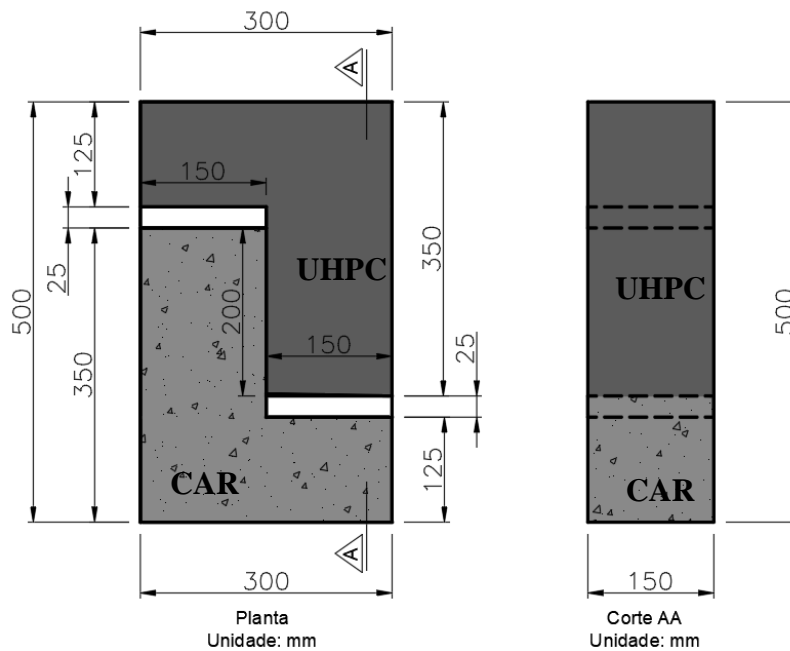
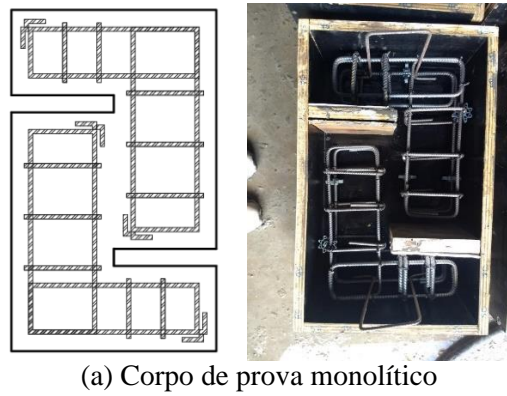


Figura 3.6.2 - Geometria do prisma para o ensaio de resistência ao cisalhamento direto - corpo de prova com interface



(a) Corpo de prova monolítico



(b) Corpo de prova com interface

Figura 3.6.3 - Detalhamento do arranjo da armadura usada nos corpos de prova para o ensaio de resistência ao cisalhamento direto

3.6.2 Confecção da interface

Antes da concretagem, na região central da fôrma com interface, posicionou-se as divisórias para formar a rugosidade das interfaces estudadas (Figura 3.6.4). Na superfície Referência (R) e Jato de areia (J), cujo jateamento foi feito após a concretagem, não foram deixados nenhum molde na divisória. Na interface com Chave de cisalhamento (C) foram deixados 8 moldes trapezoidais (Figura 3.6.5).

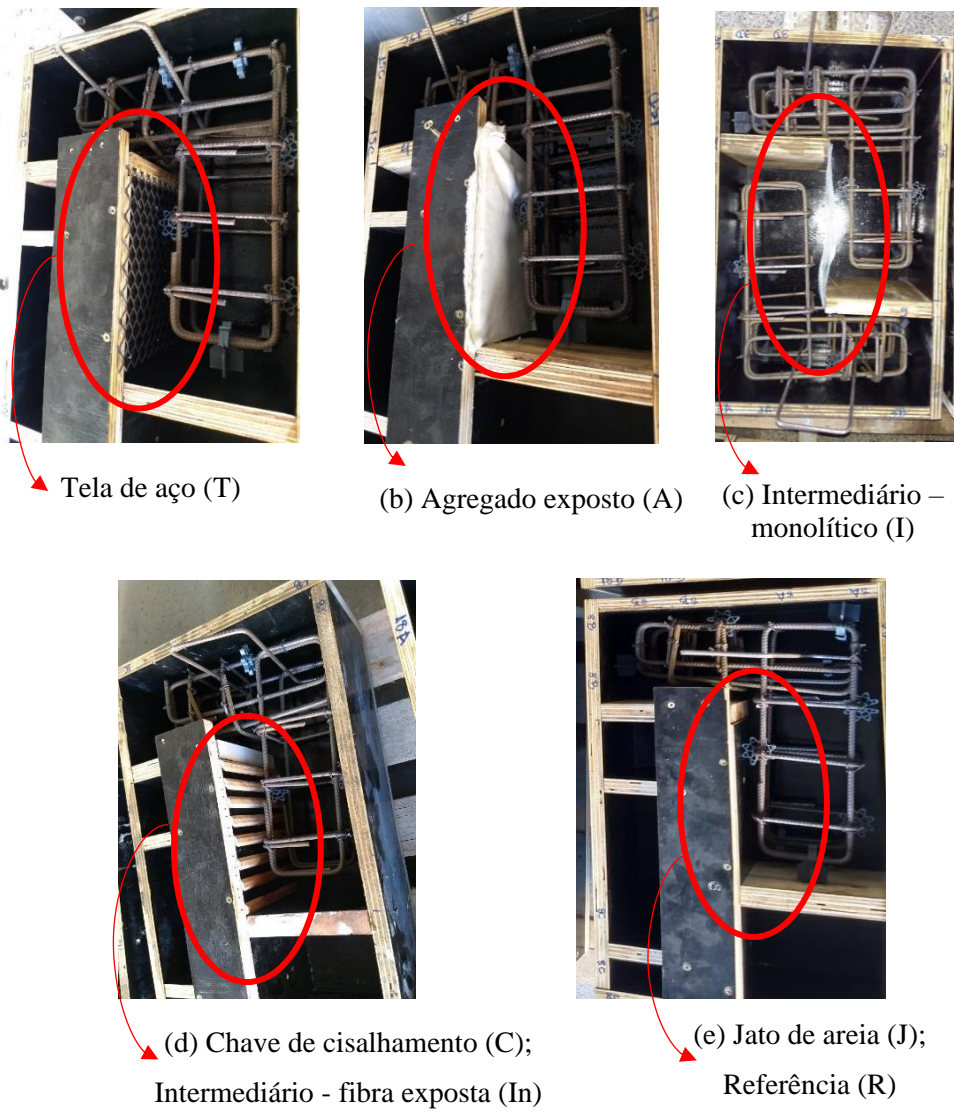


Figura 3.6.4 - Detalhe dos moldes na divisória para confecção das interfaces

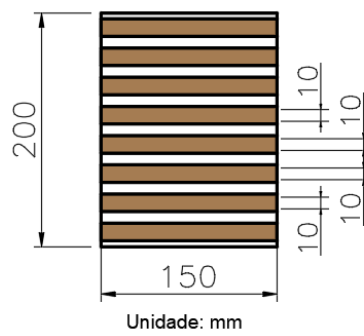


Figura 3.6.5 - Espaçamento da chave de cisalhamento no ensaio de resistência ao cisalhamento direto

3.6.3 Concretagem

A concretagem das peças foi realizada em duas etapas. Na Etapa 1 efetuou-se o preenchimento da metade da fôrma com CAR. Depois de 35 dias foi efetuada a Etapa 2, com o preenchimento da outra metade da fôrma com UHPC (Figura 3.6.6). Durante o período entre a Etapa 1 e 2, as metades dos corpos de prova preenchidos com CAR sofreram cura seca em local coberto. Após a concretagem da Etapa 2 os corpos de prova foram submetidos à cura úmida. Tal cura foi efetuada em local coberto e os corpos de prova eram molhadas diariamente até a data da execução do ensaio. Para que não houvesse perda de água para o ambiente, os mesmos foram cobertos com manta. Os corpos de prova usados na caracterização dos concretos (ensaio de resistência mecânica) foram submetidos ao mesmo tipo de cura dos corpos de prova usados no ensaio de resistência ao cisalhamento direto.

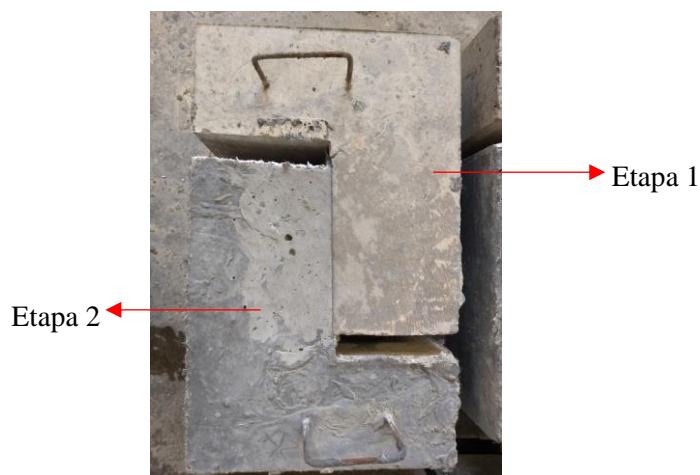


Figura 3.6.6 - Detalhe do corpo de prova concretado para o ensaio de resistência ao cisalhamento direto

3.6.4 Instrumentação e execução do ensaio

Realizou-se o ensaio de resistência ao cisalhamento direto na Instron modelo 300 HVL com capacidade de 1500 kN. Para induzir a ruptura na interface a força foi aplicada na região central do corpo de prova com controle de deslocamento e taxa de carregamento de 0,0025 mm / s, através de uma chapa de aço com largura de 1500 mm, comprimento de 1600 mm e 200 mm de espessura, posicionada no topo e na base (Figura 3.6.7). O valor elegido foi baseado em Wu et al. (2019), que considerou no seu trabalho uma taxa de carregamento de 0,0008 mm/ s.

Uma estrutura articulada de madeira foi fixada na parte superior do corpo de prova com barras roscadas, conforme apresentada na perspectiva da Figura 3.6.7 e Figura 3.6.8, para evitar a queda do modelo após a ruptura.

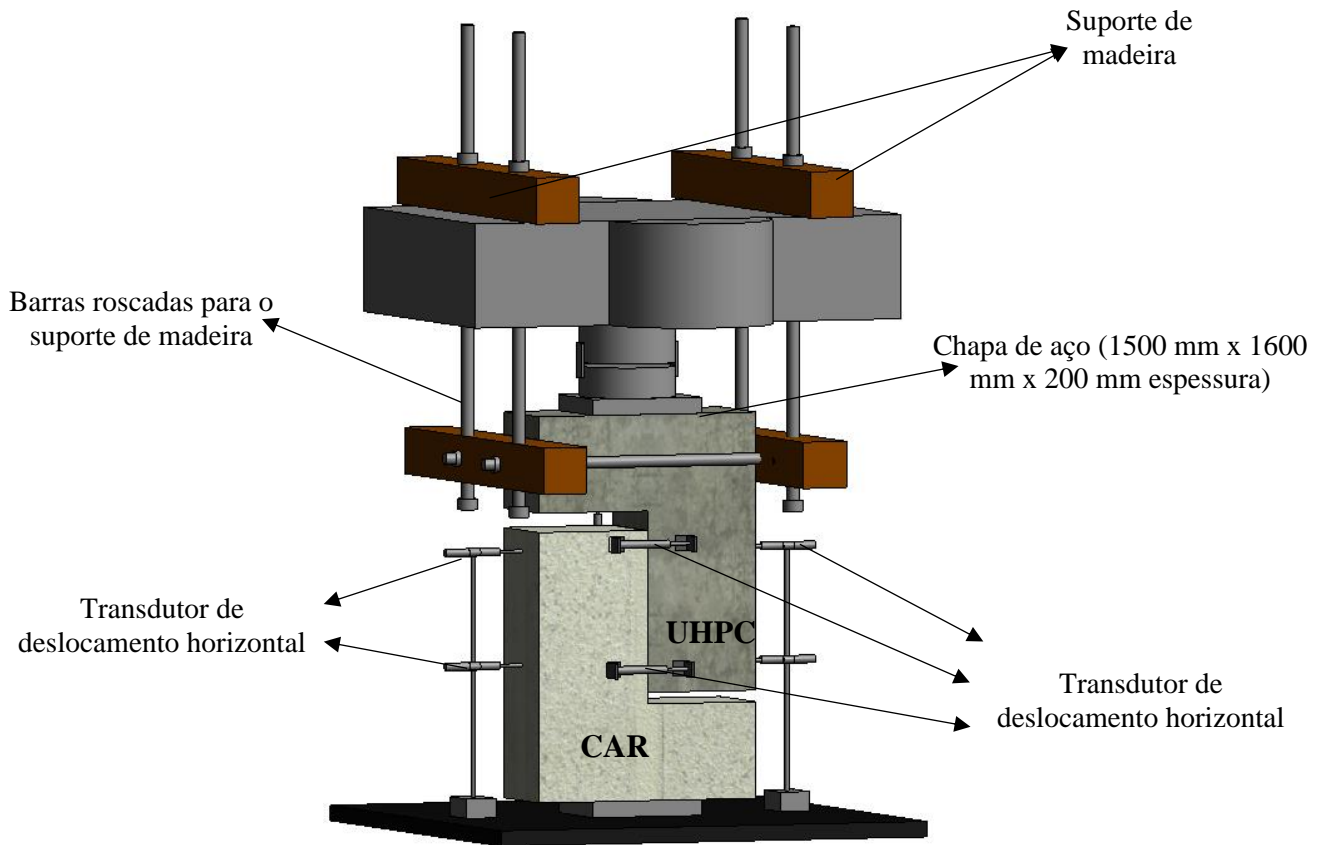


Figura 3.6.7 - Perspectiva do corpo de prova para o ensaio de resistência ao cisalhamento direto – Vista de frente

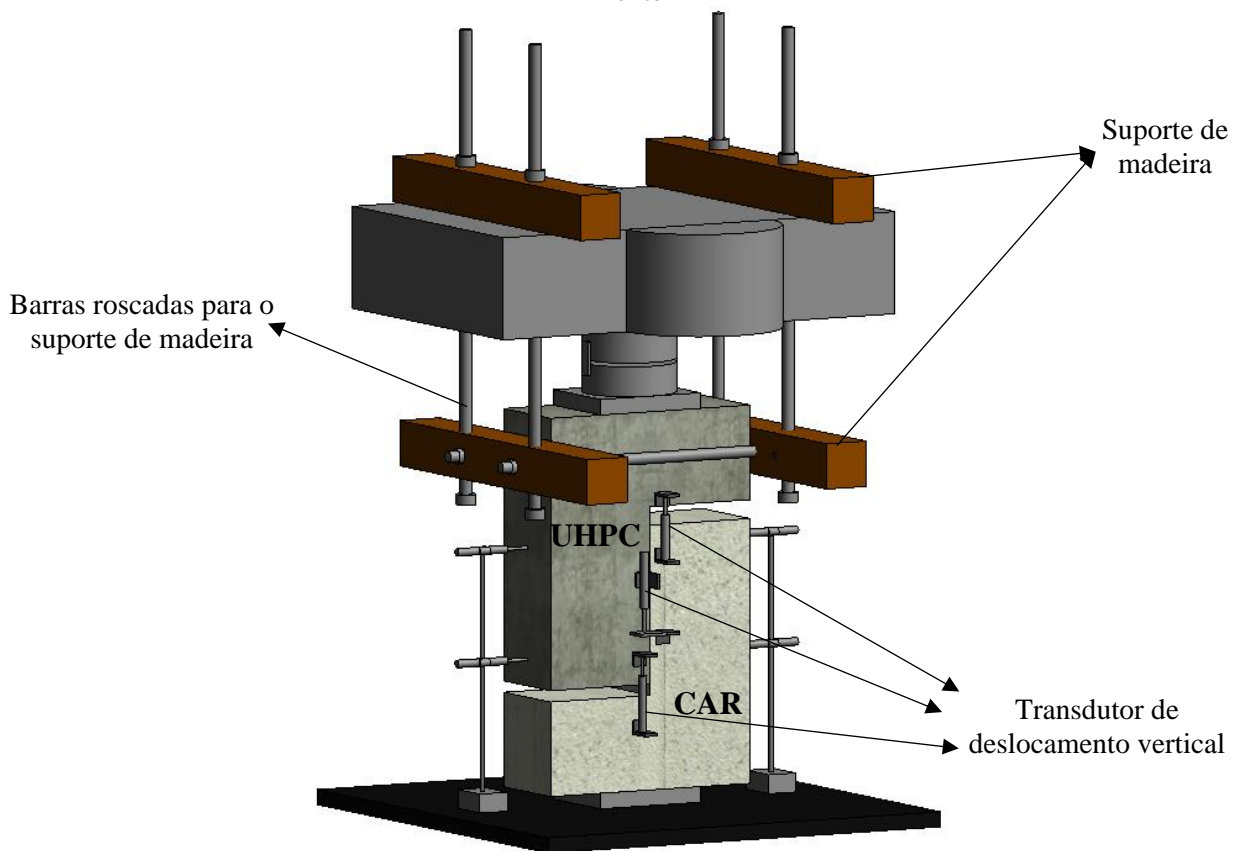


Figura 3.6.8 - Perspectiva do corpo de prova para o ensaio de resistência ao cisalhamento direto – Vista de fundo

Para medição dos deslocamentos horizontais e verticais foram utilizados transdutores de deslocamentos (TD) com curso de 25 mm. A posição e nomenclatura dos transdutores de deslocamentos podem ser vistas na Figura 3.6.9. Os transdutores de deslocamento na horizontal foram considerados em duplicidade para analisar a ação dos efeitos secundários referente à flexão.

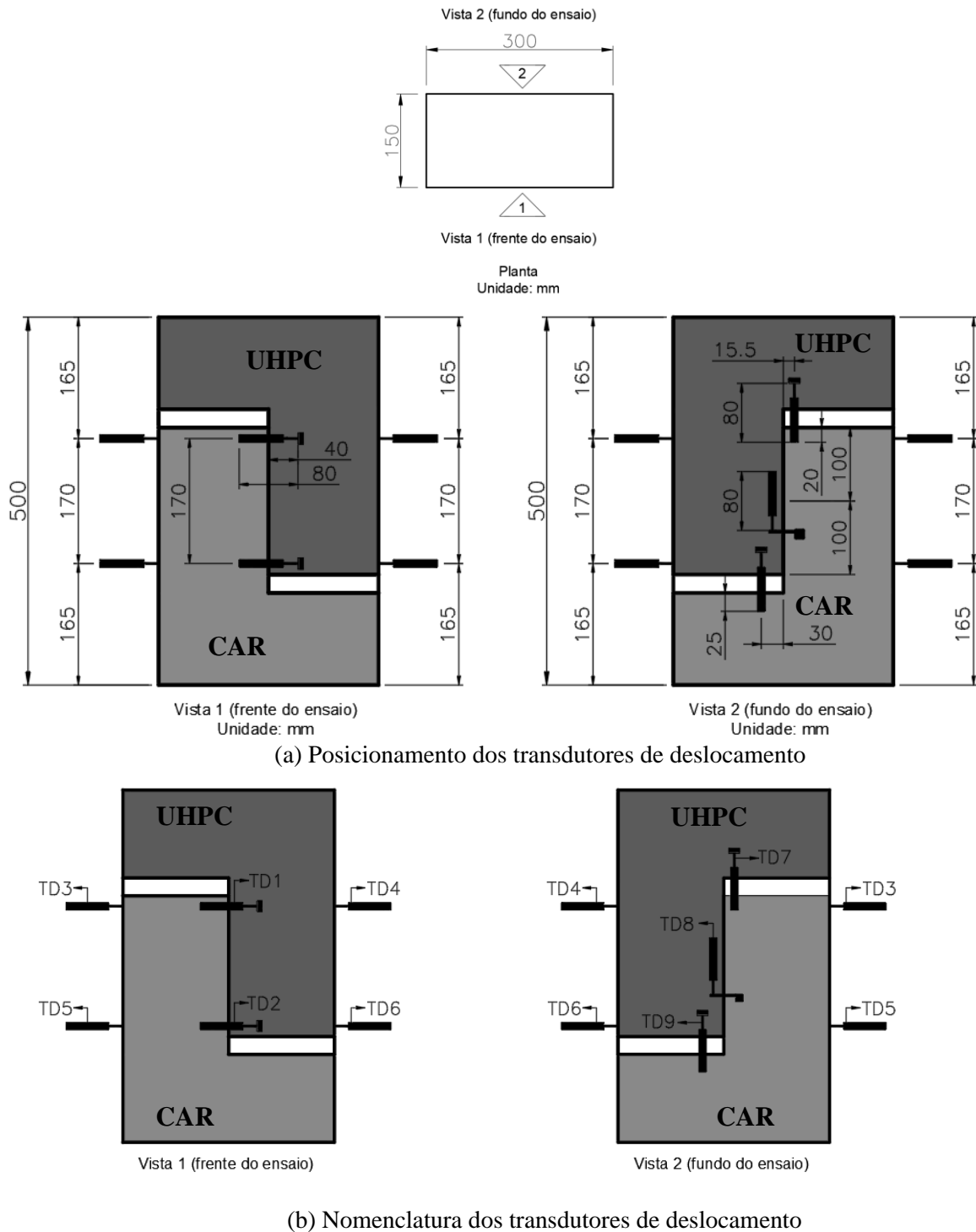
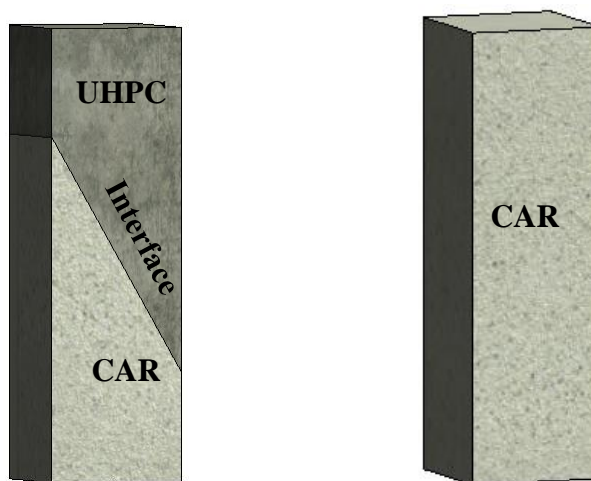


Figura 3.6.9 - Transdutores de deslocamento usados no ensaio de resistência ao cisalhamento direto

3.7 Resistência ao cisalhamento inclinado

3.7.1 Geometria dos corpos de prova

Para o ensaio de resistência ao cisalhamento inclinado usou o modelo prismático (ABNT NBR 12142: 2010) com dois tipos de corpos de prova: com as variações de superfícies feitas no CAR e posterior preenchimento com UHPC; e sem interface feito de CAR (monolítico), usado como referência em relação aos corpos de prova com interface (Figura 3.7.1). A Tabela 3.7.1 exibe a quantidade de corpos de prova confeccionados para o ensaio de resistência ao cisalhamento inclinado.



(a) Corpo de prova com Interface

(b) Corpo de prova monolítico CAR

Figura 3.7.1- Perspectiva dos corpos de prova para o ensaio de resistência ao cisalhamento inclinado

Tabela 3.7.1 – Quantidade de corpos de prova concretados no ensaio de resistência ao cisalhamento inclinado

Corpos de prova com interface	Quantidade de corpos de prova
Agregado exposto (A)	5
Chave de cisalhamento (C)	5
Jato de areia (J)	5
Referência (R)	5
Tela de aço expandida (T)	5
Intermediária – fibra exposta (In)	5
Monolítico	Quantidade de corpos de prova
CAR	3

A geometria do modelo foi retangular (ABNT NBR 5738: 2016), com seção transversal de 150 mm x 150 mm e comprimento de 500 mm. A delimitação da interface foi feita com uma divisória inclinada de 30° em relação a vertical, de acordo com o modelo proposto na ASTM C882: 2013 (Figura 3.7.2). A diferença dos corpos de prova com interface e sem interface (monolítico) foi a divisória colocada no centro da fôrma.

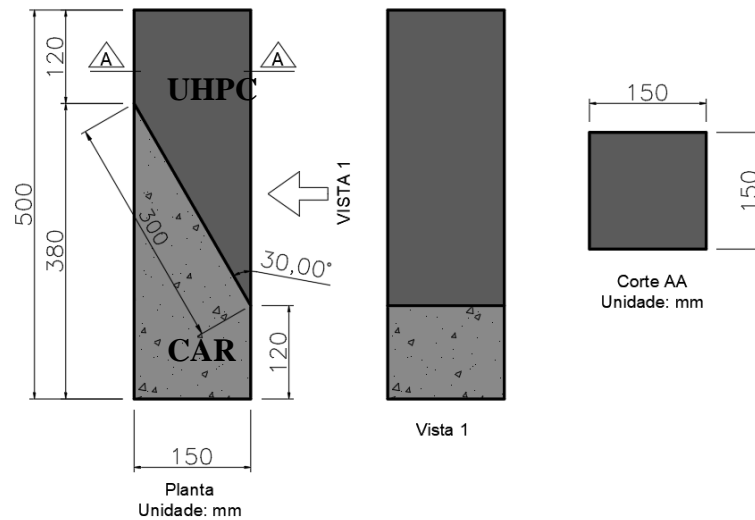


Figura 3.7.2 - Geometria do modelo prismático para o ensaio de resistência ao cisalhamento inclinado - corpo de prova com interface

3.7.2 Confeção da interface

Antes da concretagem posicionou-se a divisória inclinada (Figura 3.7.3) no centro da fôrma, juntamente com os moldes para formar a rugosidade das interfaces estudadas (Figura 3.7.4). Na superfície Referência (R) e Jato de areia (J), cujo jateamento foi feito após a concretagem, não foram deixados nenhum molde na divisória. Na interface com Chave de cisalhamento (C) foram deixados 11 moldes trapezoidais (Figura 3.7.5).



(a) Divisória montada na fôrma



(b) Inclinação da divisória

Figura 3.7.3 - Detalhe da divisória inclinada posicionada na fôrma



Figura 3.7.4 - Detalhe dos moldes na divisória para confecção das interfaces

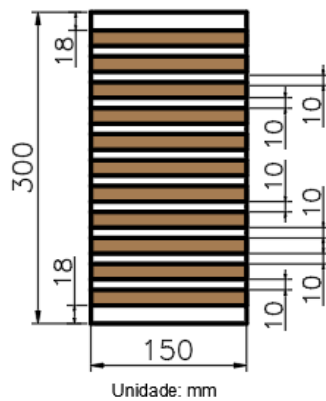


Figura 3.7.5 - Espaçamento da chave de cisalhamento no ensaio de resistência ao cisalhamento inclinado

3.7.3 Concretagem

A concretagem das peças foi realizada em duas etapas. Na Etapa 1 efetuou-se o preenchimento da metade da fôrma com CAR. Depois de 123 dias foi efetuada a Etapa 2, com o preenchimento da outra metade da fôrma com UHPC (Figura 3.7.6). Durante o período entre a Etapa 1 e 2, as metades dos corpos de prova preenchidos com CAR sofreram cura seca em local coberto.

Antes da execução da Etapa 2 as superfícies da interface do CAR (Etapa 1) foram tratadas, limpas e umidificadas. Após a concretagem da Etapa 2 os corpos de prova foram submetidos à cura úmida na câmara, de acordo com ABNT NBR 8522: 2017. Os corpos de prova usados na caracterização dos concretos (ensaio de resistência mecânica) foram submetidos ao mesmo tipo de cura dos corpos de prova usados no ensaio de resistência ao cisalhamento inclinado.

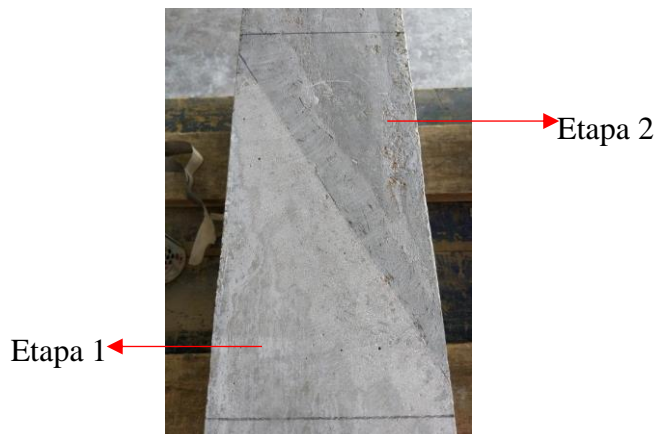


Figura 3.7.6 - Detalhe do corpo de prova concretado para o ensaio de resistência ao cisalhamento inclinado

3.7.4 Instrumentação e execução do ensaio

Realizou-se o ensaio de resistência ao cisalhamento inclinado na Instron modelo 8506 HVL com capacidade de 3000 kN. A força foi aplicada no corpo de prova com controle de deslocamento e taxa de carregamento de 0,005 mm / s até 80% da força última estimada a ser alcançada. Posteriormente a taxa de carregamento foi reduzida a 0,001 mm / s no sentido de observar com maior precisão o modo de falha do corpo de prova. Wichert, Matz e Empelmann (2019) adotaram taxas de carregamentos semelhantes para o mesmo tipo de ensaio executado.

Para as medições dos deslocamentos foram fixadas em uma face do corpo de prova transdutores de deslocamento e clip gage. Como o corpo de prova apresentava uma ruptura explosiva, foi montado um aparato para proteção e a instrumentação foi retirada quando a força atingiu cerca de 80% da força última estimada. Com o intuito de analisar o comportamento até o final do ensaio, foi utilizada a técnica da correlação de imagem digital no outro lado da face do corpo de prova (Figura 3.7.7).

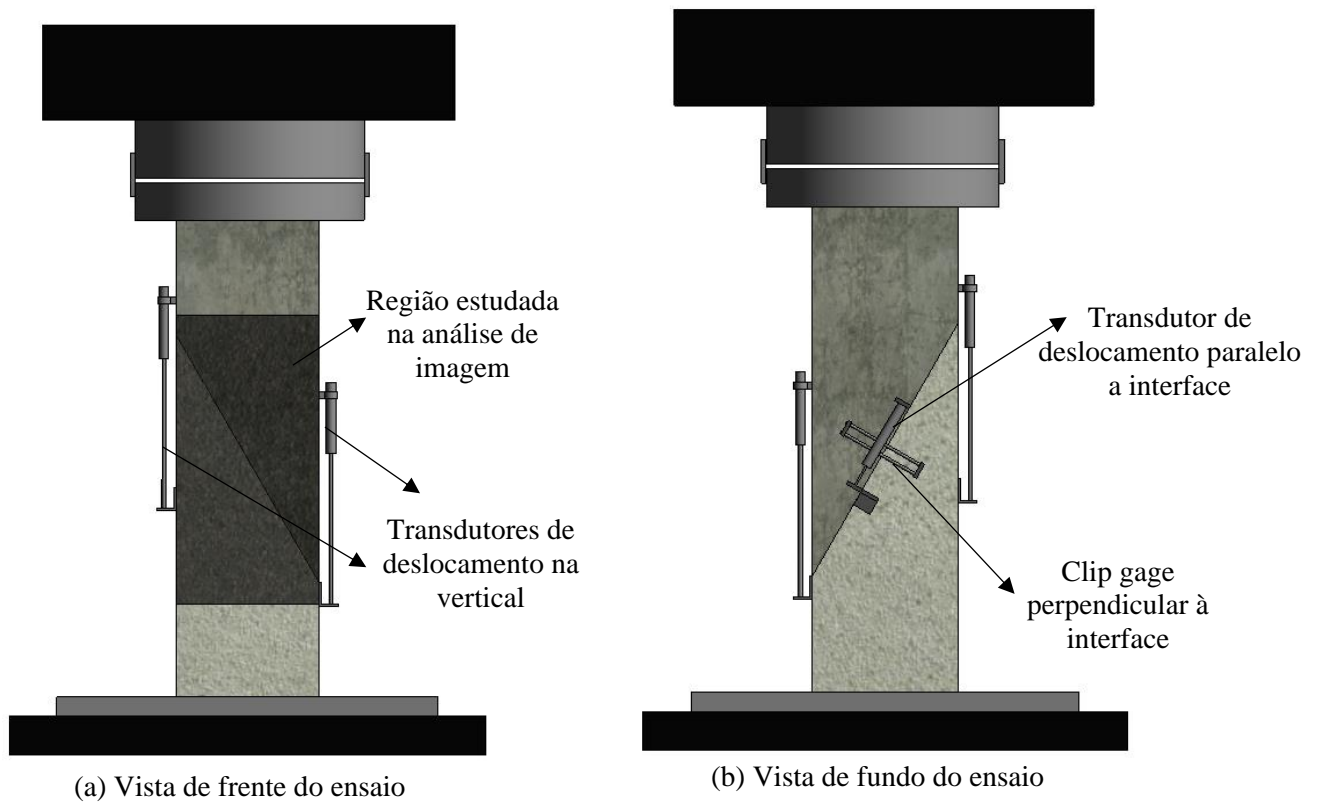


Figura 3.7.7 - Perspectiva do corpo de prova para o ensaio de resistência ao cisalhamento inclinado

Para medição dos deslocamentos verticais e inclinados (paralelo a interface) foram utilizados transdutores de deslocamento (TD1 / TD2 / TD4) com curso de 25 mm e, para medição do deslocamento perpendicular à interface, foi utilizado clip gage (TD3) (Figura 3.7.8).

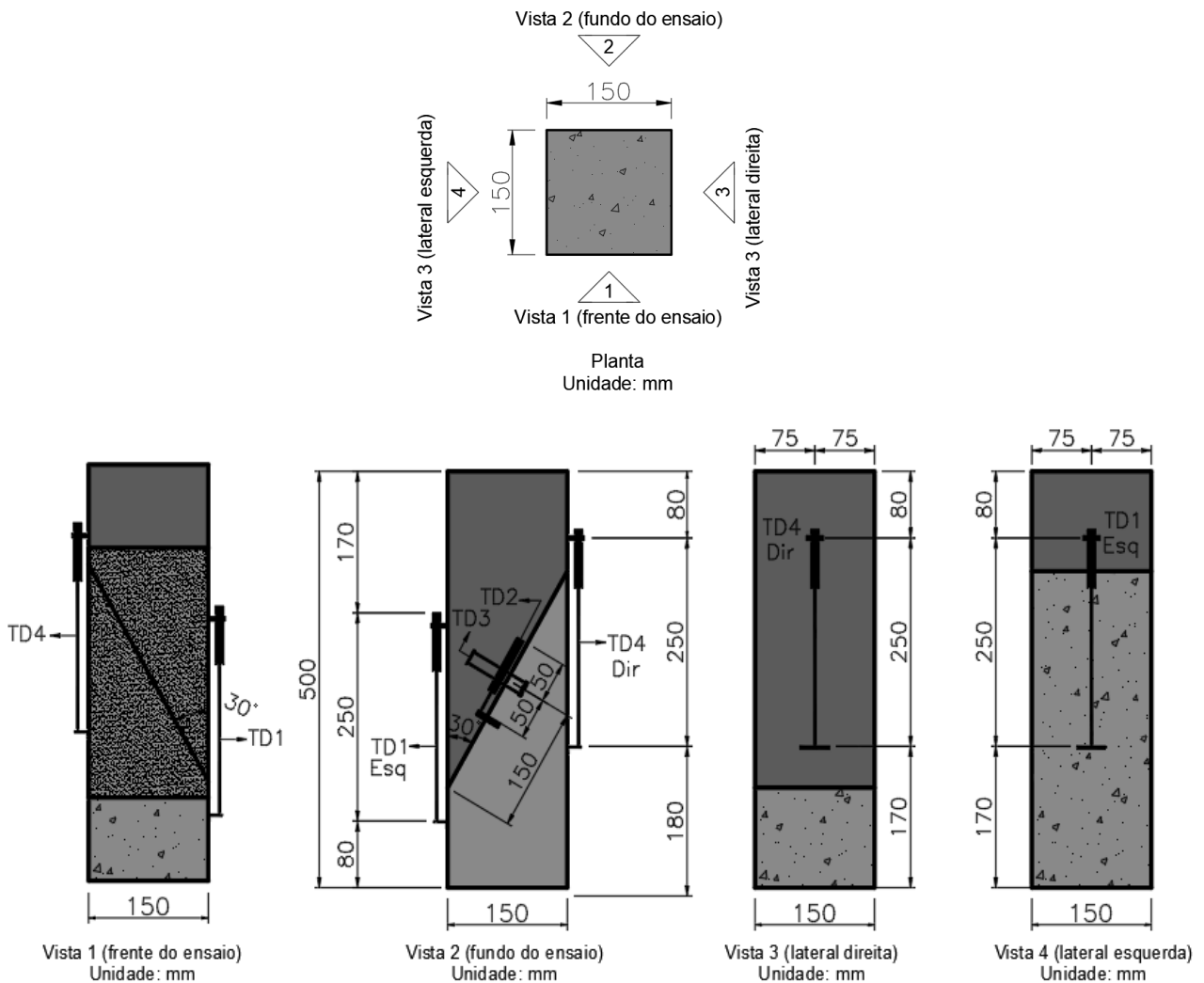


Figura 3.7.8 - Posicionamento e nomenclatura da instrumentação usada no ensaio de resistência ao cisalhamento inclinado

3.7.5 Análise de imagem

O software usado para a análise da correlação de imagem digital foi o Correli Q4 (BESNARD, 2006) que consiste em um algoritmo de imagem que correlaciona, com base na escala de cinza da imagem, os pixels da imagem atual com os pixels da imagem referência, obtendo os campos de deslocamentos e deformações. Ferreira (2012) conclui que a técnica de correlação de imagem se mostrou efetiva, na qual foi possível obter os dados almejados para o trabalho. O autor destaca que a análise desse tipo de ensaio é difícil, haja visto que os níveis de deslocamentos são pequenos, no entanto, mesmo com os ruídos presentes nos dados de entrada, foi possível obter parâmetros como o módulo de elasticidade longitudinal.

Na análise da correlação de imagem foi usada a câmera Canon EOS 30D com a lente Canon EF 28-135 IS posicionada em um tripé próximo a estrutura montada para o ensaio. A captura da imagem pela câmera foi a cada 7 segundos, sendo a mesma feita automaticamente por um programa

instalado no computador, evitando o contato manual e possível movimentação. A fim de aumentar a luminosidade da região, foram posicionados dois refletores de led 30 Watts, uma em cada extremidade da estrutura. A Figura 3.7.9 mostra o esquema típico de uma configuração experimental utilizando a câmera digital para captura da imagem a ser utilizada na técnica da correlação de imagem e Figura 3.7.10 o aparato montado para o ensaio.

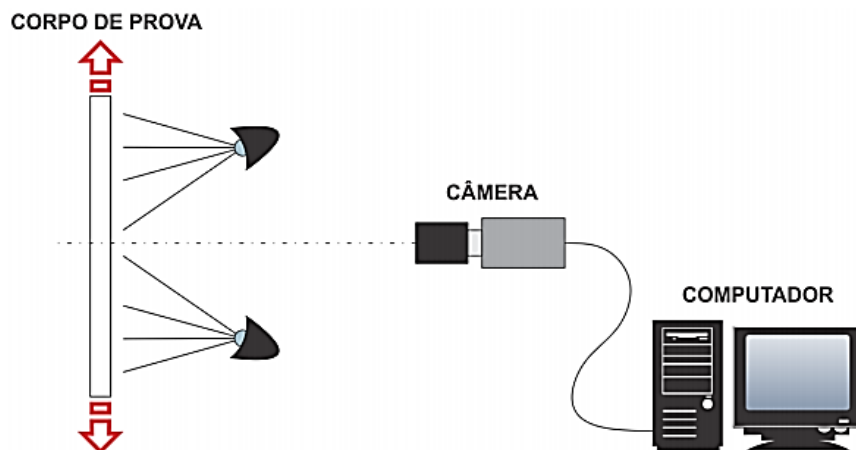


Figura 3.7.9 - Configuração típica do ensaio experimental para análise da correlação de imagem (Fonte: FERREIRA, 2012)



Figura 3.7.10 - Aparato montado para análise de imagem

Como o grau de escala de cinza é o fator para caracterizar a correlação de imagem, as amostras foram pulverizadas na face da superfície onde a imagem ia ser obtida, com tinta spray branco e preto, para obter a escala de cinza. A Figura 3.7.11 mostra as dimensões que a superfície foi pintada e a Figura 3.7.12 apresenta o procedimento realizado para a pintura.

Antes do ensaio realizou-se uma análise preliminar da qualidade da imagem, de acordo com o melhor histograma na escala de cinza fornecido pelo Correli Q4. Para cada ensaio, os seguintes

parâmetros foram ajustados manualmente na câmera: tempo de exposição, abertura do diafragma e temperatura de cor. O formato da imagem utilizada foi .raw, para que não houvesse perda da qualidade.

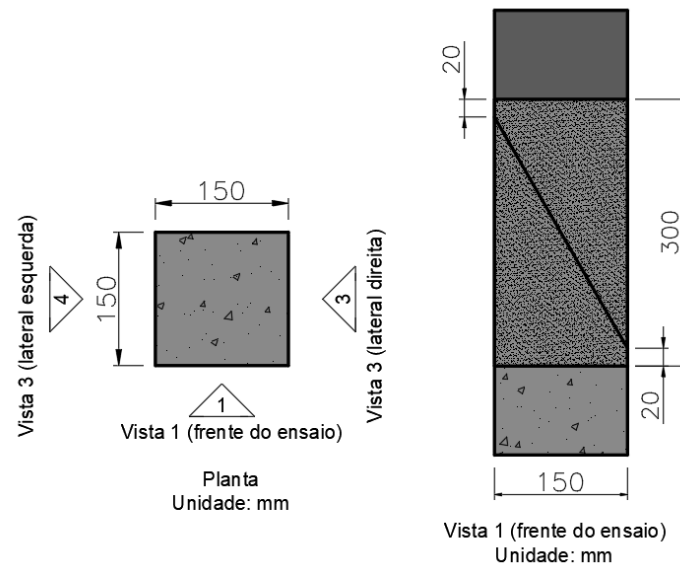
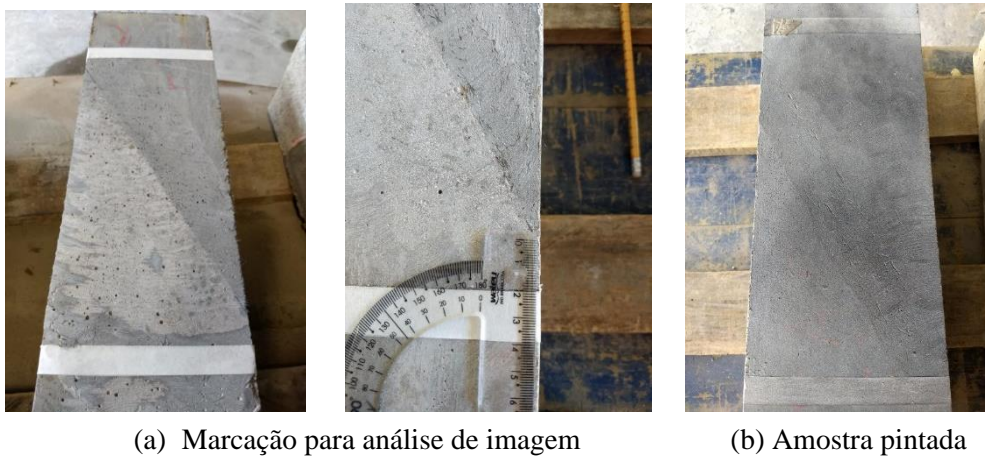


Figura 3.7.11 – Dimensões da superfície pulverizada com tinta spray para análise de imagem



(a) Marcação para análise de imagem

(b) Amostra pintada

Figura 3.7.12 - Corpo de prova tratado para análise de imagem

3.8 Resistência à tração por compressão diametral

3.8.1 Geometria dos corpos de prova

Para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral usou o modelo cilíndrico com dois tipos de corpo de prova: com as variações de superfícies feitas no CAR e posterior preenchimento com UHPC; e sem interface (monolítico), usado como referência em relação aos corpos de prova com interface, tanto para o CAR, quanto para o UHPC (Figura 3.8.1). A Tabela 3.8.1 exibe a quantidade de corpos de prova confeccionados para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral.



(a) Corpo de prova com Interface (b) Corpo de prova monolítico UHPC (c) Corpo de prova monolítico CAR

Figura 3.8.1 - Perspectiva dos corpos de prova para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Tabela 3.8.1 – Quantidade de corpos de prova concretados no ensaio de resistência a tração por compressão diametral

Corpos de prova com interface	Quantidade de corpos de prova
Agregado exposto (A)	5
Chave de cisalhamento (C)	5
Jato de areia (J)	5
Referência (R)	5
Tela de aço expandida (T)	5
Intermediária – fibra exposta (In)	5
Intermediária – monolítico (I)	5
Corpos de prova monolítico	Quantidade de corpos de prova
CAR	5
UHPC	5

A geometria do modelo foi o cilindro, com diâmetro de 100 mm e comprimento de 200 mm (ABNT NBR 5738: 2016). A delimitação da interface foi feita com uma divisória colocada no centro da fôrma. A Figura 3.8.2 mostra a geometria do modelo. Os corpos de prova monolíticos foram concretados sem a divisória.

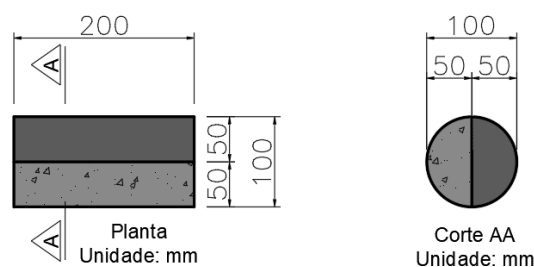


Figura 3.8.2 - Geometria do modelo cilíndrico para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral - corpo de prova com interface

3.8.2 Confeção da interface

Antes da concretagem posicionou-se a divisória vertical no centro da fôrma juntamente com os moldes para formar a rugosidade das interfaces estudadas (Figura 3.8.3). Na superfície Referência (R) e Jato de areia (J), cujo jateamento foi feito após a concretagem, não foram deixados nenhum molde na divisória. Na interface Chave de cisalhamento (C) foram deixados 8 moldes trapezoidais, posicionados de acordo com a Figura 3.8.4, para não solicitar apenas um dos concretos caso as chaves estivessem na direção longitudinal do corpo de prova. O posicionamento das chaves tem pouca influência, pois não funciona com corte pelos dentes.

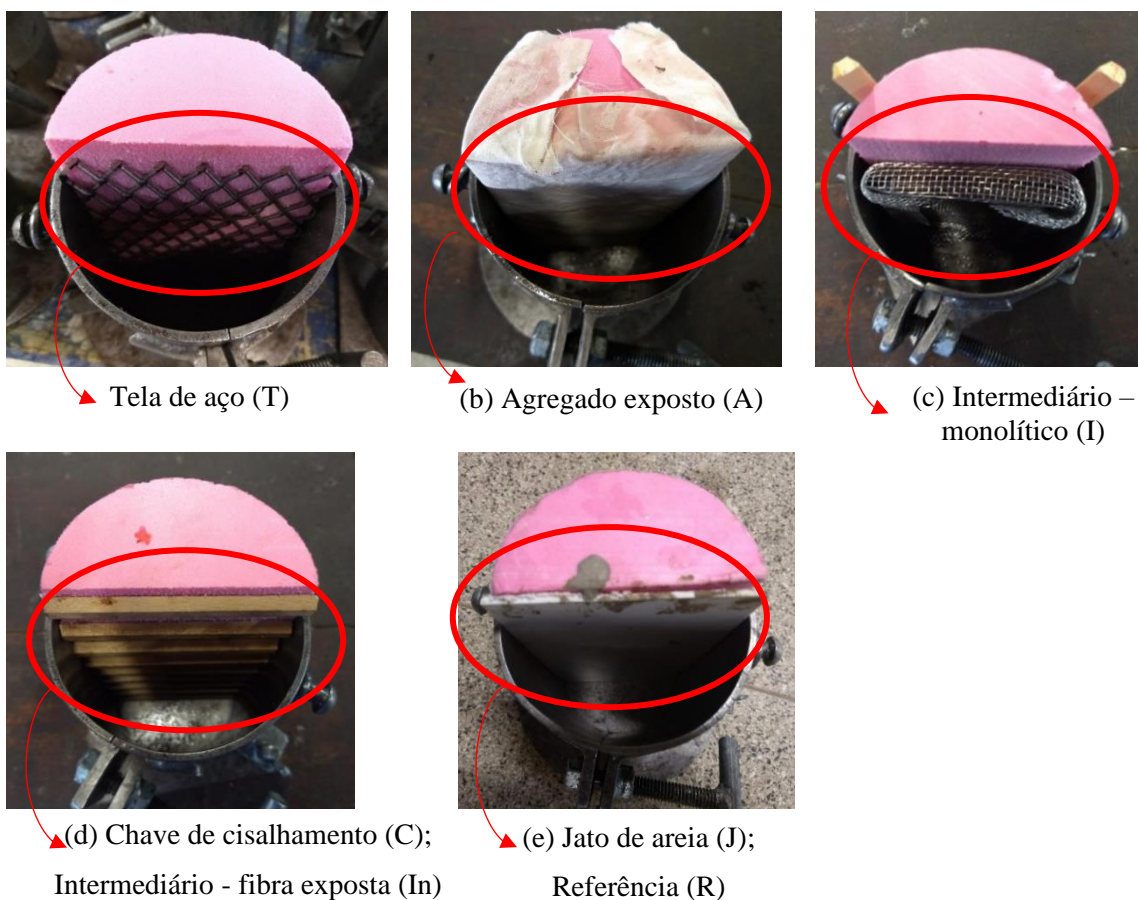


Figura 3.8.3 - Detalhe dos moldes na divisória para confecção das interfaces

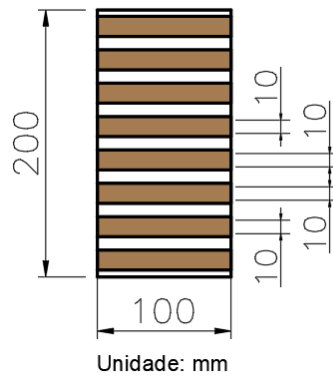


Figura 3.8.4 - Espaçamento da chave de cisalhamento no ensaio de resistência à tração por compressão diametral

3.8.3 Concretagem

A concretagem das peças foi realizada em duas etapas. Na Etapa 1 efetuou-se o preenchimento da metade da fôrma com CAR e, depois de 35 dias, foi concretada a Etapa 2, com o preenchimento da outra metade da fôrma com o UHPC (Figura 3.8.5). Antes da execução da Etapa 2 as superfícies da interface do CAR (Etapa 1) foram tratadas e, previamente à concretagem da Etapa 2, as mesmas foram umedificadas. Durante o período entre a Etapa 1 e 2, as metades dos corpos de prova preenchidos com CAR sofreram cura seca em local coberto. Após a concretagem da Etapa 2 os corpos de prova foram submetidos à cura úmida na câmara, de acordo com ABNT NBR 8522: 2017. Os corpos de prova usados na caracterização dos concretos (ensaio de resistência mecânica) foram submetidos ao mesmo tipo de cura dos corpos de prova usados no ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

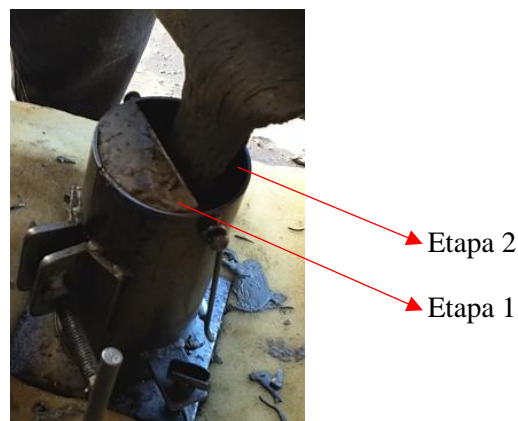


Figura 3.8.5 - Concretagem da Etapa 2 para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral

3.8.4 Instrumentação e execução do ensaio

Realizou-se o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, de acordo com a ABNT NBR 7222: 2011, na Instron modelo 300 HVL com capacidade de 1500 kN. A força foi aplicada continuamente no corpo de prova com controle de deslocamento e taxa de carregamento de 0,005 mm / s. A Figura 3.8.6 apresenta a perspectiva para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

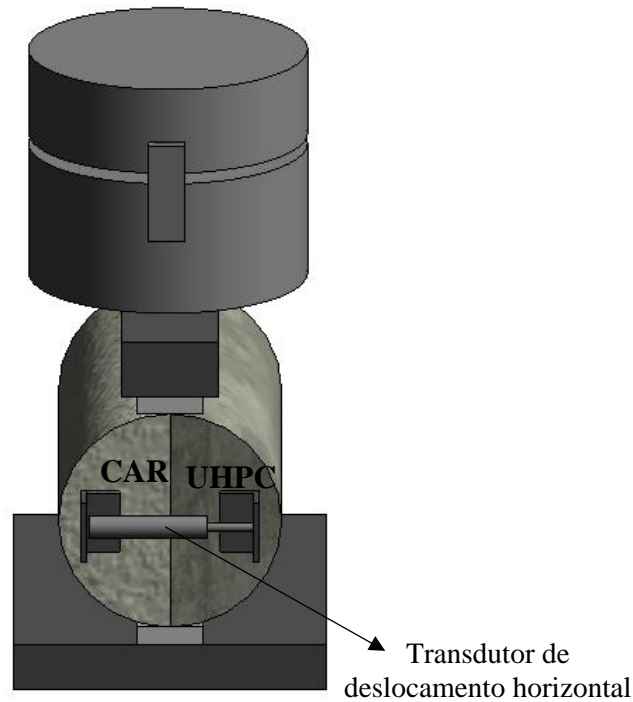


Figura 3.8.6 - Perspectiva do corpo de prova para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Para medição dos deslocamentos horizontais foram utilizados transdutores de deslocamentos (TD) com curso de 25 mm (Figura 3.8.7).

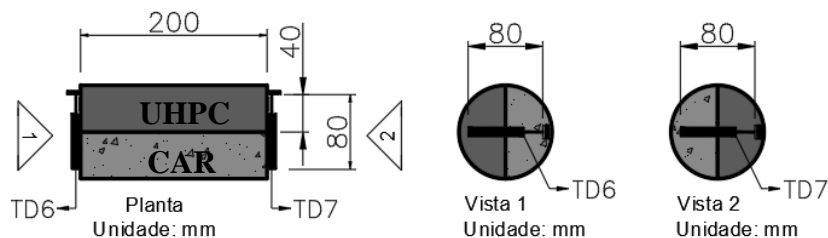


Figura 3.8.7 - Posicionamento e nomenclatura dos transdutores de deslocamento usados no ensaio de resistência à tração por compressão diametral

4. RESULTADOS E ANÁLISES

As etapas dos resultados estão esquematizadas no fluxograma apresentado na Figura 4.1.

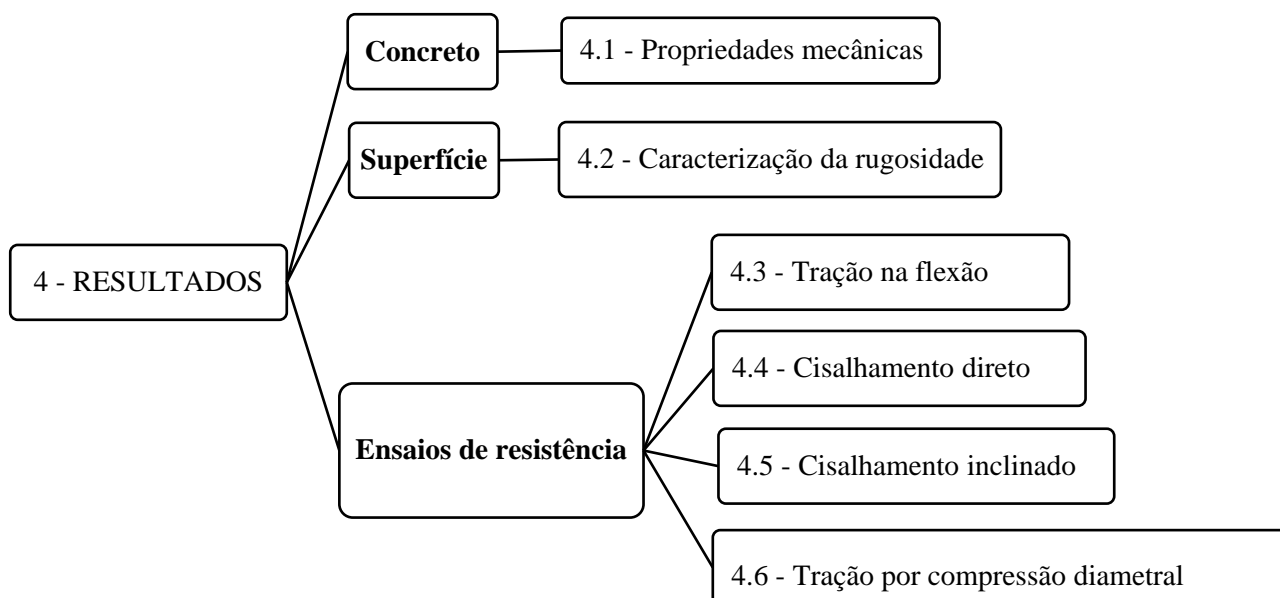


Figura 4.1 - Fluxograma das etapas dos resultados

4.1 Propriedades mecânicas dos concretos

Para a moldagem dos corpos de prova usados na caracterização das interfaces foram necessárias várias concretagens para o CAR, concreto Intermediário e UHPC. Os ensaios de resistência à compressão foram determinados para todas as concretagens, conforme apresentado no apêndice A. Os resultados de resistência à compressão apresentaram baixa variabilidade nas concretagens. Para o CAR a diferença entre o maior e o menor resultado foi de 6,5% e, para o concreto Intermediário e UHPC, foi de 1,6%. Diante disso, os valores das propriedades mecânicas adotados como referência correspondem aos concretos confeccionados para os corpos de prova prismáticos monolíticos e com interface usados no ensaio de resistência à tração na flexão.

4.1.1 Resistência à compressão e módulo de elasticidade

Os ensaios de resistência à compressão para o CAR foram realizados na idade de 1 dia, referente a execução do jato de areia, 7 dias, 21 dias, 28 dias e na data de execução dos ensaios de resistência à tração na flexão.

No preenchimento da metade dos prismas com UHPC foram necessárias duas concretagens de 120 litros (UHPC 1 e UHPC 2), limitada pela capacidade da betoneira de 250 litros. Os valores

de resistência à compressão foram determinados nas idades de 7 dias, 28 dias e na data de execução dos ensaios das interfaces para as duas concretagens.

Para concreto Intermediário, os ensaios de resistência à compressão foram realizados na idade de 7 dias, 28 dias e na data de execução dos ensaios das interfaces.

A Tabela 4.1.1 apresenta as propriedades de resistência à compressão e módulo de elasticidade dos concretos estudados e as curvas, tensão de compressão versus deformação, obtidas pelos transdutores de deslocamento e corrigidas estão apresentadas na Figura 4.1.1 para o UHPC 1, UHPC 2 e concreto Intermediário. Para os concretos supracitados foi possível obter um comportamento dúctil no trecho de deformação após o pico em virtude das fibras de aço. No CAR, devido a ruptura ser explosiva e gerar instabilidade por não haver fibras na mistura, não foi possível obter a curva tensão versus deformação após o pico.

Em relação ao CAR, destaca-se o aumento de 46,7% da resistência à compressão de 28 dias para 120 dias, devido o mesmo ter sido submetido a cura úmida depois da finalização da moldagem dos corpos de prova com a parte do UHPC. Antes desse período, o CAR estava em cura ambiente e coberto. Já em relação ao UHPC e ao concreto Intermediário, a evolução da resistência à compressão depois dos 28 dias foi de 8,2% e 3,7%, respectivamente, mesmo o concreto Intermediário sendo colocado nas mesmas condições de cura úmida do CAR.

Tabela 4.1.1 - Evolução da resistência à compressão e módulo de elasticidade do CAR, UHPC e concreto Intermediário

Idade de ruptura	f_c médio (MPa)	Desvio padrão (S)	E_{cs} médio	Desvio padrão (S)
CAR				
1 dia (Execução jato de areia)	47,8	3,5	-	-
7 dias	62,3	1,3	-	-
21 dias	62,0	1,9	-	-
28 dias	62,6	4,7	-	-
120 dias (Execução do ensaio)	91,0	4,0	45409,5	681,8
UHPC 1				
7 dias	85,6	0,52		
28 dias	128,6	0,78		
70 dias (Execução do ensaio)	139,2	4,0	43828,3	1727,9
UHPC2				
7 dias	87,3	5,45		
28 dias	126,5	3,6		
70 dias (Execução do ensaio)	136,7	5,5	45669,9	1537,2
Concreto Intermediário				
7 dias	76,4	2,6		
28 dias	96,3	3,3		
120 dias (Execução do ensaio)	99,9	7,3	41291,1	3159,7

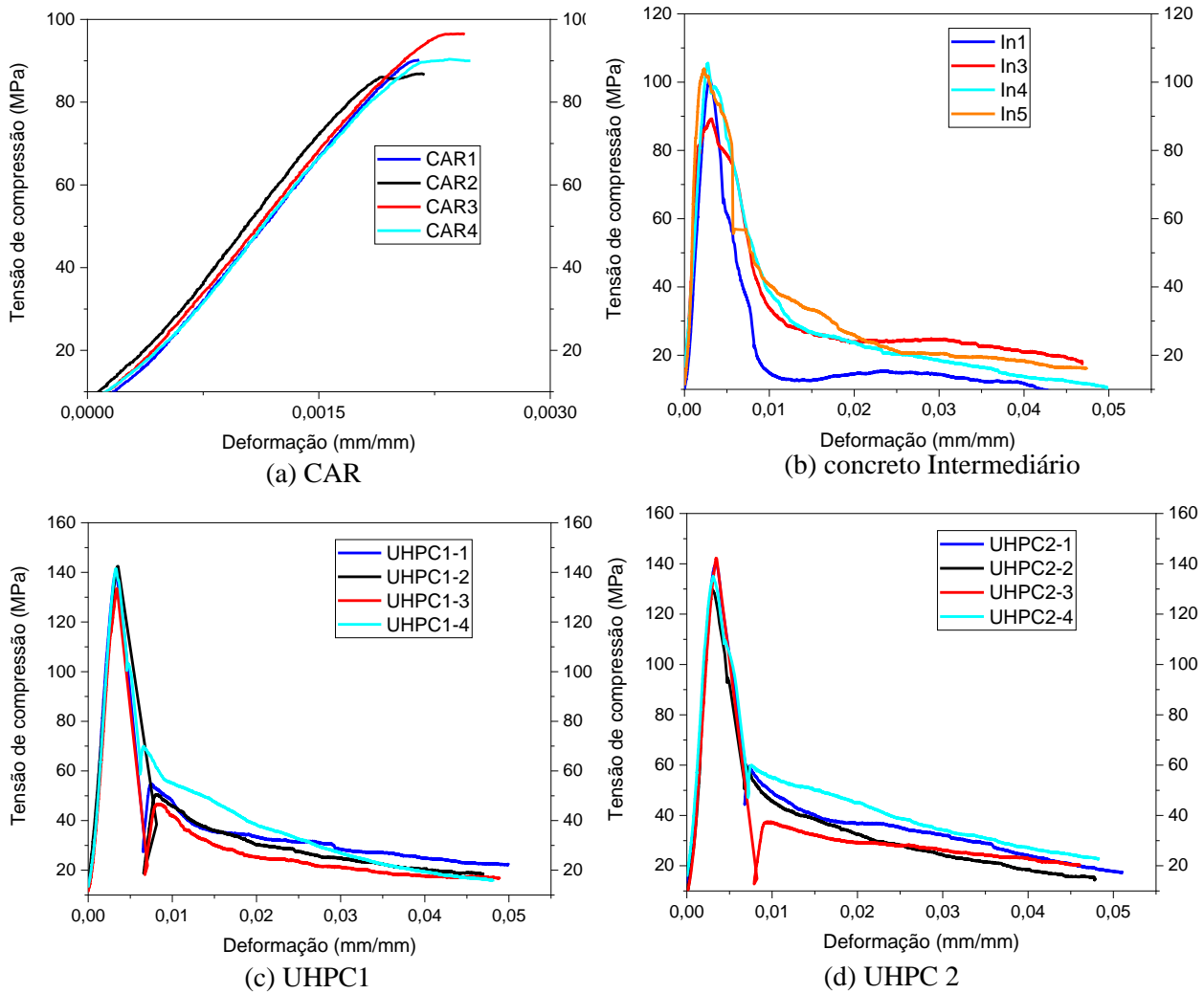


Figura 4.1.1- Curva tensão de compressão versus deformação medida pelo transdutor de deslocamento

4.1.2 Resistência à tração por compressão diametral

Realizou-se o ensaio de resistência à tração por compressão diametral somente para o CAR, pelo fato do mesmo não conter fibras de aço em sua mistura, na data de execução dos ensaios de resistência à tração na flexão (Tabela 4.1.2).

Tabela 4.1.2 - Resistência à tração por compressão diametral do CAR

Idade de ruptura	$f_{ct,sp}$ médio (MPa)	Desvio padrão (S)
120 dias (Execução do ensaio)	6,8	0,26

4.1.3 Resistência à tração direta

A Tabela 4.1.3 apresenta as propriedades de resistência à tração direta obtida para o UHPC das duas concretagens (UHPC 1 e UHPC 2) e do concreto Intermediário realizadas na data de execução dos ensaios de resistência à tração na flexão. Os valores de resistência à tração do UHPC foram superiores ao do concreto Intermediário. As curvas tensão de tração versus deformação, apresentadas na Figura 4.1.2, correspondem aos deslocamentos medidos pelos transdutores de deslocamento no trecho central da amostra com 80 mm de comprimento, dividido por esta base de medida. No ensaio observou-se que após o pico de tensão houve concentração das deformações na fissura central, devendo ser levado em conta nos modelos constitutivos do material.

Tabela 4.1.3 - Resistência à tração direta do UHPC e concreto Intermediário

Idade de ruptura	f_{ct} médio (MPa)	Desvio padrão (S)
UHPC 1		
70 dias (Execução do ensaio)	9,8	0,15
UHPC 2		
70 dias (Execução do ensaio)	9,2	1,7
Concreto Intermediário		
120 dias (Execução do ensaio)	5,6	1,5

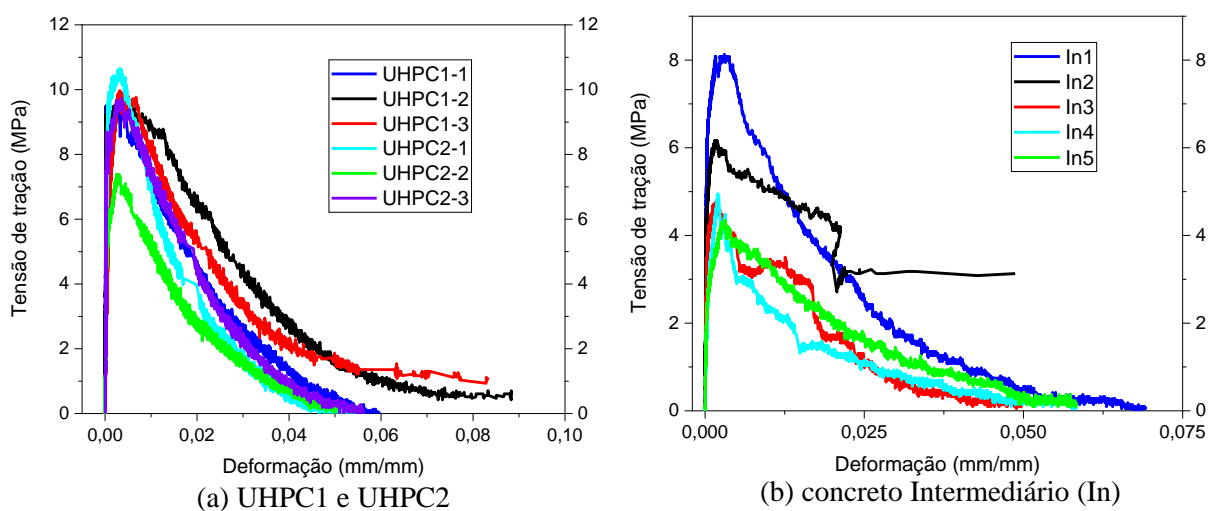


Figura 4.1.2 - Curva tensão de tração versus deformação para o UHPC 1 e 2 e concreto Intermediário

4.1.4 Resistência à tração na flexão

Realizou-se o ensaio para o CAR e o UHPC na data de execução dos ensaios de resistência à tração na flexão dos corpos de prova com interface. A Tabela 4.1.4 exhibe as propriedades de resistência à tração na flexão, cuja diferença de resultado do CAR para o UHPC foi aproximadamente o triplo do valor. Essa diferença comprova as características das propriedades mecânicas elevadas para o UHPC, principalmente na tração, devido a presença das fibras de aço.

Tabela 4.1.4 - Resistência à tração na flexão do CAR e UHPC

Idade de ruptura	$f_{ct,f}$ médio (MPa)	Desvio padrão (S)
CAR		
120 dias (Execução do ensaio)	5,0	0,2
UHPC		
70 dias (Execução do ensaio)	16,09	1,3

4.1.5 Energia de fratura

Realizou-se o ensaio na data de execução dos ensaios de resistência à tração na flexão para calcular a energia de fratura do CAR, de acordo com a Equação (3.2.2). A área abaixo da curva força versus deslocamento (W_0) foi de 2300 mm², obtida da curva média apresentada na Figura 4.1.3, cujo deslocamento máximo medido pelo transdutor de deslocamento (δ_u) foi de 0,186 mm. Considerando o peso do suporte sobre a estrutura de concreto de 186 N e o peso do corpo de prova de 253,12 N, a energia de fratura obtida experimentalmente foi de 0,129 N mm / mm², valor parecido com o proposto pelo CEB-FIP (1990) de 0,135 para concreto C80 e diâmetro máximo do agregado de 16 mm (Tabela 4.1.5).

Tabela 4.1.5 - Energia de fratura (Nmm/ mm²). Fonte CEB FIP (1990)

Diâmetro máximo do agregado (mm)	G_{F0} (Nmm / mm ²)			
	C50	C60	C70	C80
8	0,085	0,085	0,105	0,115
16	0,105	0,105	0,125	0,135
32	0,130	0,130	0,160	0,175

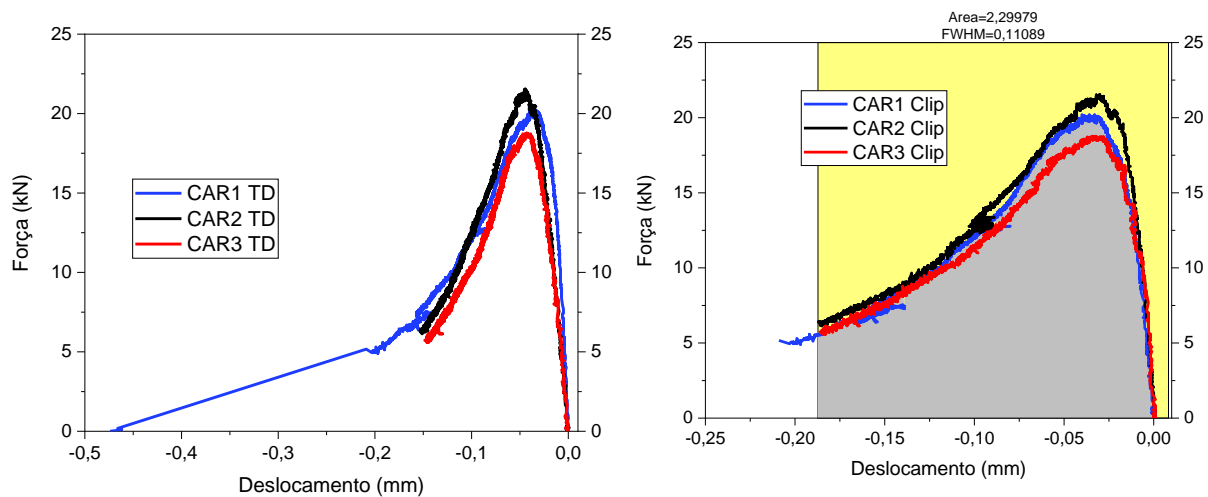


Figura 4.1.3 - Curva força versus deslocamento do CAR para o ensaio de resistência à flexão em três pontos

4.2 Caracterização da rugosidade da superfície

4.2.1 Medições por coordenadas

A medição por coordenadas foi feita nas seguintes superfícies: Agregado exposto (A), Jato de areia (J), Referência (R) e Tela (T). Não foi realizada a medição por coordenadas na superfície Intermediária - fibra exposta (In), em virtude das fibras salientes, e na superfície Chave de cisalhamento (C), pelo fato da mesma possuir uma geometria definida.

A Figura 4.2.1 mostra a medição do perfil de rugosidade nivelado para cada superfície estudada (os demais perfis medidos encontram-se no Apêndice B) e a Tabela 4.2.1 apresenta os resultados médios dos parâmetros de rugosidade obtidos através dos perfis de rugosidade (os resultados discriminados dos parâmetros de rugosidade encontram-se no Apêndice B). As interfaces que apresentaram maiores parâmetros de rugosidade foram a interface Tela (T) e Agregado exposto (A). Em relação ao parâmetro R_z , o resultado obtido indicou que essas interfaces apresentaram maiores valores de pico-vale, diferente da interface Jato de areia (J), que apresentou um resultado baixo. Essa altura de pico-vale reduzida para a interface J mostra que somente os agregados miúdos ficaram expostos, enquanto que, na interface Agregado exposto (A), os agregados graúdos ficaram expostos. Na interface Tela (T), a geometria proporcionou um valor elevado de pico-vale. Para a superfície Referência (R) todos os parâmetros de rugosidade foram reduzidos quando comparados com as outras interfaces.

As interfaces Jato de areia (J) e Referência (R) obtiveram resultados parecidos de R_{vm} e R_{pm} , -0,31 e 0,3, -0,027 e 0,024, respectivamente (Tabela 4.2.1), indicando uma uniformização em relação às alturas de pico a vale das superfícies. Já as interfaces Tela (T) e Agregado exposto (A)

apresentaram resultados diferentes de R_{vm} e R_{pm} quando comparados entre si. Em relação à interface Agregado exposto (A), isso ocorreu devido ao agregado graúdo ter uma variação de tamanho, enquanto na interface Tela (T) foi devido à uniformização do acabamento da superfície.

O parâmetro de rugosidade R_a obtido por Santos e Julio (2008) foi de 0,02 para a superfície moldada em fôrma de aço e 0,227 para a superfície com jato de areia. Os valores encontrados pelos autores foram iguais aos obtidos na pesquisa para a interface Referência (R) e Jato de areia (J) (Tabela 4.2.1). Em relação ao parâmetro $R_{z(DIN)}$, os autores obtiveram valores de 0,106 e 1,015, respectivamente para a superfície moldada em fôrma de aço e com jato de areia, aproximadamente o dobro do valor obtido para a interface R e J, 0,05 e 0,64, respectivamente.

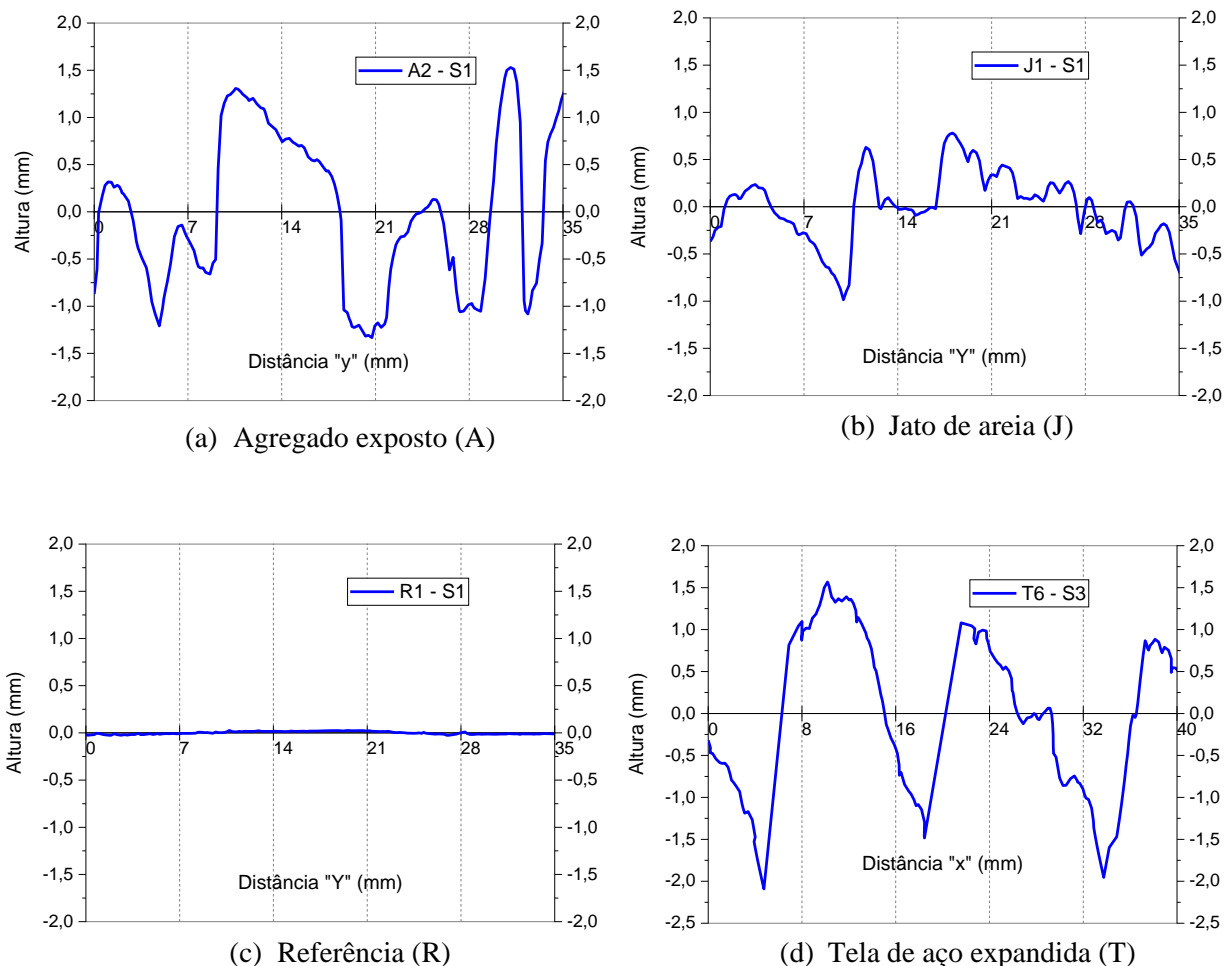


Figura 4.2.1 - Perfil de rugosidade das superfícies estudadas

Tabela 4.2.1 - Valores médios dos parâmetros de rugosidade obtidos pela medição por coordenadas

Interface (desvio padrão - S)	Máximo pico (mm)	Máximo vale (mm)	R _z (DIN) (mm)	R _a (mm)	R _{vm} (mm)	R _{pm} (mm)
Tela de aço expandida (T)	1,44	-1,80	2,14	0,66	-1,19	0,95
(S)	0,29	0,16	0,37	0,09	0,27	0,14
Agregado exposto (A)	1,26	-1,06	1,52	0,53	-0,69	0,82
(S)	0,27	0,27	0,28	0,15	0,16	0,17
Jato de areia (J)	0,50	-0,57	0,64	0,19	-0,31	0,30
(S)	0,24	0,35	0,3	0,1	0,19	0,13
Referência (R)	0,04	-0,12	0,05	0,02	-0,027	0,024
(S)	0,03	0,29	0,06	0,04	0,04	0,03

4.2.2 Método da mancha de areia

No método da mancha de areia as medições foram feitas somente nas superfícies que possibilitou tal procedimento: Tela (T), Agregado exposto (A) e Jato de areia (J). Nas demais superfícies o procedimento foi inviável.

A Tabela 4.2.2 exibe os resultados médios obtidos da medição da profundidade pelo método da mancha de areia para as superfícies Tela (T), Agregado exposto (A) e Jato de areia (J) (os resultados discriminados encontram-se no Apêndice B do trabalho). Pode-se notar que os valores obtidos para a interface Tela e Agregado exposto foram bem parecidos e, na interface Jato de areia, o valor foi aproximadamente 35% menor em relação as outras interfaces medidas.

A profundidade média da rugosidade, obtida pelo método da mancha de areia por Wichert, Matz e Empelmann (2019), para a superfície com jateamento de areia foi de 0,49 mm, ou seja, 91% da profundidade obtida para a superfície J (Tabela 4.2.2) da pesquisa.

Tabela 4.2.2 - Valores médios dos parâmetros de rugosidade obtidos pelo método da mancha de areia

Interface	V (mm ³)	D (mm)	Hs (mm)
Tela de aço expandida (T)	14102,6	104	1,67
Agregado exposto (A)	13461,6	105	1,58
Jato de areia (J)	4487,2	105	0,54

Em relação aos parâmetros calculados, pode-se notar que o Rz apresentou resultados parecidos quando comparado ao Hs, indicando que os mesmos são capazes de exprimir a real altura do perfil, enquanto o parâmetro Ra não exprime a altura real. Para a Interface Tela (T), o valor de Rz foi 28% maior em relação ao Hs e, para a interface Jato de areia, o valor de Rz foi 18,52% maior em relação ao Hs. Na interface Agregado exposto o valor de Rz foi 3,8% menor em relação ao Hs.

A quantificação da superfície Intermediária - fibra exposta foi realizada pela contagem da quantidade de fibras expostas por área nas amostras estudadas, conforme apresentado na Tabela 4.2.3.

Tabela 4.2.3 - Quantidade de fibras expostas

Cisalhamento inclinado	
Amostra	Quantidade de fibras expostas (Área de exposição – 389,7 cm ²)
In 1	50 (0,13 fibras/cm ²)
In 2	34 (0,09 fibras/cm ²)
In 3	50 (0,13 fibras/cm ²)
In 4	21 (0,05 fibras/cm ²)
In 5	30 (0,08 fibras/cm ²)
Flexão 4 pontos	
Amostra	Quantidade de fibras expostas (Área de exposição – 187,5 cm ²)
In 1	17 (0,09 fibras/cm ²)
In 2	19 (0,10 fibras/cm ²)
In 3	21 (0,11 fibras/cm ²)
In 4	23 (0,12 fibras/cm ²)
In 5	25 (0,13 fibras/cm ²)
Tração diametral	
Amostra	Quantidade de fibras expostas (Área de exposição - 200 cm ²)
In 1	38 (0,19 fibras/cm ²)
In 2	30 (0,15 fibras/cm ²)
In 3	28 (0,14 fibras/cm ²)
In 4	38 (0,19 fibras/cm ²)
Cisalhamento direto	
Amostra	Quantidade de fibras expostas (Área de exposição – 300 cm ²)
In 1	46 (0,15 fibras/cm ²)
In 2	40 (0,13 fibras/cm ²)
In 3	52 (0,17 fibras/cm ²)

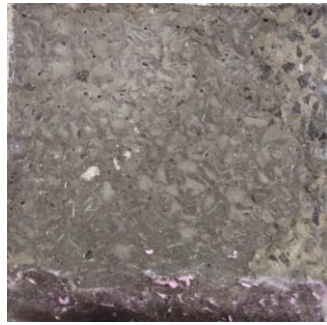
4.3 Resistência à tração na flexão

A Figura 4.3.1 apresenta a imagem típica dos corpos de prova após a ruptura do ensaio de resistência à tração na flexão, na qual todos os corpos de prova ensaiados romperam nas interfaces estudadas. Na interface Agregado exposto (A) foi possível notar que no UHPC ficou marcas do agregado após a ruptura, diferente da interface Tela (T), na qual houve o lascamento do CAR e o mesmo ficou aderido na interface do lado do UHPC. Em relação à interface Referência (R) verificou-se que após a ruptura de alguns corpos de prova o UHPC ficou parcialmente aderido no CAR e, nas amostras que não ficaram UHPC aderido na interface do CAR, a força de ruptura foi menor que aquelas que houve uma aderência parcial.

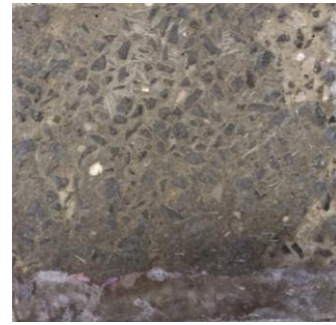
Já na interface Jato de areia (J) não houve nenhum tipo de aderência dos concretos em ambas as partes. Nos corpos de prova com Chave de cisalhamento (C) não ocorreu a quebra das chaves, apresentando apenas alguns lascamentos. A única interface que não se separou com a força de ruptura próxima ao fim do curso foi a Intermediária - fibra exposta (In), devido à presença das fibras que aderiu no UHPC e impediu o descolamento das partes, como ocorreu no corpo de prova monolítico UHPC.



Detalhe da ruptura



Amostra UHPC



Amostra CAR

(a) Agregado exposto (A)



Detalhe da ruptura



Amostra UHPC



Amostra CAR

(b) Chave de cisalhamento (C)



Detalhe da ruptura



Amostra UHPC



Amostra CAR

(c) Jato de areia (J)



Detalhe da ruptura



Amostra UHPC



Amostra CAR

(d) Referência (R)

Figura 4.3.1 - Imagem dos prismas após a ruptura na interface - Parte I



Detalhe da ruptura

Amostra UHPC

Amostra CAR

(e) Tela (T)



Detalhe da ruptura

Amostra UHPC

Amostra CAR

(f) Intermediária – fibra exposta (In)



(g) CAR



(d) UHPC

Figura 4.3.1 - Imagem dos prismas após a ruptura na interface - parte II

A Figura 4.3.2 e Figura 4.3.3 mostra o trecho ascendente da curva obtida pelo transdutor de deslocamento e clip gage e a Figura 4.3.4 e Figura 4.3.5 apresenta a média das curvas dos transdutores de deslocamento e clip gage. Na Figura 4.3.4 verifica-se que, na fase inicial de carregamento, todas as amostras obtiveram o comportamento linear e, conforme a força aplicada foi evoluindo, a interface Agregado exposto obteve um comportamento parecido com a amostra monolítica de CAR. Essa situação também pode ser vista na Figura 4.3.5, na qual a deformação medida no clip para a interface Agregado exposto foi bem próxima das medições feitas para o CAR. Destoando desse comportamento, a interface com Chave de cisalhamento obteve maiores deslocamentos e menores deformações na força de ruptura, respectivamente.

No ensaio de resistência à tração por flexão, a transferência dos esforços na interface ocorre por ligação adesiva, fato que pode justificar o maior valor da resistência para a interface com Agregado exposto (A), pois nesse caso a pasta de UHPC envolveu os grãos do agregado graúdo, formando uma ligação forte, sendo essa a superfície com maior grau de rugosidade. As interfaces com menor grau de conformação superficial, como a Tela (T), Intermediária (In) e Jato de areia (J) obtiveram valores inferiores de resistência em relação a interface com Agregado exposto (A), reduzindo a capacidade da ligação adesiva entre a pasta de cimento e a rugosidade. Em relação a interface do tipo Chave de cisalhamento, que obteve o menor valor de força de ruptura, a ligação por adesão foi criada praticamente na região vertical da chave, com pouca rugosidade e, na região inclinada da chave, a ligação adesiva foi reduzida.

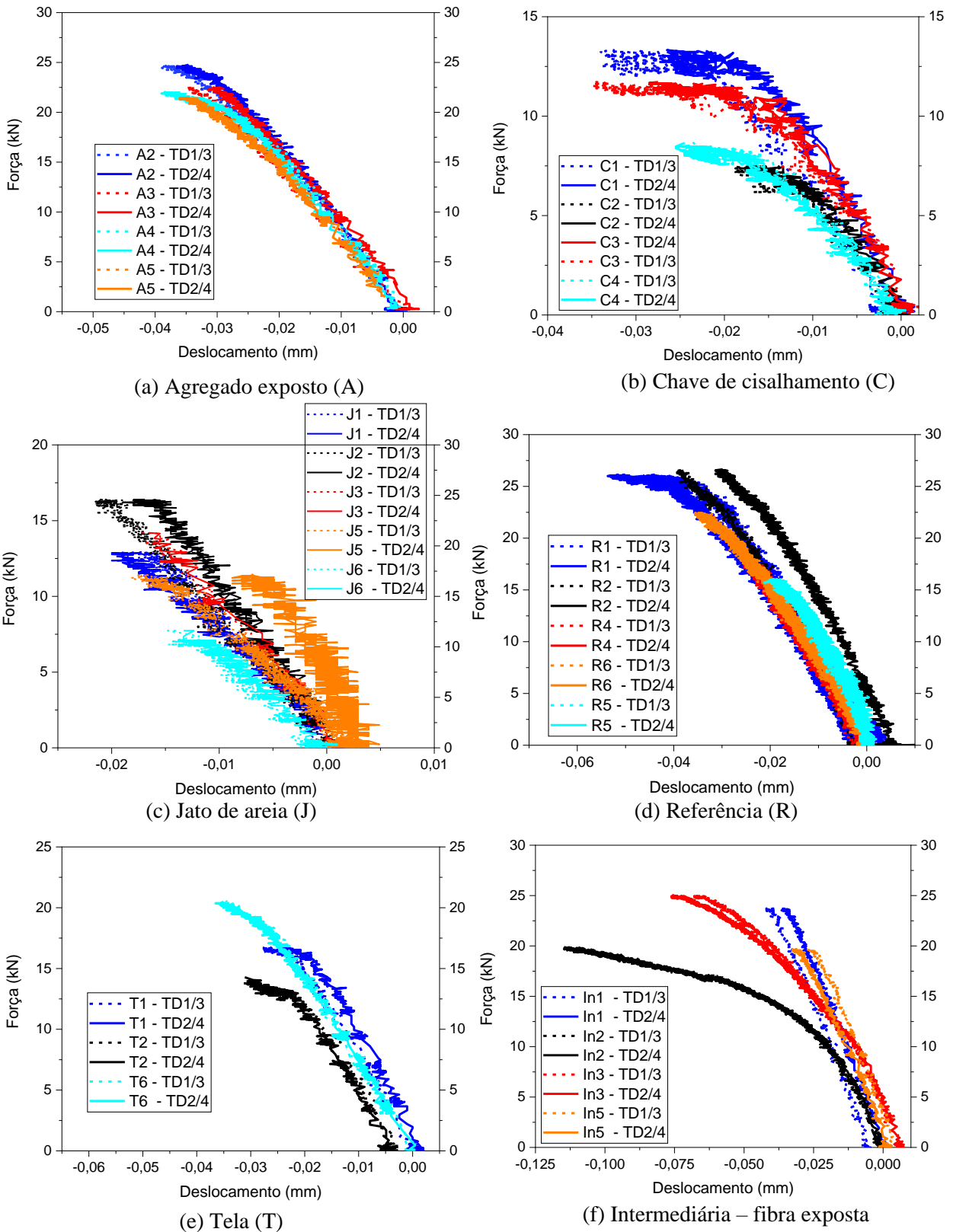


Figura 4.3.2 - Trecho ascendente da curva força versus deslocamento dos transdutores de deslocamento - Parte I

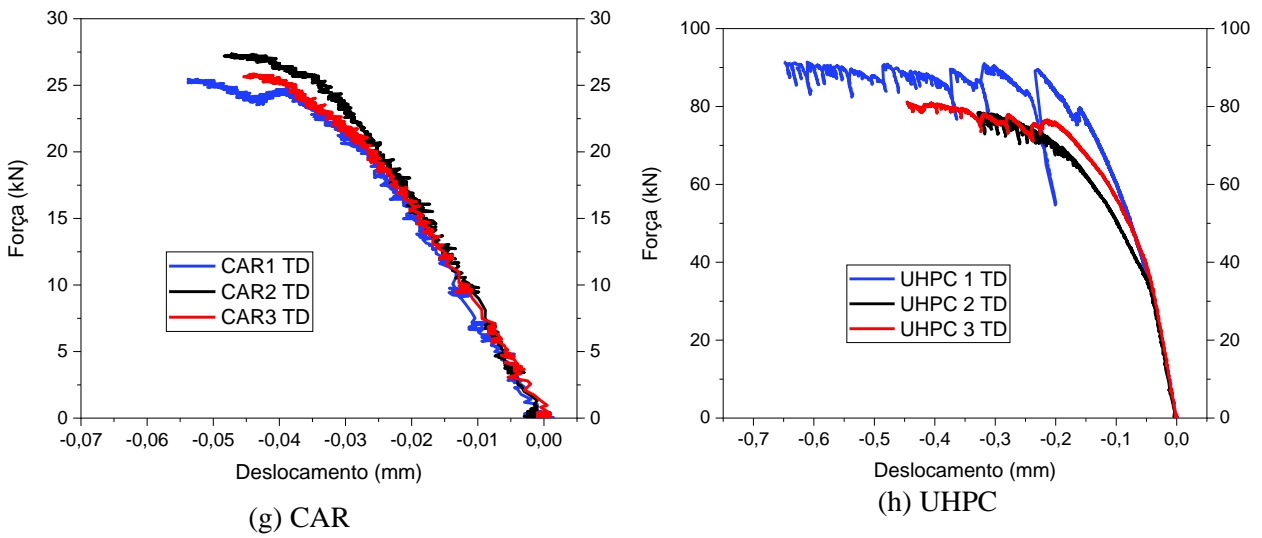


Figura 4.3.2 - Trecho ascendente da curva força versus deslocamento dos transdutores de deslocamento - Parte II

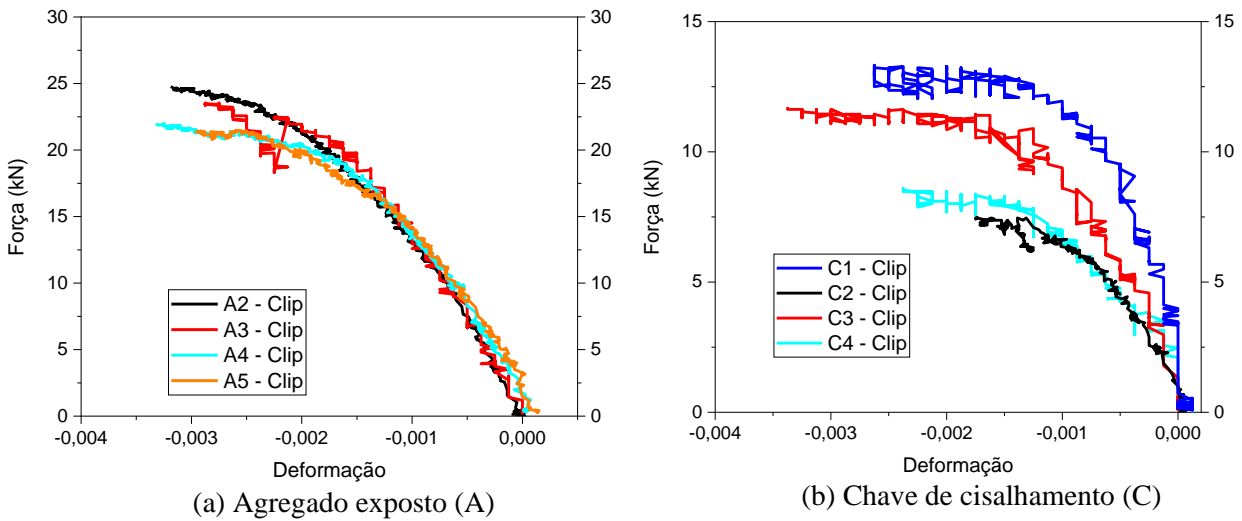
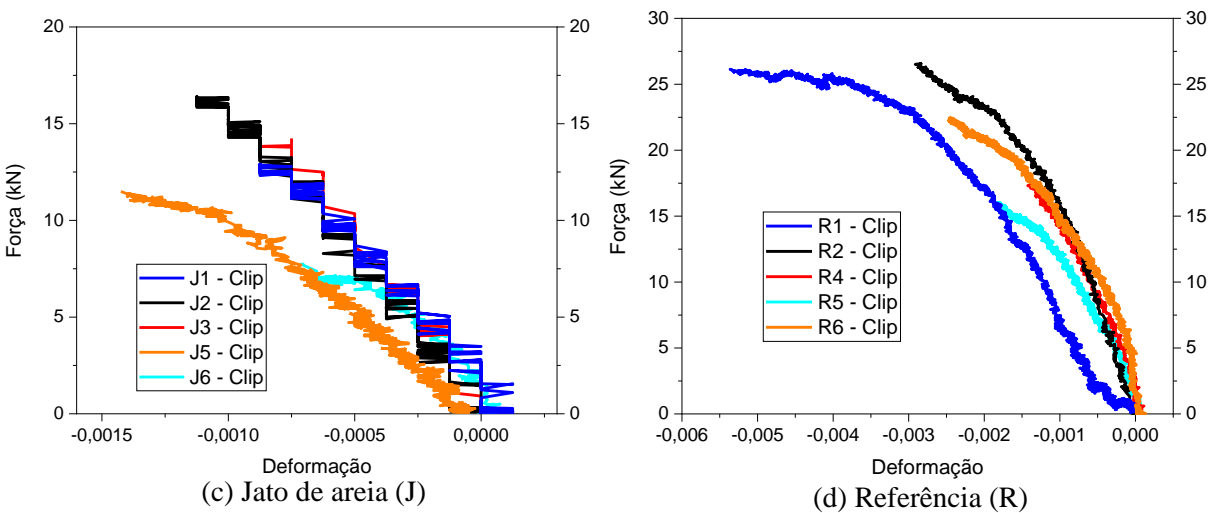
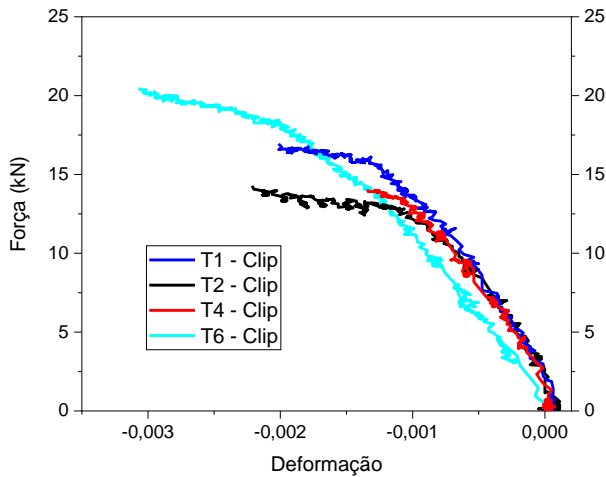
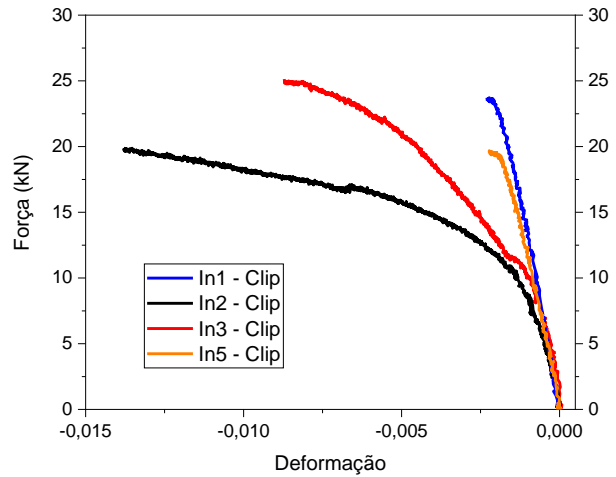


Figura 4.3.3 - Trecho ascendente da curva força versus deformação do clip gage - Parte I. Unidade: deformação (mm/mm)

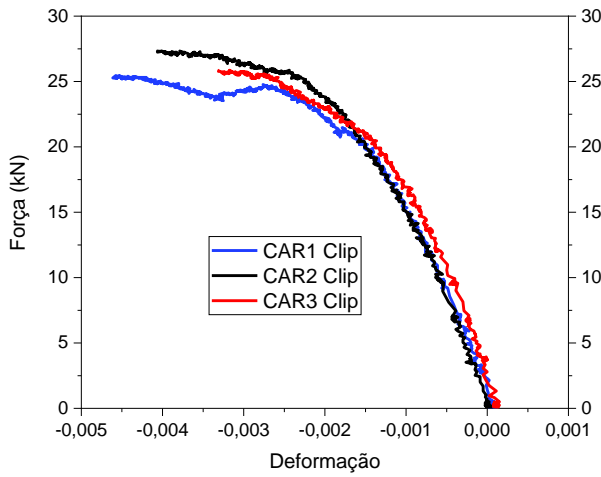




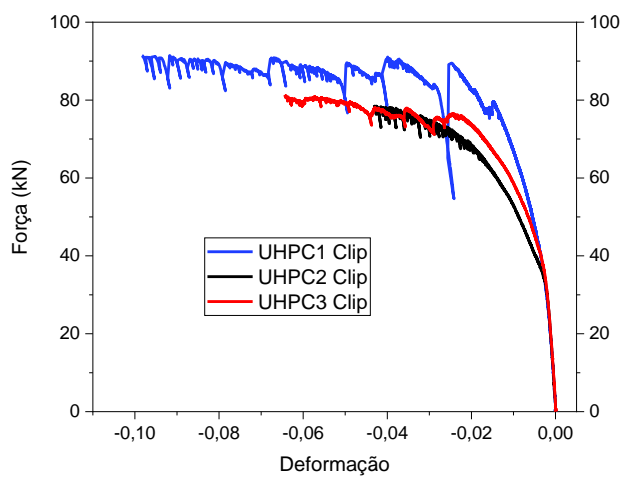
(e) Tela (T)



(f) Intermediária – fibra exposta



(g) CAR



(h) UHPC

Figura 4.3.3 - Trecho ascendente da curva força versus deformação do clip gage - Parte II.
Unidade: deformação (mm/mm)

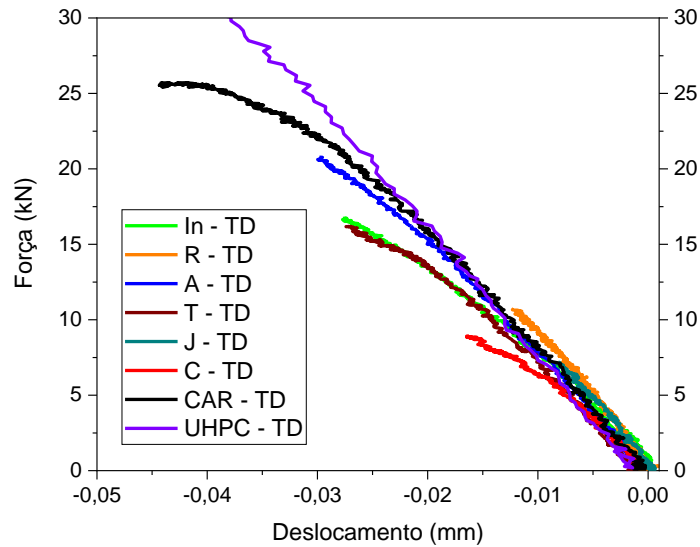


Figura 4.3.4 - Curva força média versus deslocamento médio dos transdutores de deslocamento das interfaces – ensaio de resistência à tração na flexão

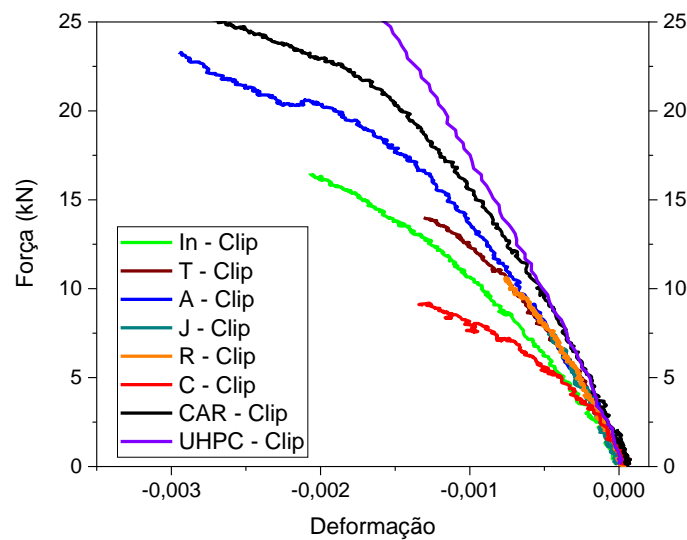


Figura 4.3.5 - Curva força média versus deformação média do clip gage das interfaces – ensaio de resistência à tração na flexão. Unidade: deformação (mm/mm)

Em relação as deformações de compressão, Figura 4.3.6, quase todas as interfaces apresentaram uma curva linear do começo até a evolução da força aplicada, exceto para a interface Chave de cisalhamento (C) que obteve uma curva linear no início do ensaio e, conforme a força foi aumentando, a inclinação da curva foi alterando com grandes deformações para uma taxa de carregamento baixa em relação aos demais resultados obtidos para as outras interfaces.

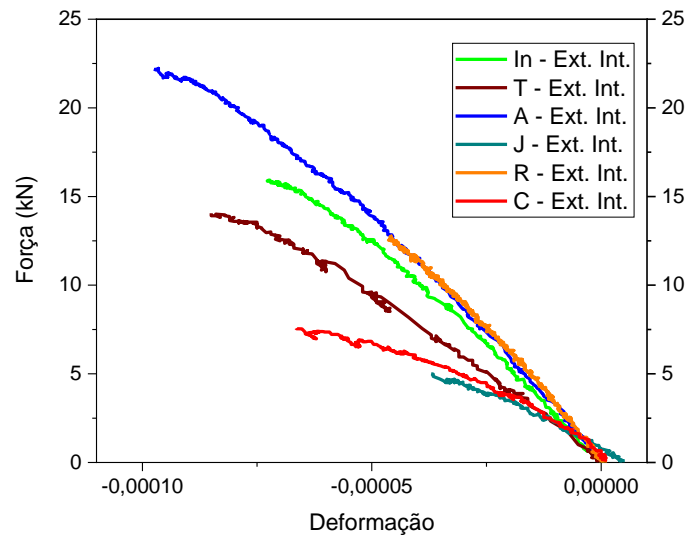


Figura 4.3.6 – Curva força média versus deformação média dos extensômetros das interfaces – ensaio de resistência à tração na flexão. Unidade: deformação (mm/mm)

A Tabela 4.3.1 apresenta a força de ruptura máxima e suas correspondentes medições de deslocamentos e deformações realizadas no ensaio de resistência à tração na flexão para os corpos de prova moldados com interface e sem interface (os resultados discriminados encontram-se no Apêndice C do trabalho). Para todas as medições realizadas, a superfície que obteve melhor comportamento foi a Agregado exposto (A), com maior carga de ruptura e, a interface com menor força de ruptura foi a Chave de cisalhamento (C), 45,5% da interface A. Os resultados apresentados na Tabela 4.3.2 mostram que não ocorreu diferença entre as forças de ruptura para as interfaces Agregado exposto (A) e Intermediária-fibra (In) quando comparada à interface Referência (R). A força de ruptura elevada para a interface Referência (R) pode ter ocorrido devido ao efeito cola do UHPC que gerou uma ligação adesiva forte, apesar da superfície ser lisa. No entanto o corpo de prova abriu de modo frágil na ligação, por não apresentar rugosidade da interface (Figura C2 do Apêndice - curva completa).

O valor estatístico para a interface Tela ficou dentro do limite crítico (Tabela 4.3.2), conforme pode ser visto pelo valor de P igual a 0,1, próximo ao erro de 0,05, indicando que o resultado não é muito conclusivo.

A superfície que obteve maior deslocamento vertical (0,06 mm) e maior deformação no entalhe (0,006) foi a Intermediária – fibra (In), resultado esse que foi possível devido à presença das fibras expostas aderidas ao UHPC que garantiu a ligação da interface. Os deslocamentos verticais e deformações horizontais das demais interfaces (Agregado exposto, Referência, Tela e Chave)

apresentaram baixa variação, na qual a diferença da média do maior valor de medição vertical para a média do menor valor de medição vertical foi de 25%.

A interface Jato de areia (J) foi a que obteve menor deslocamento vertical e deformação na horizontal quando comparada com a interface Agregado exposto na força de ruptura, 45% e 35% respectivamente. Isso indica que a rugosidade gerada pelo jateamento de areia na superfície, na qual o agregado miúdo ficou exposto, não foi suficiente para garantir uma boa ligação adesiva com o UHPC. As interfaces Jato de areia (J) e Chave de cisalhamento (C) apresentaram resultados estatísticos superiores aos limites (Tabela 4.3.2), indicando diferença da força de ruptura quando comparada à interface Referência.

Considerando a relação da resistência obtida para os corpos de prova com interface e a resistência à flexão do corpo de prova monolítico CAR, é possível encontrar os seguintes coeficientes de transferência adesiva, em ordem decrescente de resistência: A = 0,86; In = 0,84; R = 0,83; T = 0,62; J = 0,48; C = 0,39.

Tabela 4.3.1- Valores médios de força de ruptura, resistência à tração na flexão e suas correspondentes medições dos transdutores de deslocamento e deformação do clip gage das interfaces

Interface (desvio padrão - S)	F _{ruptura} (kN)	f _{ct,f} (MPa)	TD 1/3 (mm)	TD 2/4 (mm)	ε Clip
A	22,67	4,35	-0,036	-0,034	-0,003
(S)	1,42	0,27	0,002	0,003	0,0004
In	22,12	4,25	-0,061	-0,064	-0,006
(S)	2,72	0,52	0,037	0,039	0,0056
R	21,77	4,18	-0,031	-0,031	-0,002
(S)	4,84	0,93	0,011	0,012	0,00066
T	16,45	3,16	-0,030	-0,030	-0,002
(S)	3,0	0,58	0,004	0,005	0,001
J	12,56	2,41	-0,017	-0,014	-0,00098
(S)	3,24	0,62	0,002	0,004	0,0003
C	10,30	1,98	-0,027	-0,024	-0,002
(S)	2,69	0,52	0,007	0,005	0,0007
CAR	26,26	5,04	-0,050		-0,004
(S)	1,03	0,19	0,009		0,005
UHPC	83,8	16,09	-0,474		-0,068
(S)	6,78	1,30	0,162		0,222

Tabela 4.3.2 - Teste-t considerando interface Referência e presumindo variâncias equivalentes com erro de 5% - resistência à tração na flexão

Interface	F _{ruptura} (kN)	desvio padrão (S)	Stat t	P (T ≤ t) bi-caudal	t crítico bi-caudal
Referência (R)	21,77	4,84	-	-	-
Agregado exposto (A)	22,67	1,42	-0,38	0,71	2,36
Intermediária - fibra (In)	22,12	2,72	-0,13	0,90	2,36
Tela de aço expandida (T)	16,45	3,00	1,91	0,10	2,36
Jato de areia (J)	12,56	3,24	3,53	0,01	2,36
Chave de cisalhamento (C)	10,30	2,69	4,21	0,00	2,36

4.4 Resistência ao cisalhamento direto

Todos os corpos de prova analisados no ensaio de resistência ao cisalhamento direto romperam na interface, conforme apresentado na Figura 4.4.1 - 4.4.9. Para a interface com Agregado exposto foi possível notar que ficou CAR aderido no UHPC (Figura 4.4.1). Em relação aos corpos de prova com interface Chave de cisalhamento (C), nas interfaces que obtiveram quebra parcial da chave (Figura 4.4.2) a força de ruptura foi menor e, na interface que ocorreu a ruptura de todas as chaves de cisalhamento, ficando grande quantidade de CAR aderido ao UHPC, a força de ruptura foi mais elevada. Na interface Jato de areia (J) (Figura 4.4.3), após a ruptura foi possível notar que não houve aderência dos concretos entre as interfaces. Diferente da interface Referência (R) (Figura 4.4.4), na qual após a ruptura houve o lascamento do CAR e o mesmo ficou colado na interface do UHPC, assim como aconteceu na interface Tela (T) (Figura 4.4.5). Todas as interfaces supracitadas romperam com total descolamento das partes.

Nos corpos de prova com as interfaces Intermediária – fibra (In), Intermediária – monolítico (I) e monolítico UHPC, referente a Figura 4.4.6, Figura 4.4.7 e Figura 4.4.9, respectivamente, após a força de ruptura não houve descolamento das partes. Para as interfaces In e UHPC, a presença das fibras contribuíram para o não descolamento e na interface I as partes ficaram ligadas pela tela. A Figura 4.4.8 apresenta a imagem do corpo de prova monolítico CAR, na qual houve uma ruptura explosiva.

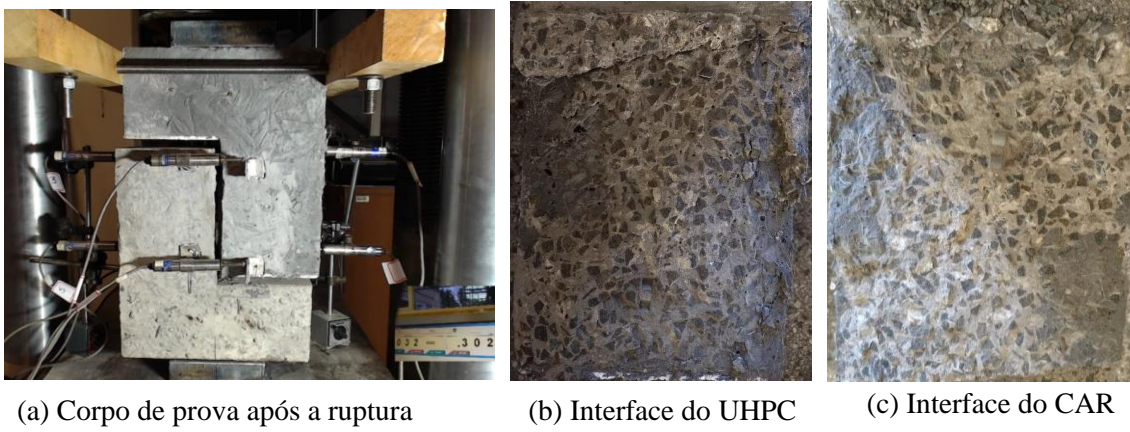


Figura 4.4.1 -Imagem típica da interface Agregado exposto (A) após a ruptura

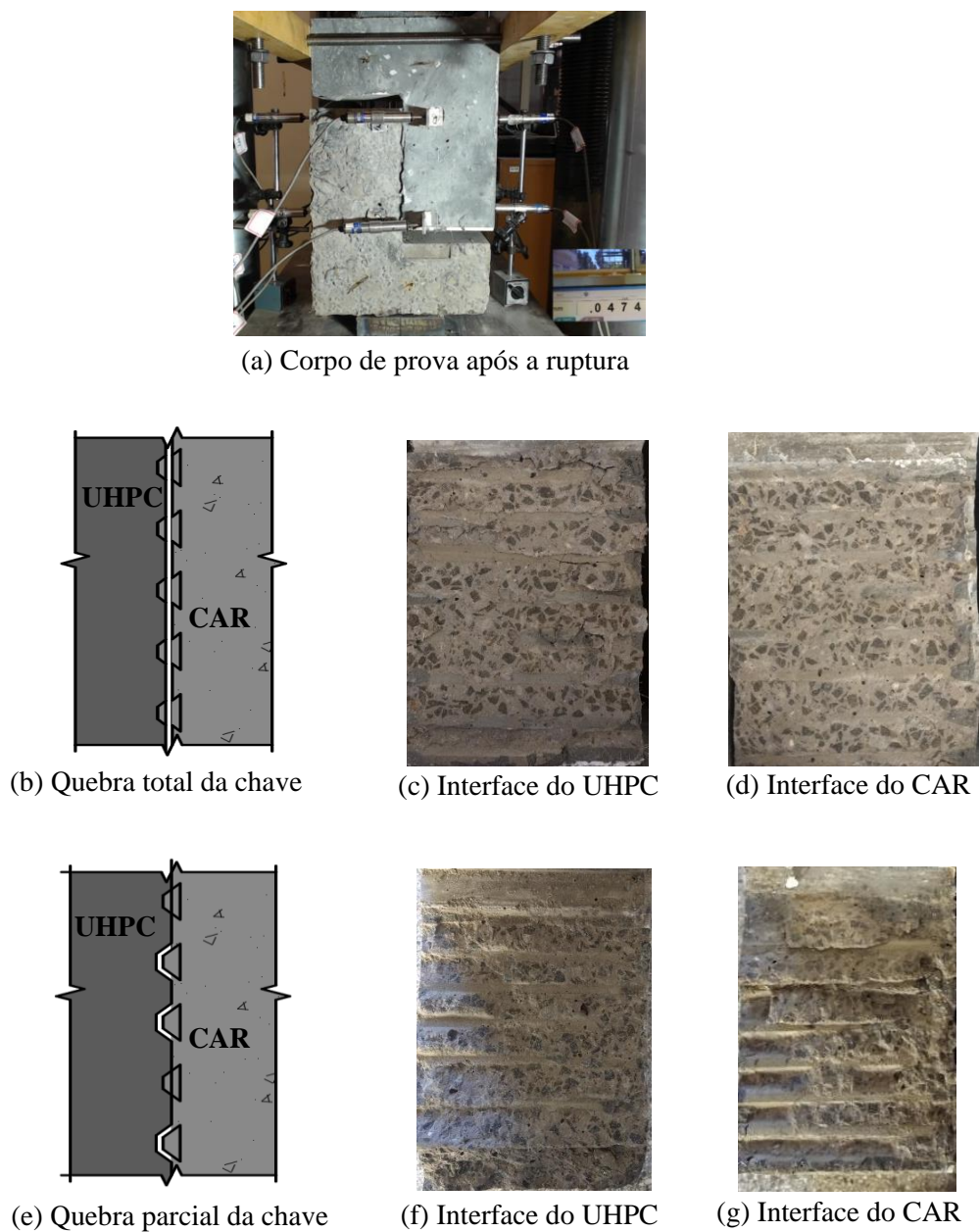


Figura 4.4.2 - Detalhe do critério de ruptura da interface Chave de cisalhamento (C)

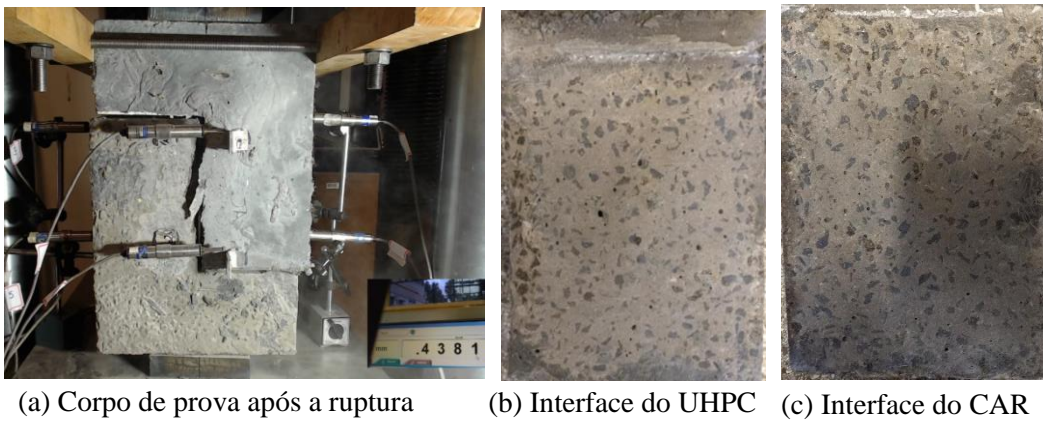


Figura 4.4.3- Imagem típica da interface Jato de areia (J) após a ruptura

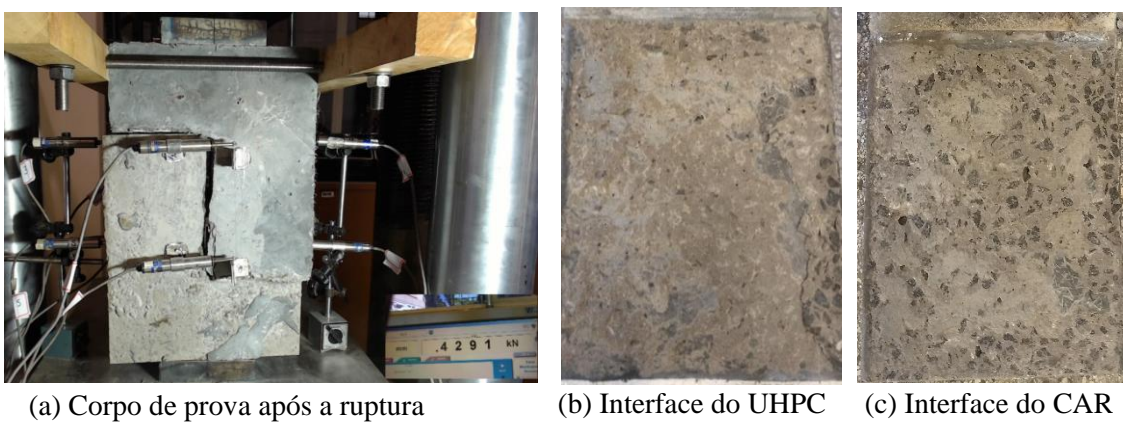


Figura 4.4.4 - Imagem típica da interface Referência (R) após a ruptura

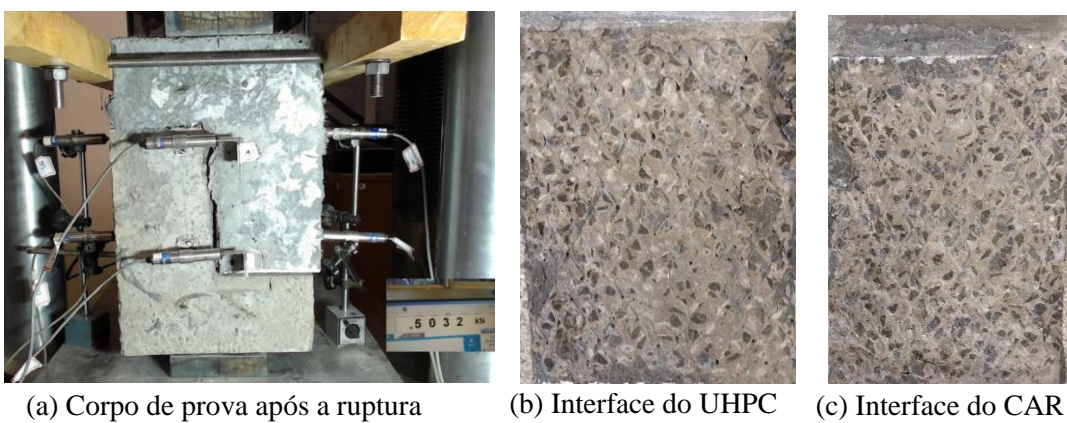


Figura 4.4.5 - Imagem típica da interface Tela (T) após a ruptura

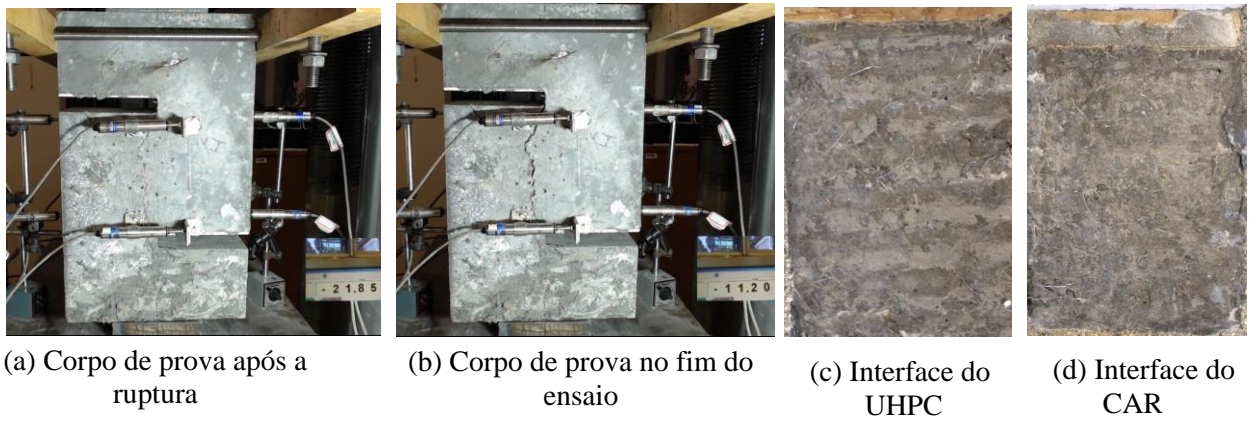


Figura 4.4.6- Imagem típica da interface Intermediária - fibra (In) após a ruptura

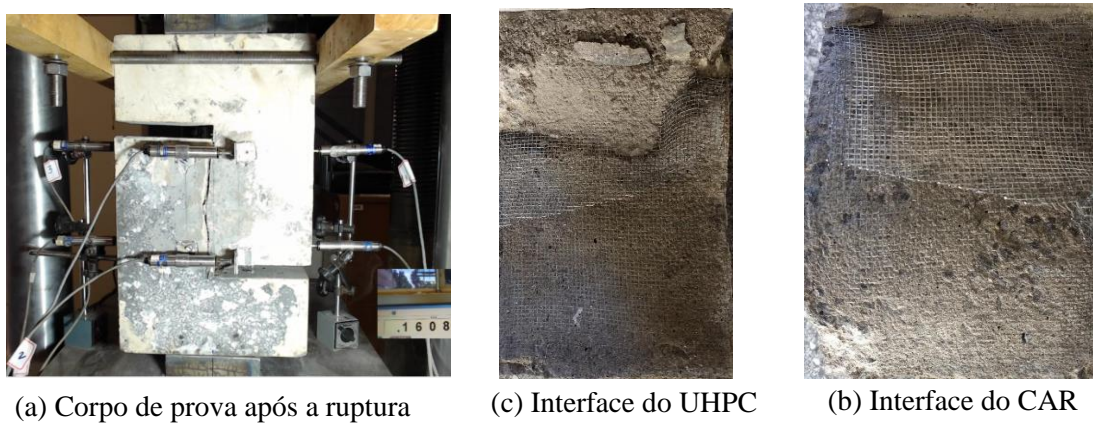


Figura 4.4.7- Imagem típica da interface Intermediária - monolítico (I) após a ruptura

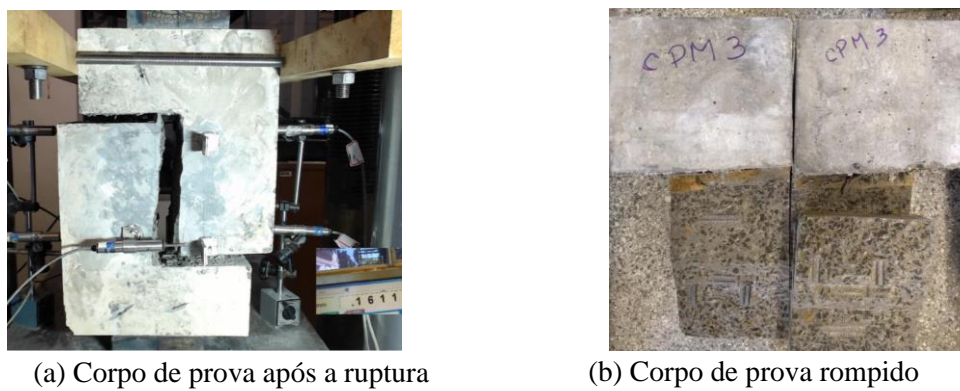


Figura 4.4.8 - Imagem típica do corpo de prova monolítico CAR após a ruptura

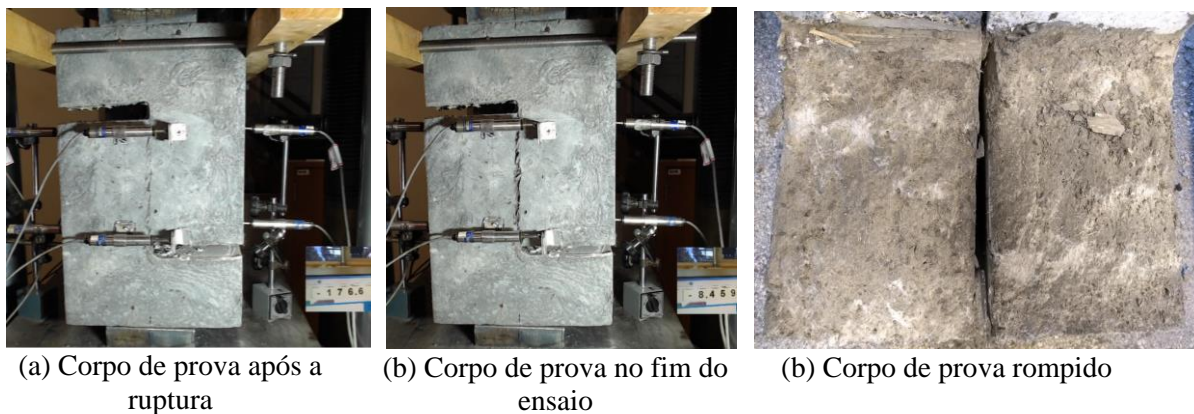


Figura 4.4.9 - Imagem típica do corpo de prova monolítico UHPC após a ruptura

Em relação aos valores médios dos transdutores de deslocamento 1 e 2 (TD 1/2), posicionados na horizontal da interface, quase todos os corpos de prova apresentaram um comportamento linear de deslizamento até a força de ruptura (Figura 4.4.10).

Já o corpo de prova monolítico CAR e com interface Intermediária - monolítico (I) obtiveram um comportamento diferente dos corpos de prova com interface. Por serem monolíticos, não há deslizamento ou adesão, por isso o deslocamento horizontal praticamente inalterado até a força de 75 kN e 100 kN, respectivamente para os corpos de prova monolítico CAR e Intermediária - monolítico (I). Diferentemente, o corpo de prova monolítico UHPC apresentou um comportamento linear do começo ao fim. Isso indica que a presença das fibras permitiu essa configuração, na qual ocorre a distribuição dos esforços entre as fibras e a pasta de cimento, gerando um deslocamento relativo entre os materiais. As curvas completas dos transdutores de deslocamento 1 e 2 para cada interface encontra-se no Apêndice D.

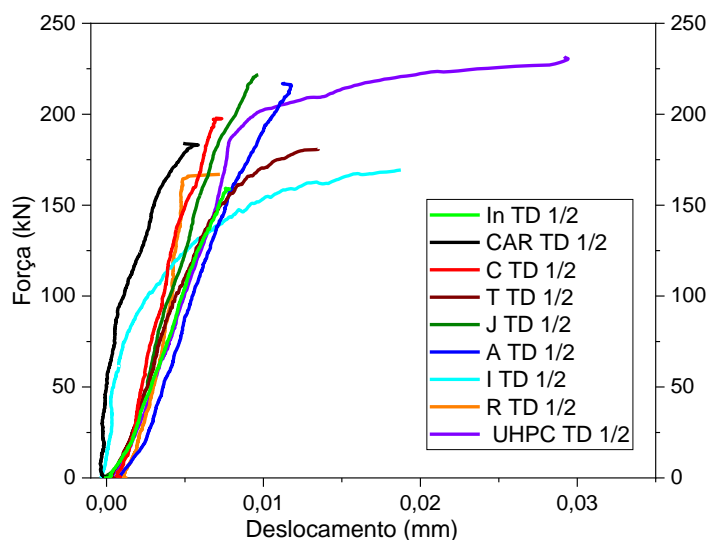


Figura 4.4.10- Curva força média versus deslocamento médio dos transdutores de deslocamentos 1/2 das interfaces – ensaio de resistência ao cisalhamento direto

A Figura 4.4.11 apresenta a curva do trecho ascendente de força versus deslizamento do transdutor de deslocamento 8 (TD 8) e a Figura 4.4.12 mostra a curva média de todas as interfaces em relação ao deslizamento medido pelo TD 8. As interfaces obtiveram um comportamento semelhante em relação ao deslizamento vertical na fase inicial de carregamento, sendo a ligação química predominando até a força de 47 kN e, depois que a mesma foi perdida, a parcela da transferência mecânica relacionada a rugosidade da superfície teve seu efeito com uma evolução linear até o ponto de ruptura da ligação.

A interface Jato de areia (J) não obteve um comportamento linear como nas outras interfaces depois da ligação química perdida. Destoando desse resultado, pode-se destacar a interface Agregado exposto (A) (Figura 4.4.12), na qual obteve um deslizamento linear ao longo da força aplicada, ocorrendo simultaneamente a ligação adesiva e a ligação mecânica entre a pasta de cimento e o agregado, desde a fase inicial até a força de ruptura. Pode-se chamar a atenção para a interface Intermediária - fibra (In), pois a transferência adesiva da mesma ocorreu com uma força maior que as demais interfaces, aproximadamente o dobro, o que pode ter acontecido devido à presença das fibras que ficou ancorada no UHPC. Quando o efeito da ligação adesiva foi perdido, a força de ruptura foi baixa, mostrando que as fibras só contribuíram nessa etapa.

As interfaces que obtiveram maiores valores de deslocamentos verticais antes da ruptura foram a Agregado exposto (A) e Chave de cisalhamento (C). A interface C obteve esse comportamento porque, para ocorrer o deslizamento vertical, as chaves de cisalhamento existentes na interface precisaram ser quebradas, criando essa resistência antes do deslizamento vertical, bem como a interface A, na qual para haver o descolamento das partes teve que resistir o intertravamento dos agregados.

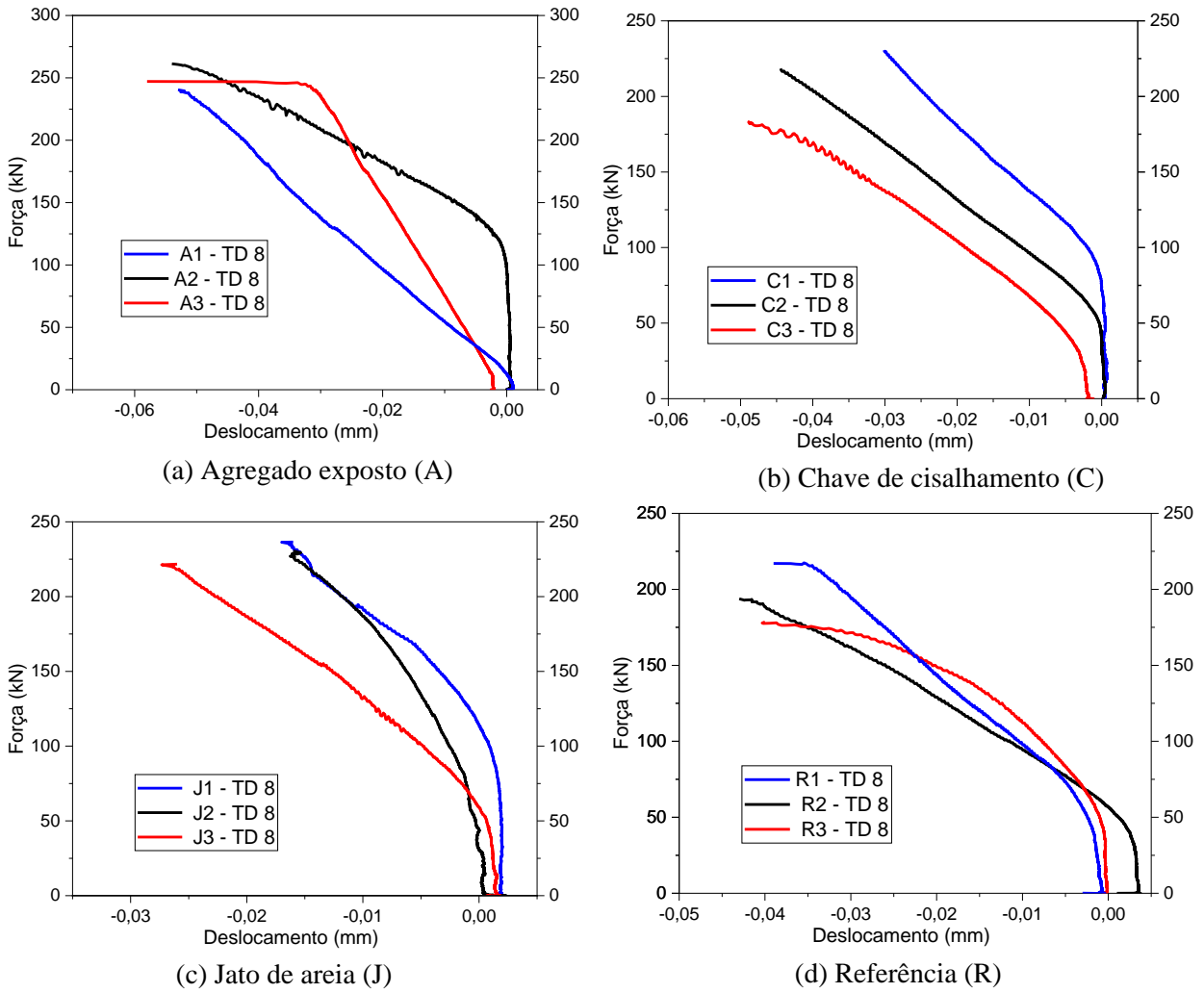
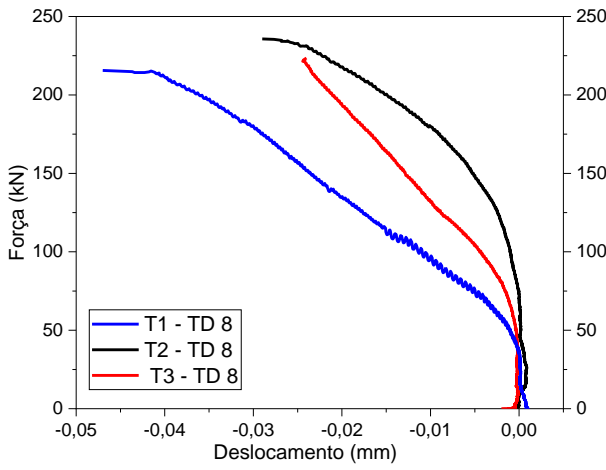
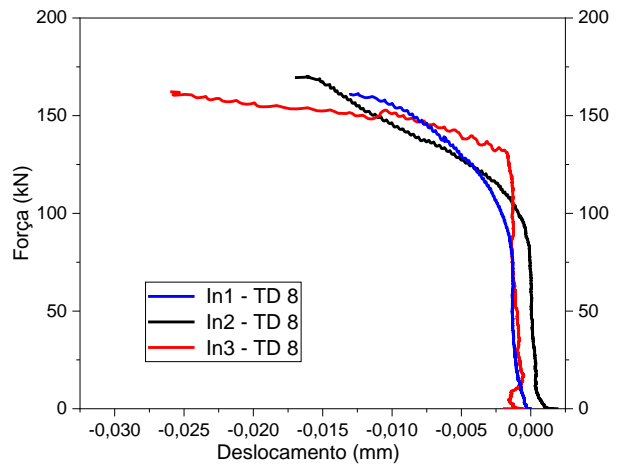


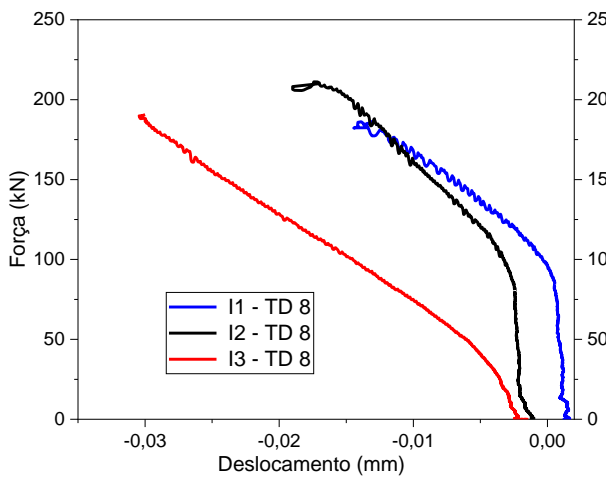
Figura 4.4.11 - Curva força versus deslocamento da média do transdutor de deslocamento 8 – Parte I



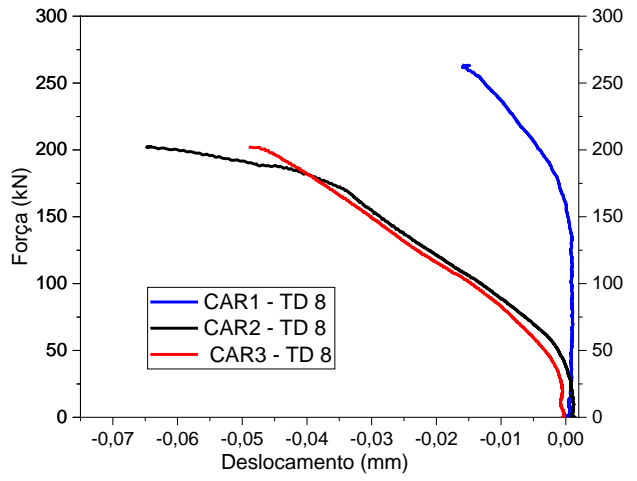
(e) Tela (T)



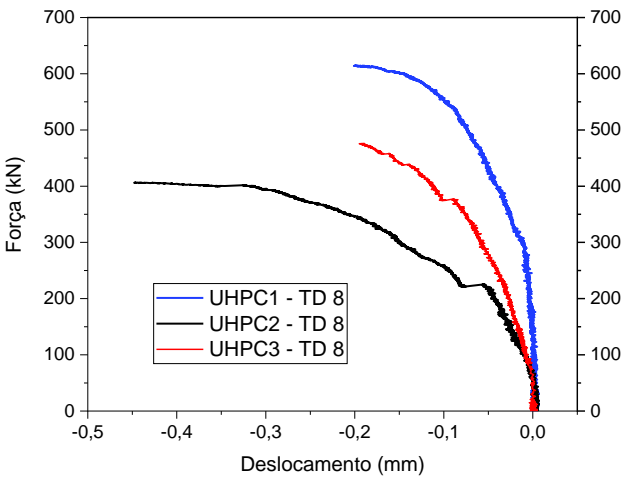
(f) Intermediária – fibra exposta (In)



(f) Intermediária – monolítico (I)



(g) CAR



(h) UHPC

Figura 4.4.11 - Curva força versus deslocamento da média do transdutor de deslocamento 8 – Parte II

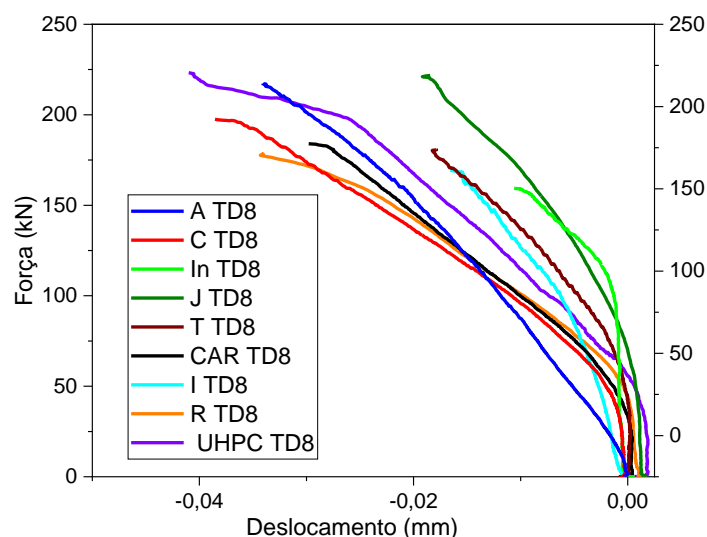


Figura 4.4.12 - Curva força média versus deslocamento médio do transdutor de deslocamento 8 (TD8) das interfaces – ensaio de resistência ao cisalhamento direto

A Figura 4.4.13 mostra a evolução das curvas médias de todas as interfaces dos transdutores de deslocamentos 7 e 9 (TD 7/9), na qual foi possível separar em três grupos (G1, G2 e G3), em relação à semelhança das curvas (a curva completa para cada interface encontra-se no Anexo C). As interfaces do G1 (Intermediária - fibra – In, Intermediária - moldada – I, Jato de areia - J e Agregado exposto - A) obtiveram um comportamento linear tanto na fase inicial quanto na fase final, porém com inclinações diferentes, sendo a reta da fase inicial mais inclinada em relação a reta da fase final, na qual a mudança de inclinação ocorreu quando a parcela da ligação química foi perdida. Esse comportamento também foi notado na amostra G3 (interface monolítica CAR), porém com uma inclinação menor em relação as retas formadas no G1. Já as amostras do G2 (R, T, UHPC e C) obtiveram um comportamento tendendo a uma linearização, tanto na fase inicial quanto na fase final.

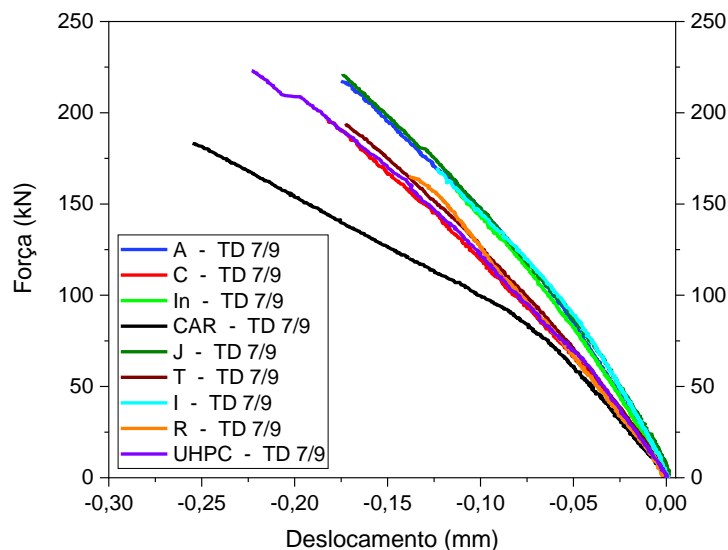


Figura 4.4.13 - Curva força média versus deslocamento médio dos transdutores de deslocamentos 7/9 (TD 7/9) das interfaces – ensaio de resistência ao cisalhamento direto

Os resultados médios, em ordem decrescente de força de ruptura para cada interface, são mostrados na Tabela 4.4.1 (os resultados discriminados encontram-se no Apêndice D do trabalho). A interface que apresentou maior valor de força de ruptura e deslizamento vertical foi a Agregado exposto (A) e a interface com menor valor foi a Intermediária – fibra (In), 64,4% e 21,8% dos valores da interface A, respectivamente. Isso indica que a presença das fibras expostas não teve contribuição resistente para essa solicitação.

Os resultados apresentados na Tabela 4.4.2 mostram que não houve diferença entre as forças de ruptura para os corpos de prova com as interfaces Chave de cisalhamento (C), Intermediária – fibra (In) e Intermediária – monolítica (I) quando comparada à interface Referência (R). As interfaces supracitadas apresentaram resistência menor que a do corpo de prova monolítico CAR. Entretanto, as interfaces C e R obtiveram deslocamentos verticais elevados quando comparado com as demais interfaces, porém 25% menor que a interface Agregado exposto (A), de maior deslocamento vertical. Em relação à interface C isso ocorreu em decorrência da presença das chaves de cisalhamento que criaram um impedimento para o deslizamento e, na interface R, o deslizamento vertical elevado foi gerado devido ao efeito cola do UHPC.

As interfaces Tela (T), Jato de areia (J) e Agregado exposto (A) apresentaram valores estatísticos superiores aos limites (Tabela 4.4.2), mostrando que houve diferença significativa da força de ruptura quando comparada à interface Referência. A interface T apresentou deslizamento vertical e horizontal maior em relação à interface J, 73,68% e 90% respectivamente, decorrente do maior grau de rugosidade. As interfaces supracitadas exibiram força de ruptura semelhante à do corpo de prova monolítico CAR. Os corpos de prova com a interface Agregado exposto

apresentaram valores de força de ruptura 12% maior que a do corpo de prova monolítico CAR. Como a diferença entre as forças de ruptura foi pequena, pode-se considerar igualdade entre elas.

Considerando a relação da resistência ao cisalhamento direto último obtida para os corpos de prova com interface e o corpo de prova monolítico CAR, é possível encontrar os seguintes coeficientes, relacionado à transferência adesiva e mecânica, em ordem decrescente de resistência: A = 1,12; J = 1,03; T = 1,0; C = 0,95; R = 0,89; I = 0,88; In = 0,72.

Tabela 4.4.1 - Valores médios de força de ruptura, resistência ao cisalhamento direto e suas correspondentes medições dos transdutores de deslocamento das interfaces

Interface (desvio padrão - S)	$F_{ruptura}$ (kN)	τ_{ultima} (c) (MPa)	TD 1/2 (mm)	TD 7/9 (mm)	TD 8 (mm)
A	249,60	8,32	0,018	-0,211	-0,055
(S)	10,64	0,36	0,008	0,023	0,003
J	229,59	7,65	0,010	-0,183	-0,019
(S)	7,44	0,25	0,005	0,016	0,006
T	224,95	7,49	0,019	-0,223	-0,033
(S)	10,13	0,34	0,009	0,044	0,012
C	210,87	7,02	0,009	-0,199	-0,043
(S)	24,4	0,81	0,004	0,045	0,011
R	196,46	6,54	0,008	-0,169	-0,041
(S)	19,39	0,65	0,003	0,048	0,002
I	195,76	6,52	0,044	-0,152	-0,020
(S)	12,53	0,418	0,018	0,025	0,009
In	160,78	5,36	0,007	-0,119	-0,012
(S)	9,14	0,305	0,003	0,025	0,006
CAR	222,72	7,42	0,034	-0,346	-0,051
(S)	35,33	1,178	0,011	0,023	0,033
UHPC	499,22	16,64	0,355	-0,897	-0,278
(S)	106,08	3,54	0,225	0,372	0,145

Tabela 4.4.2 - Teste-t considerando interface Referência presumindo variâncias equivalentes com erro de 5% - resistência ao cisalhamento direto

Interface	$F_{ruptura}$ (kN)	Desvio padrão (S)	Stat t	P ($T \leq t$) bi-caudal	t crítico bi-caudal
Referência (R)	196,46	19,4	-	-	-
Chave de cisalhamento (C)	210,87	24,40	0,78	0,52	4,30
Intermediária - monolítico (I)	195,76	12,53	1,15	0,37	4,30
Intermediária - fibra (In)	160,78	9,14	-2,17	0,16	4,30
Tela de aço expandida (T)	224,95	10,13	4,45	0,05	4,30
Jato de areia (J)	229,59	7,44	4,54	0,05	4,30
Agregado exposto (A)	249,60	10,64	6,53	0,02	4,30

4.5 Resistência ao cisalhamento inclinado

A Figura 4.5.1 - 4.5.11 mostra a ruptura dos corpos de prova no ensaio de resistência ao cisalhamento inclinado para cada interface. Sobre o tipo de ruptura, todas as amostras obtiveram um comportamento explosivo, exceto a interface Intermediária - fibra (In), pois a mesma rompeu na interface do CAR com o concreto Intermediário, na qual a presença da tela no interior do concreto contribui para que não rompesse de forma explosiva (Figura 4.5.10).

Nas amostras que não romperam na interface, mas na região do CAR, houve a formação do cone de tensões no mesmo (Figura 4.5.1). Em relação à interface Agregado exposto (A), Tela (T), Jato de areia (J) e Referência (R), após a análise das amostras que romperam na interface, notou-se que ocorreu lascamento no CAR e o mesmo ficou aderido ao UHPC. Na interface Chave de cisalhamento (C) verificou-se a ruptura de todas as chaves na superfície do CAR e parte do mesmo ficou aderido ao UHPC (Figura 4.5.4).

Na ruptura do corpo de prova monolítico CAR ocorreu a formação do cone de tensões, indicando uma distribuição dos esforços uniforme ao longo do comprimento, conforme pode ser visto na Figura 4.5.11.

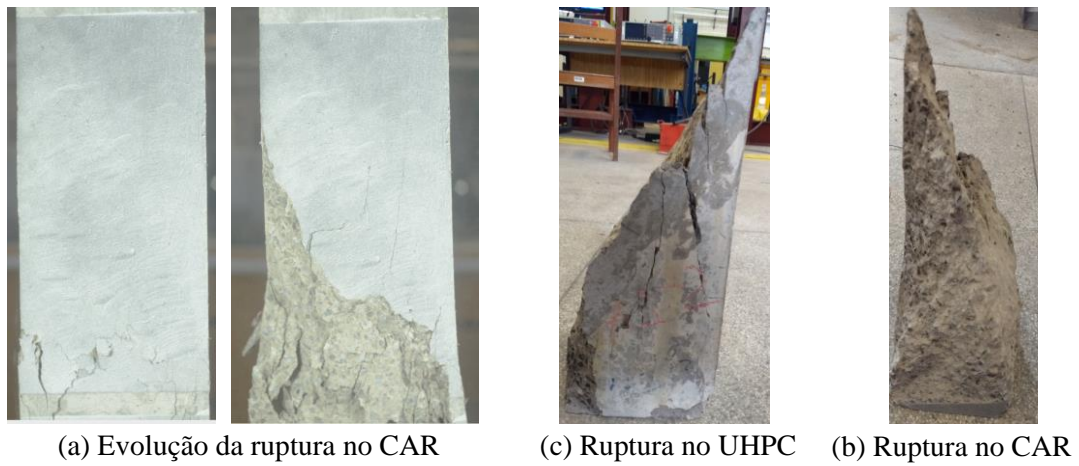


Figura 4.5.1 - Imagem típica da interface Agregado exposto (A) que rompeu no CAR

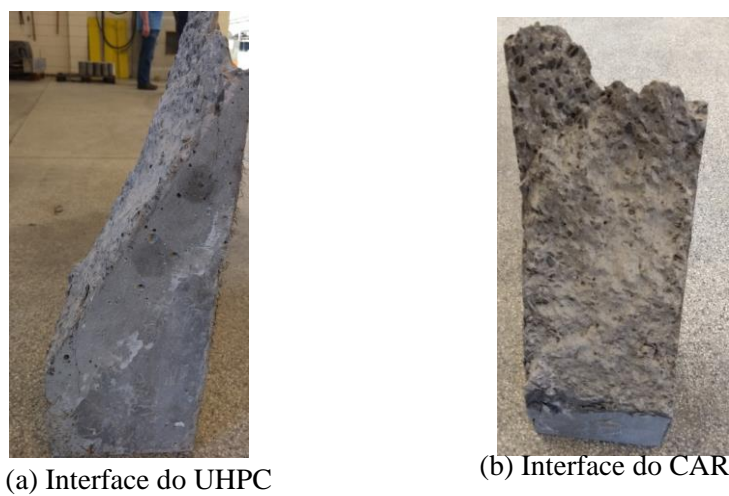


Figura 4.5.2 - Imagem típica do corpo de prova após ruptura na interface Agregado exposto (A)

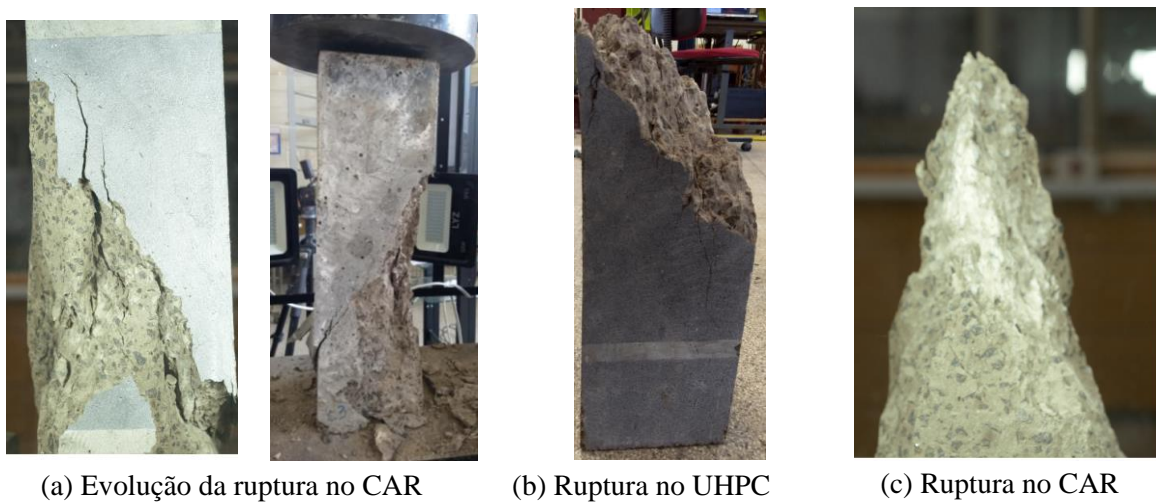


Figura 4.5.3 - Imagem típica da interface Chave de cisalhamento (C) que rompeu no CAR



(a) Corpo de prova após a ruptura



(b) Interface do UHPC



(c) Interface do CAR

Figura 4.5.4 - Imagem típica do corpo de prova após ruptura na interface Chave de cisalhamento (C)



(a) Evolução da ruptura no CAR



(b) Ruptura no UHPC



(c) Ruptura no CAR

Figura 4.5.5 - Imagem típica da interface Jato de areia (J) que rompeu no CAR



(a) Interface do UHPC



(b) Interface do CAR

Figura 4.5.6 - Imagem típica do corpo de prova após ruptura na interface Jato de areia (J)

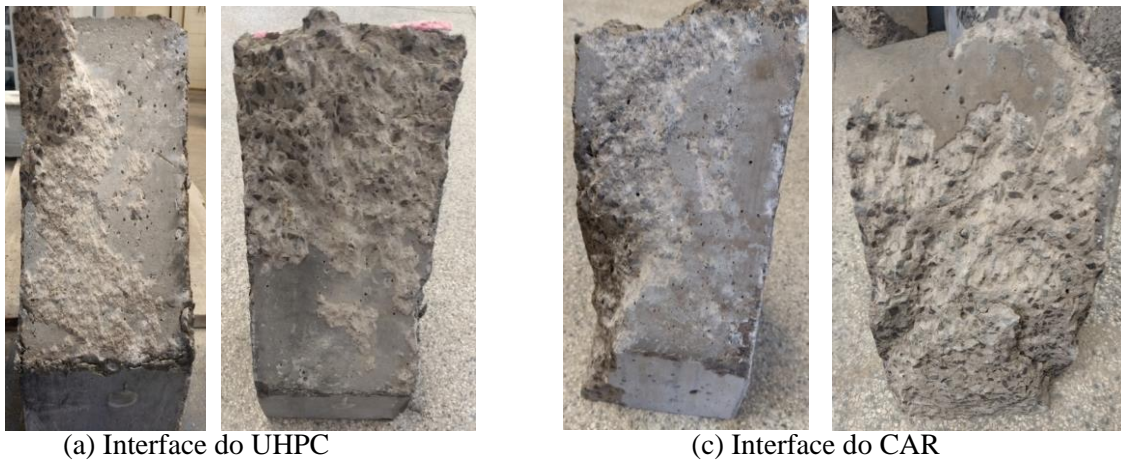


Figura 4.5.7 - Imagem típica do corpo de prova após ruptura na interface Referência (R)



Figura 4.5.8 - Imagem típica da interface Tela (T) que rompeu no CAR

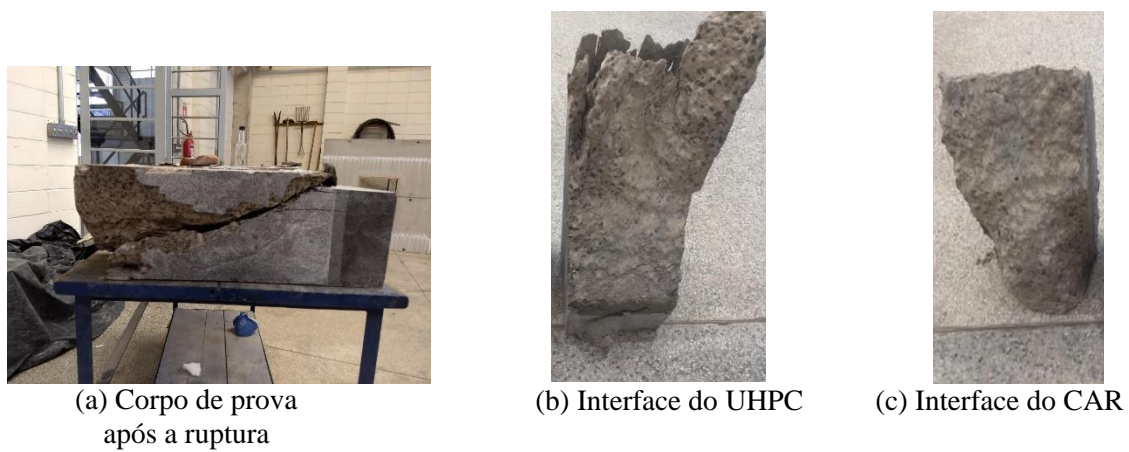


Figura 4.5.9 - Imagem típica do corpo de prova após ruptura na interface Tela (T)



Figura 4.5.10- Imagem típica do corpo de prova após ruptura na interface Intermediária - fibra (In)



Figura 4.5.11- Imagem típica do corpo de prova monolítico CAR após ruptura

A Figura 4.5.12 apresenta os resultados da curva média dos transdutores de deslocamento inclinados (TD 2) para cada interface. Como os gráficos foram plotados da média dos gráficos (ver gráfico detalhado do TD2 no Apêndice E), eles não vão mostrar o comportamento final, só a evolução até um certo ponto de força. É possível notar que as interfaces do tipo Chave de cisalhamento (C), Tela (T) e Agregado exposto (A), denotadas de G1, obtiveram o mesmo comportamento, com uma curva linear do início ao fim do ensaio. A interface Referência (R) foi a que obteve o maior deslocamento em relação às interfaces supracitadas, ou seja, o dobro do valor. Já a interface Jato de areia (J) obteve um deslizamento parecido com o do G1, porém a carga de ruptura foi inferior as demais interfaces. Na interface Intermediária, até certo nível de força medido, o deslizamento foi inferior as demais interfaces, fato que pode ter acontecido devido a presença das fibras expostas que ajudaram a reduzir esse deslizamento.

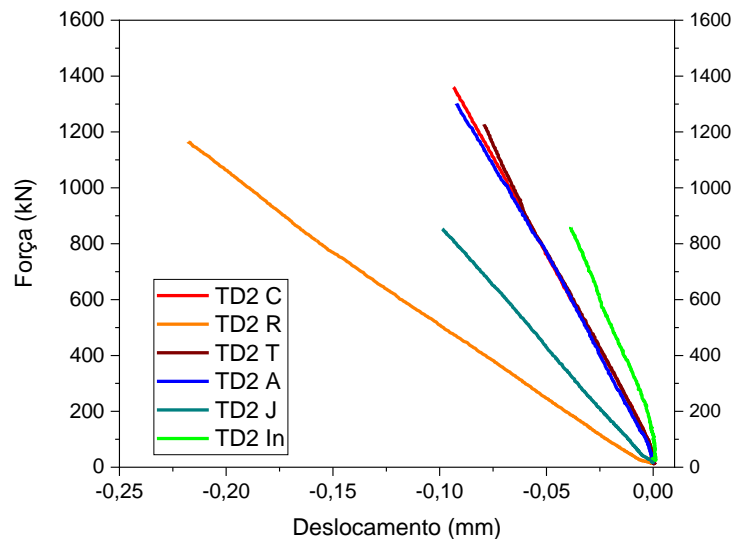


Figura 4.5.12- Curva média de força versus deslocamento do transdutor de deslocamento 2 (TD 2) das interfaces - ensaio de resistência ao cisalhamento inclinado

Os deslocamentos medidos pelo clip gage (TD3) foram baixos, conforme pode ser visto na Figura 4.5.13, na qual mostra a evolução até um certo nível de força, correspondente a curva média dos gráficos (a curva completa do TD3 para cada interface encontra-se no Apêndice E). Em todas as amostras o TD3 acusou medidas de compressão, exceto na interface Intermediária (In), pois, a ruptura não ocorreu na região onde os instrumentos foram posicionados, indicando uma movimentação diferente.

Em relação a força de ruptura, a interface que obteve menor deslocamento foi a Agregado exposto (A) e a que obteve maior deslocamento foi a Chave de cisalhamento (C). Isso indica que para essa solicitação a conformação superficial da interface C foi melhor que da interface A, haja visto que, a altura da chave é maior em relação à altura do agregado exposto, criando uma maior contribuição para resistir aos deslocamentos na direção normal. A interface Jato de areia (J) foi a que obteve um deslocamento mais acentuado desde a fase inicial de carregamento até a fase final, comportamento semelhante à interface Chave de cisalhamento (C). A interface do tipo T e R obtiveram comportamentos parecidos em relação ao deslocamento.

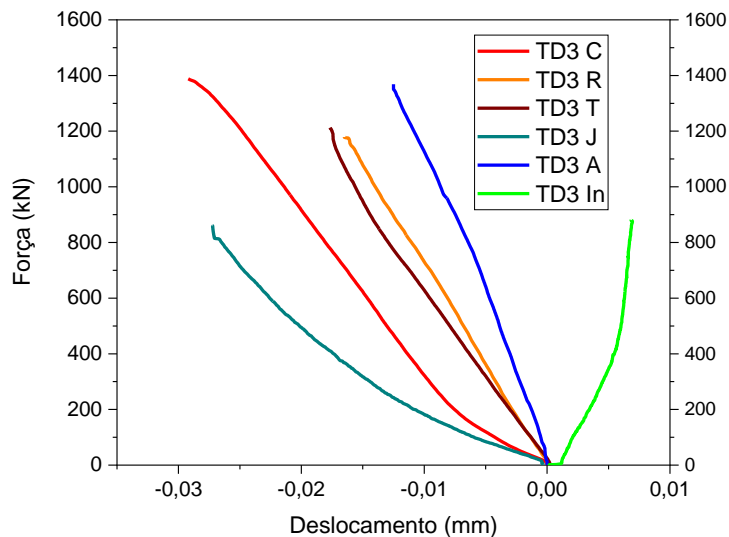


Figura 4.5.13 - Curva média de força versus deslocamento do transdutor de deslocamento 3 (TD 3) das interfaces – ensaio de resistência ao cisalhamento inclinado

Em relação as deformações obtidas pelos transdutores 1 e 4 (TD 1/4), conforme pode ser visto na Figura 4.5.14, que mostra a curva média plotada da curva dos transdutores de deslocamentos das amostras analisadas para cada interface (ver curva completa do TD1 e TD4 no Apêndice E), foi possível notar que as interfaces obtiveram comportamento linear parecido. A única interface que destoou das demais foi a Jato de areia (J), apresentado deformação elevada com carga de ruptura baixa, na qual a curva linear de deformação teve uma inclinação menor que as demais, com deformações elevadas para cargas baixas.

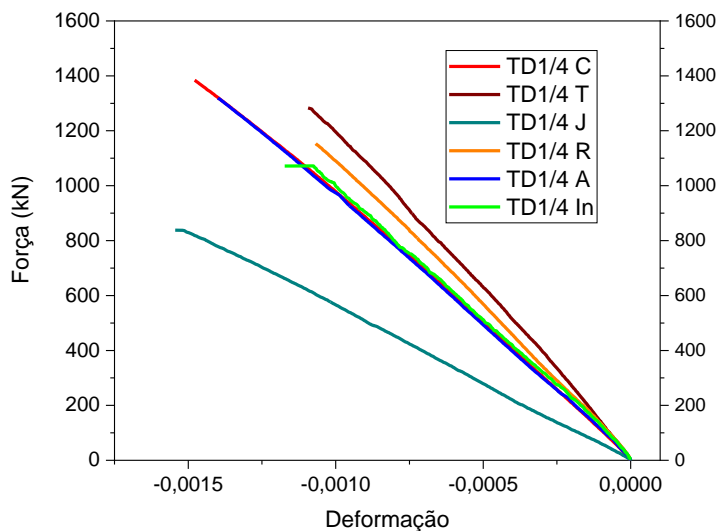


Figura 4.5.14 - Curva média de força versus deformação do transdutor de deslocamento 1 e 4 (TD 1/4) das interfaces – ensaio de resistência ao cisalhamento inclinado

A Figura 4.5.15 exibe a relação força versus deformação obtida da análise de correlação de imagem, mostrando que a interface com maior força de ruptura foi a Chave de cisalhamento. A Figura 4.5.16 mostra a curva da força média versus deformação referente a análise de imagem, na qual é possível notar semelhança de comportamento das interfaces, exceto pela interface Jato de areia.

A Figura 4.5.17 apresenta as sobreposições das curvas força versus deformação obtida da correlação da análise de imagem e dos transdutores de deslocamento. As curvas da análise de imagem não obtiveram um comportamento linear igual as dos transdutores de deslocamento, em virtude da mesma capturar distorções e acomodações existentes no corpo de prova, além de possíveis ruídos durante o registro da foto. Diferentemente ocorreu com as medições verticais realizadas pelos transdutores de deslocamento, acompanhando sempre a movimentação do corpo de prova, não medindo qualquer acomodação.

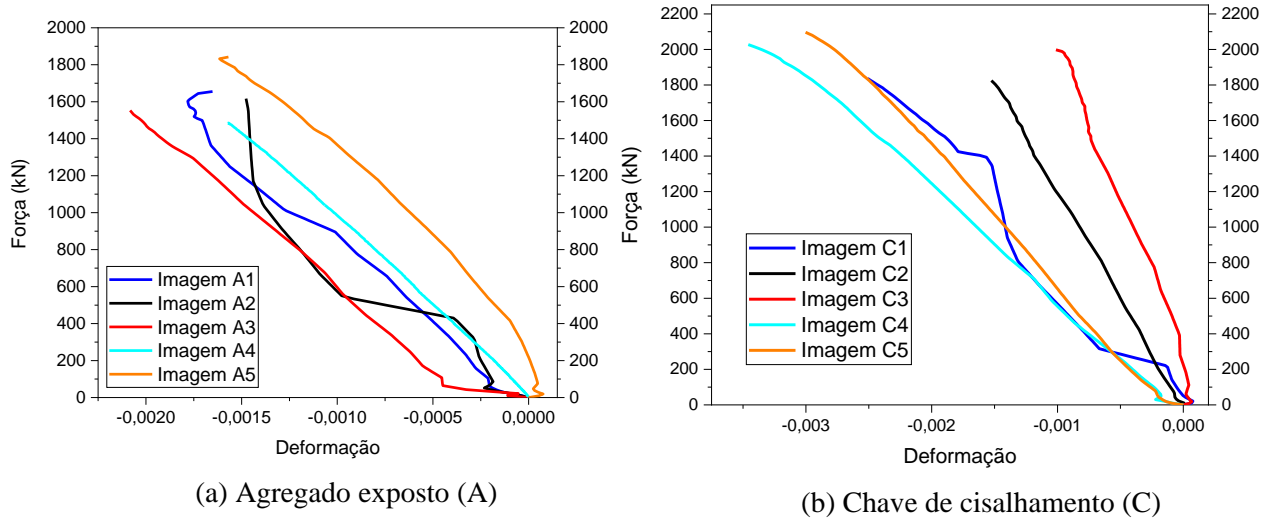


Figura 4.5.15- Curva força versus deformação da análise de correlação de imagem - Parte I. Deformação: mm/mm

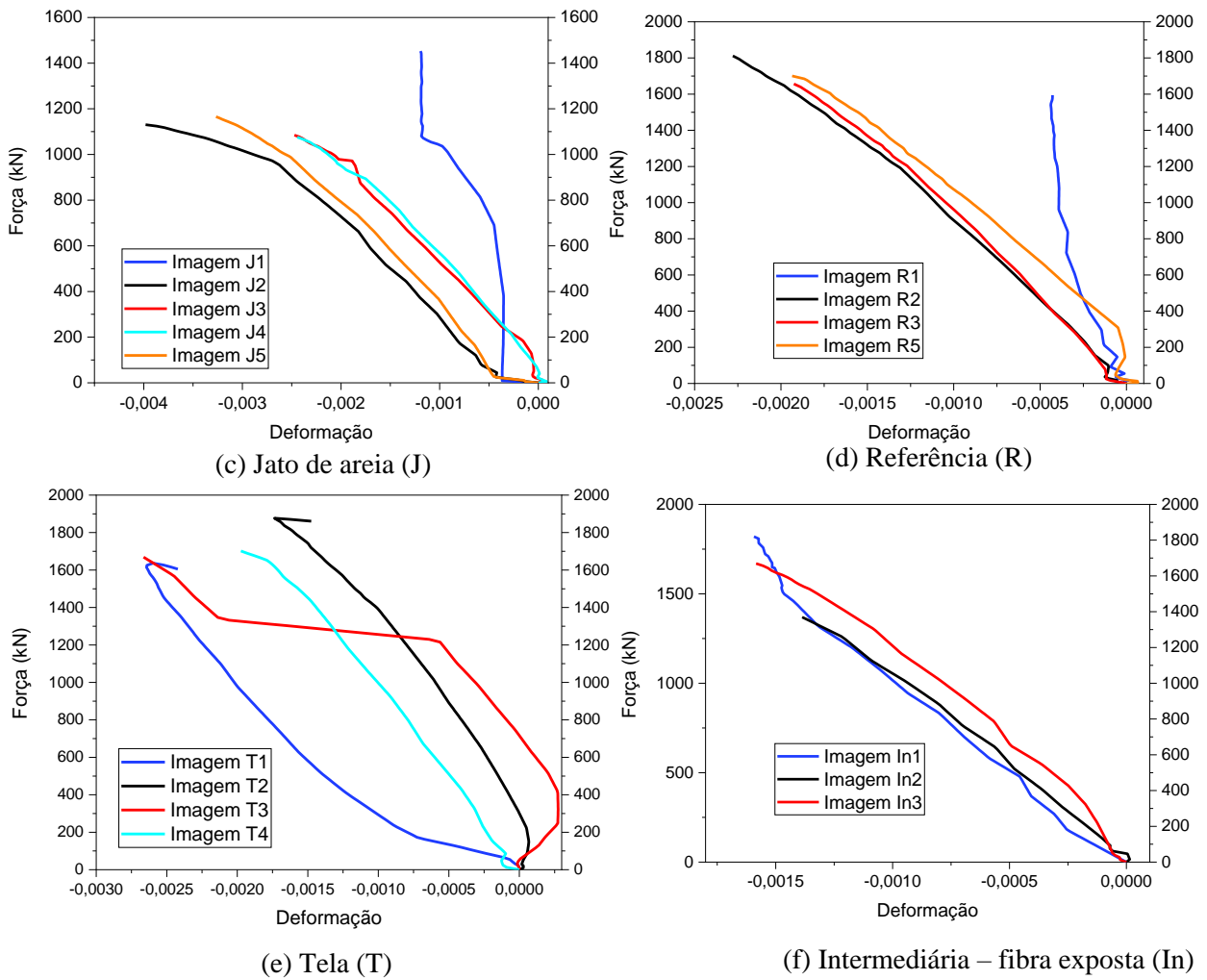


Figura 4.5.15 - Curva força versus deformação da análise de correlação de imagem - Parte II. Deformação: mm/mm

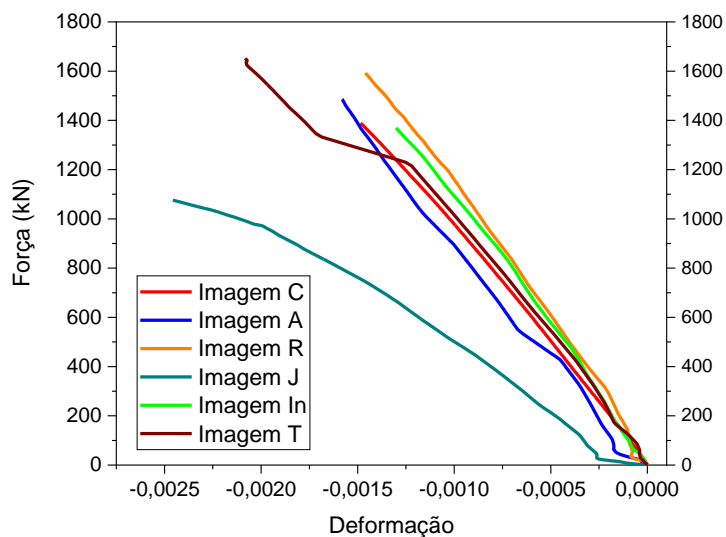


Figura 4.5.16 - Curva da força média versus deformação média da análise de imagem das interfaces - ensaio de resistência ao cisalhamento inclinado

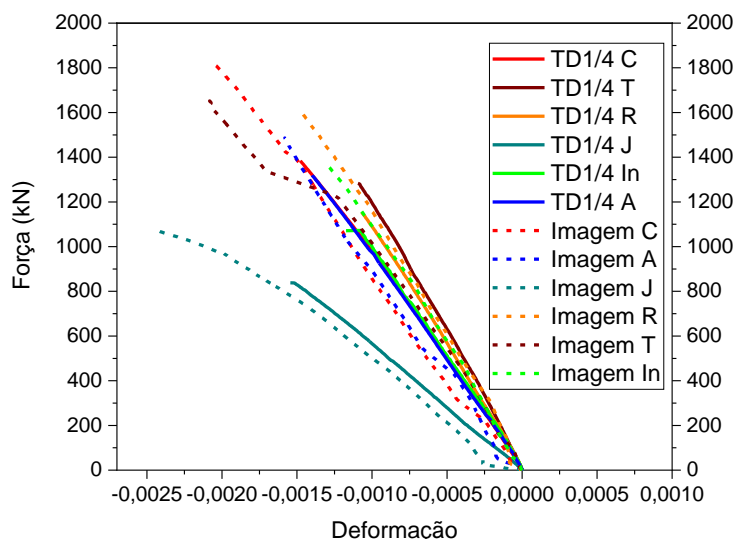


Figura 4.5.17- Curva da força média versus deformação média da análise de imagem e transdutor de deslocamento das interfaces - ensaio de resistência ao cisalhamento inclinado

A Tabela 4.5.1 apresenta os resultados médios, em ordem decrescente, das tensões de ruptura, tensões normais e tangenciais nas interfaces e suas correspondentes deformações (os resultados discriminados encontram-se no Apêndice E do trabalho). Já a Tabela 4.5.2 mostra os deslocamentos e as deformações obtidas pelos transdutores de deslocamento posicionados nas interfaces e as suas correspondentes forças (os resultados discriminados encontram-se no Apêndice E do trabalho). Diante dessas informações pode-se notar que a interface que obteve melhor resultado nesse ensaio foi a Chave de cisalhamento (C), fornecendo maiores valores de resistência e deslocamento na direção tangencial e normal, indicando um bom comportamento antes da ruptura. A interface Jato de areia (J) obteve a menor resistência, 56,2% do valor referente a interface C, o que indica que a rugosidade adquirida com esse tratamento não foi satisfatória para essa solicitação.

Os resultados apresentados na Tabela 4.5.3 mostram que não houve diferença entre as forças de ruptura para as interfaces Intermediária - fibra (In), Agregado exposto (A) e Tela (T) quando comparada à interface Referência. As interfaces Jato de areia (J) e Chave de cisalhamento (C) apresentaram valores estatísticos superiores aos limites, mostrando que há diferença significativa dos valores da força de ruptura quando comparada à interface Referência. A diferença da força de ruptura da interface Referência (R) para a interface Chave de cisalhamento foi de 18,65%, resistindo uma carga elevada em relação ao outras interfaces (Jato de areia), mesmo sem nenhum tipo de tratamento. Tal situação ocorreu em virtude do efeito cola do UHPC, criando uma adesão na interface. Essa mesma superfície foi a que obteve maior deslizamento na direção tangencial antes da sua ruptura, indicando que, mesmo tendo uma força de ruptura relativamente alta, a mesma não é ideal para ser usada.

Na Tabela 4.5.1 também é exposto o resultado da tensão de ruptura à compressão no corpo de prova monolítico CAR feito nos prismas, cujo resultado foi 78,4% menor em relação aos ensaios de ruptura à compressão nos corpos de prova 10 x 20 cm.

Considerando a relação força de ruptura obtida para os corpos de prova com interface e o corpo de prova monolítico do CAR, é possível encontrar os seguintes coeficientes, relacionado à transferência adesiva e mecânica, em ordem decrescente de resistência: C = 1,24; T = 1,10; A = 1,10; R = 1,0; In = 0,99; J = 0,7.

Tabela 4.5.1 - Valores médios de tensão de ruptura, tensão normal, tensão de cisalhamento e deformações das interfaces

Interface (desvio padrão - S)	$F_{ruptura}$ (kN)	σ_0 (N / mm ²)	τ_{ultima} (N / mm ²)	σ_N (N / mm ²)	ε Correli
C	1998,32	88,81	38,45	22,20	0,0023
(S)	102,16	4,54	1,97	1,14	0,001
T	1768,02	78,57	34,02	19,64	0,0022
(S)	126,69	5,63	2,44	1,41	0,0004
A	1761,4	78,28	33,89	19,57	0,0019
(S)	102,35	4,55	1,97	1,14	0,0004
R	1625,7	72,25	31,28	18,06	0,0017
(S)	174,06	7,74	3,35	1,93	0,0007
In	1582,03	70,31	30,44	17,57	0,0015
(S)	217,7	9,68	4,19	2,42	0,0001
J	1122,74	49,90	21,60	12,47	0,0027
(S)	36,74	1,63	0,70	0,41	0,001
CAR	1605,2	71,34	-	-	

Tabela 4.5.2- Valores médios de força e suas correspondentes medições dos transdutores de deslocamento

Interface (desvio padrão - S)	F TD	TD 2 (mm)	TD 3 (mm)	ε TD 1/4
C	1421,98	0,1	0,034	-0,0015
(S)	41,7	0,038	0,017	0,00009
T	1375,16	0,095	0,019	-0,0014
(S)	136,5	0,076	0,007	0,00039
A	1449,02	0,152	0,014	-0,0016
(S)	65,82	0,031	0,007	0,0001
R	1200,32	0,222	0,016	-0,0012
(S)	20,72	0,2	0,004	0,0003
In	1433,77	0,060	0,016	-0,0016
(S)	91,65	0,015	0,014	0,0001
J	970,57	0,096	0,027	-0,0018
(S)	35,84	0,033	0,034	0,0004

Tabela 4.5.3 - Teste-t considerando interface Referência presumindo variâncias equivalentes com erro de 5% - resistência ao cisalhamento inclinado

Interface	F _{ruptura} (kN)	Desvio padrão (S)	Stat t	P (T ≤ t) bi-caudal	t crítico bi-caudal
Referência (R)	1625,70	174,06	-	-	-
Intermediária - fibra (In)	1582,03	217,7	0,87	0,43	2,78
Agregado exposto (A)	1761,4	102,35	-1,38	0,23	2,57
Tela de aço expandida (T)	1768,02	126,69	-1,35	0,23	2,57
Jato de areia (J)	1122,74	36,74	4,07	0,02	2,78
Chave de cisalhamento (C)	1998,32	102,16	-2,91	0,03	2,57

A Figura 4.5.18 - 4.5.26 apresenta as imagens das deformações dos corpos de prova, obtida da análise da correlação de imagem, imediatamente antes da ruptura dos mesmos. De modo geral pode-se notar que as deformações ficaram concentradas no CAR, posicionado na região inferior das imagens. Tal situação é evidenciada nos corpos de prova que romperam nesse concreto e não na interface, como pode ser visto na interface Agregado exposto, Jato de areia e Tela. Em relação à interface Chave de cisalhamento observa-se uma maior deformação no CAR para os corpos de prova com ruptura na interface, indicando uma mobilização da interface. Também nas imagens observou-

se algumas fissuras que abrem no CAR, mas, de modo geral, não foi possível ter uma boa visualização da ruptura na interface.

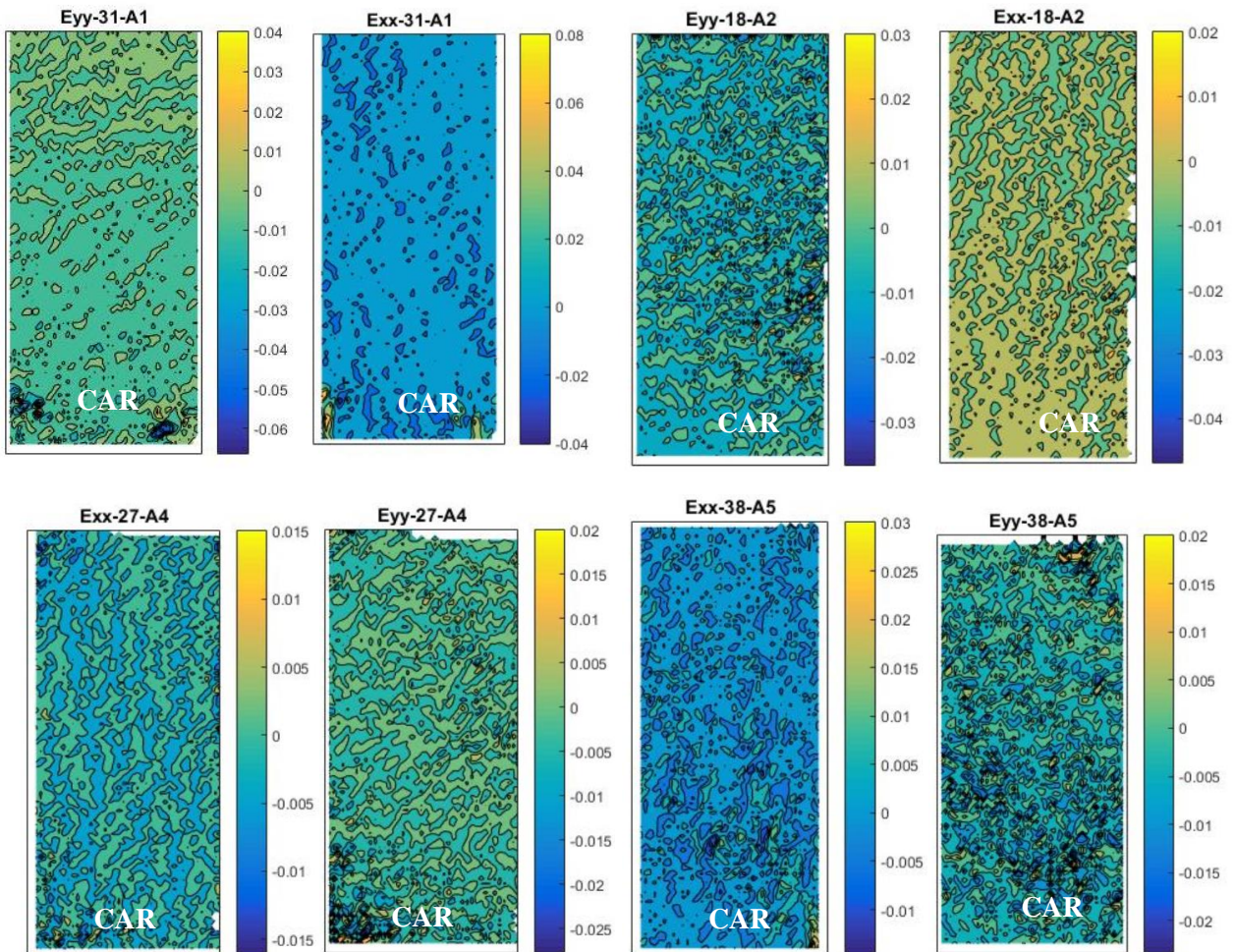


Figura 4.5.18- Imagem das deformações dos corpos de prova com a interface Agregado exposto (A) que romperam no CAR. Deformação: mm/mm

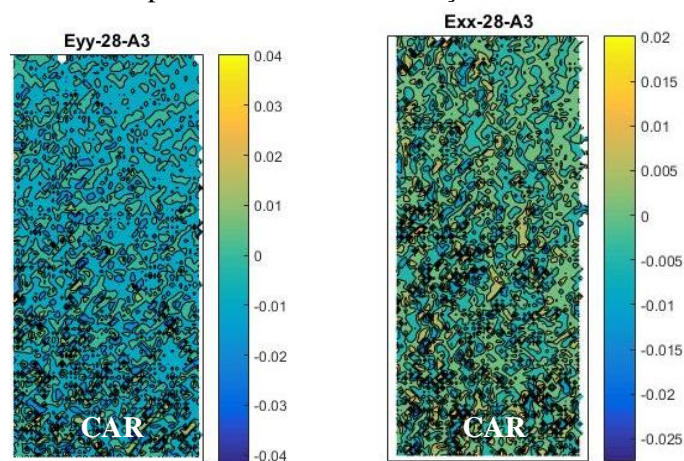


Figura 4.5.19- Imagem das deformações dos corpos de prova que romperam na interface Agregado exposto (A). Deformação: mm/mm

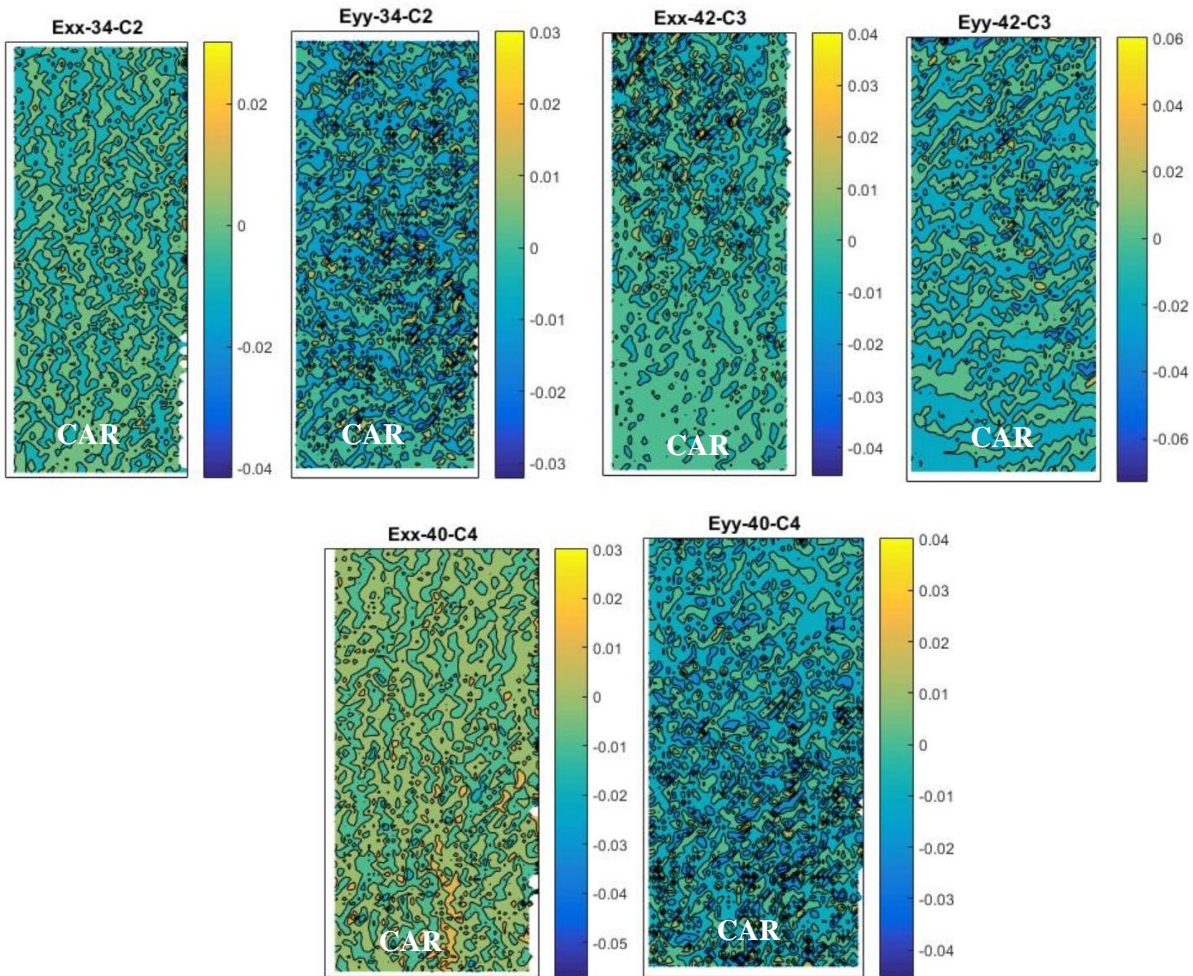


Figura 4.5.20 - Imagem das deformações dos corpos de prova com a interface Chave de cisalhamento (C) que romperam no CAR. Deformação: mm/mm

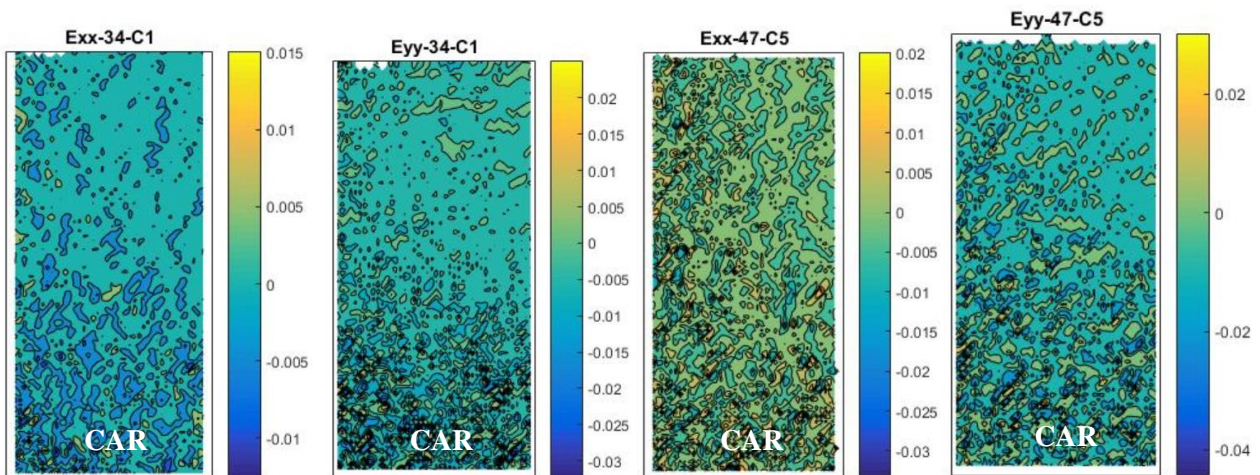


Figura 4.5.21 - Imagem das deformações dos corpos de prova que romperam na interface Chave de cisalhamento (C). Deformação: mm/mm

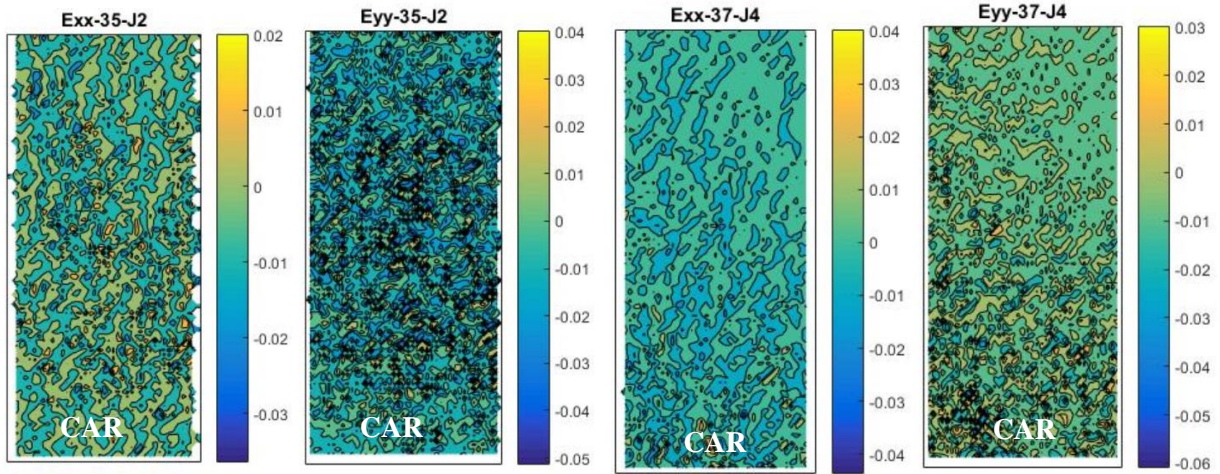


Figura 4.5.22 - Imagem das deformações dos corpos de prova com a interface Jato de areia (J) que rompeu no CAR. Deformação: mm/mm

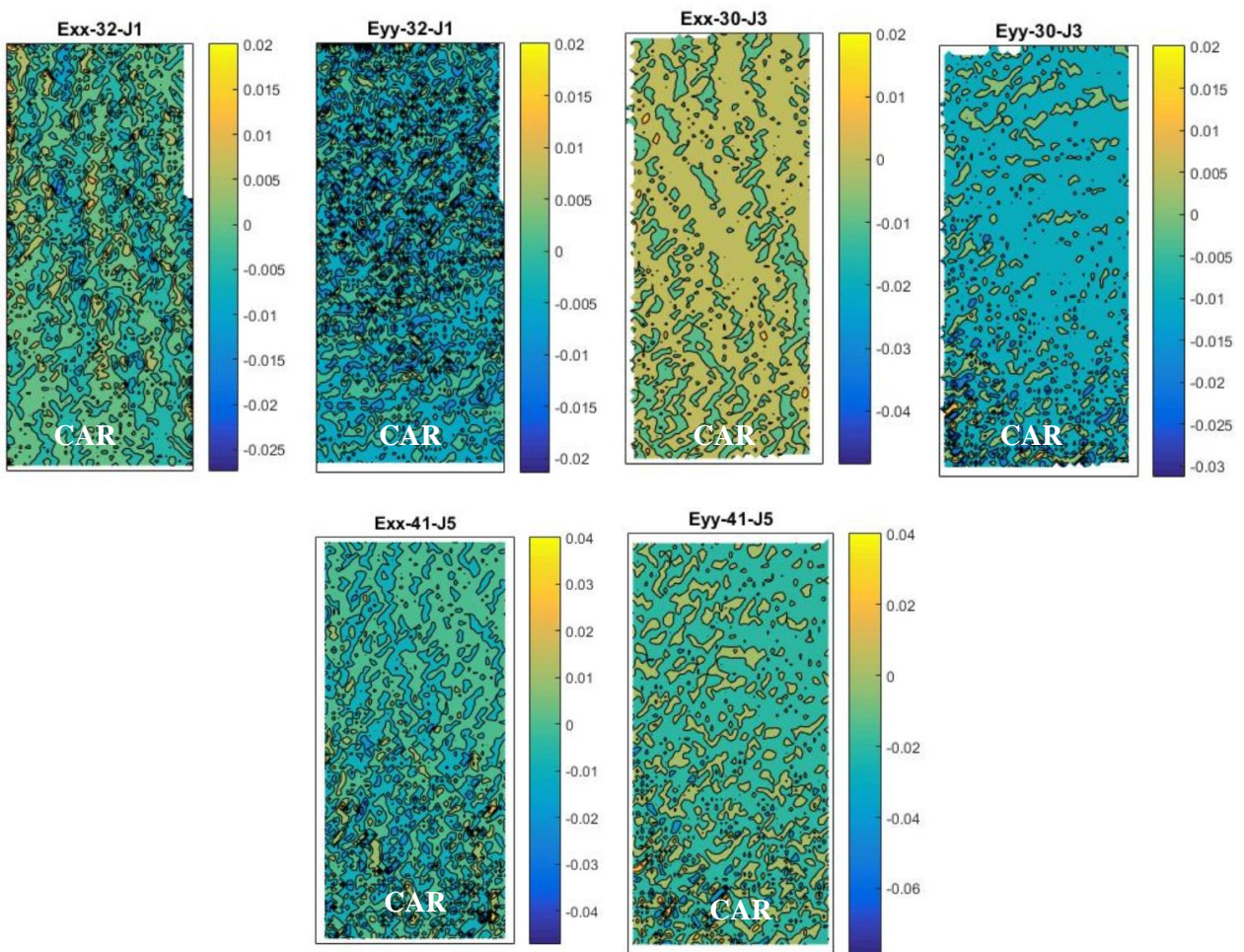


Figura 4.5.23 - Imagem das deformações dos corpos de prova que romperam na interface Jato de areia (J). Deformação: mm/mm

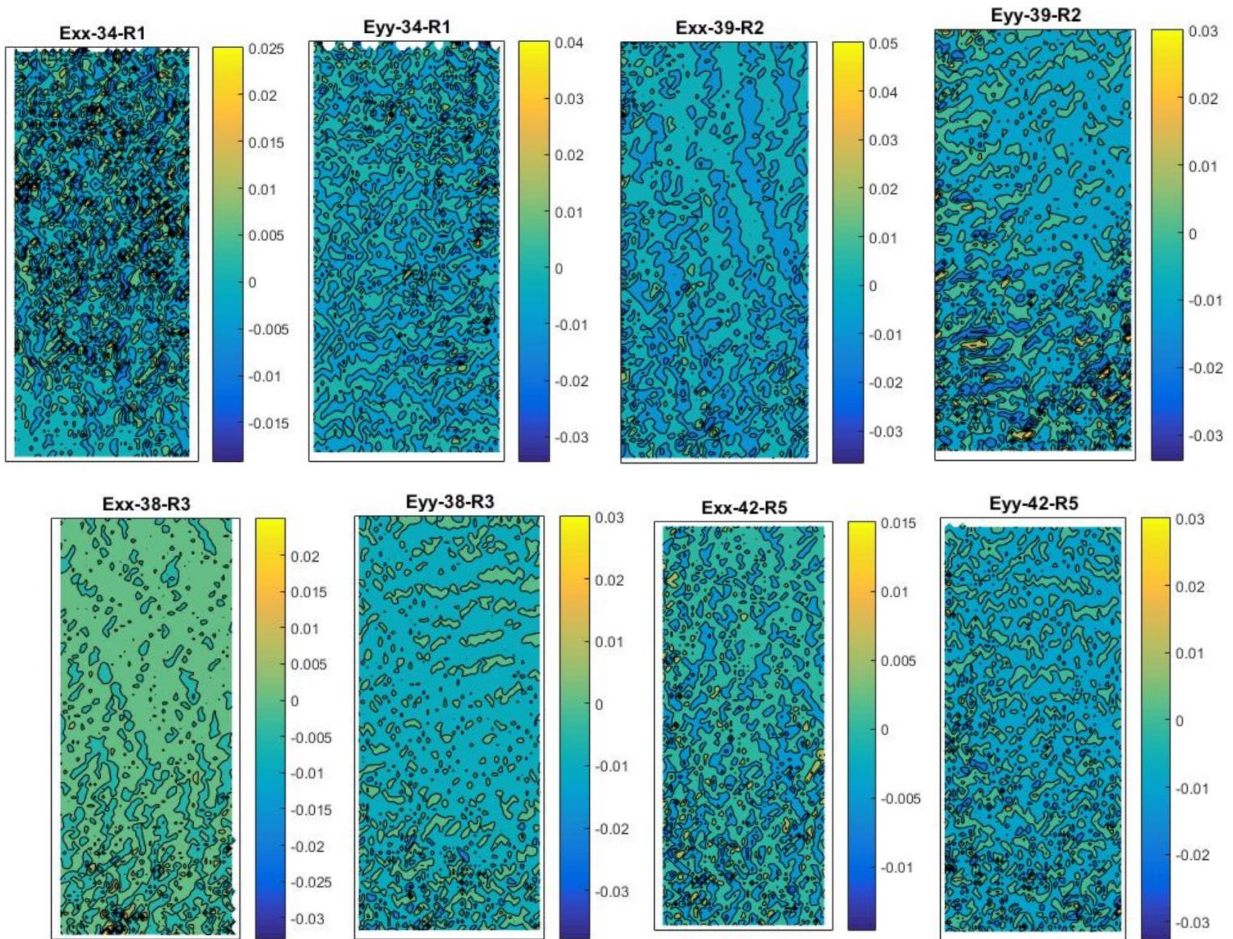


Figura 4.5.24 - Imagem das deformações dos corpos de prova que romperam na interface Referência (R). Deformação: mm/mm

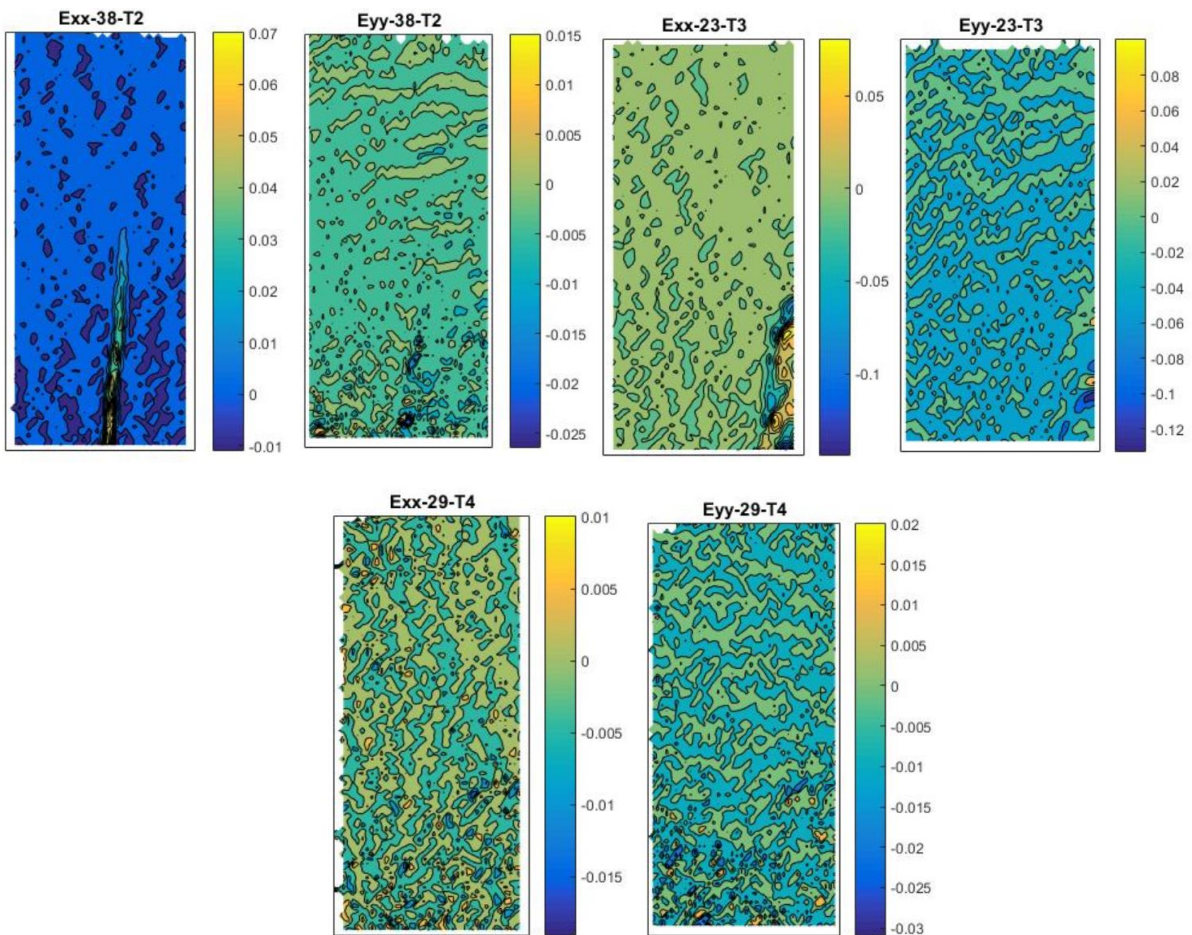


Figura 4.5.25 - Imagem das deformações dos corpos de prova com a interface Tela (T) que rompeu no CAR. Deformação: mm/mm

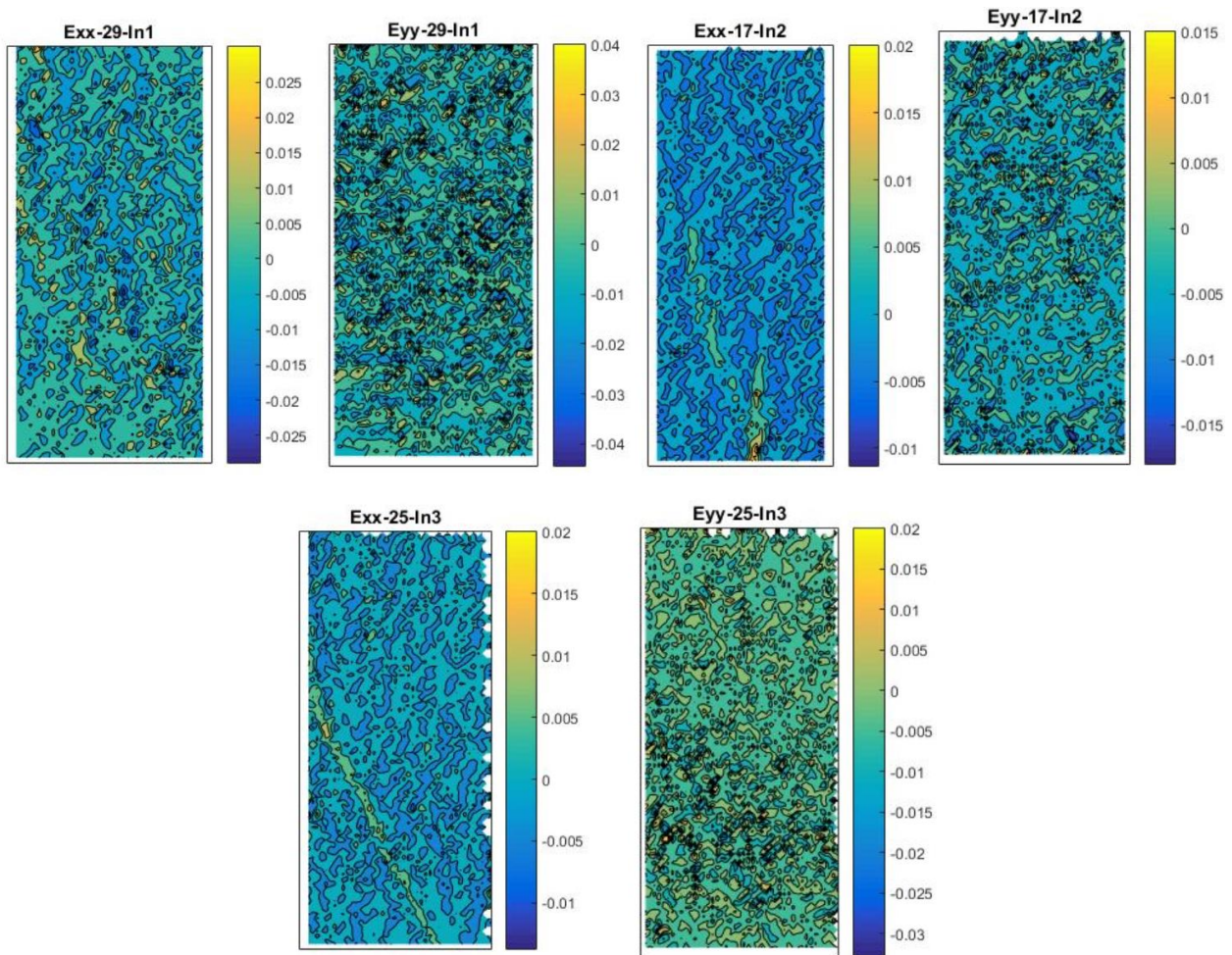


Figura 4.5.26 - Imagem das deformações dos corpos de prova que que romperam na interface Intermediária (In). Deformação: mm/mm

4.6 Resistência a tração por compressão diametral

Sobre o tipo de ruptura do ensaio de resistência à tração por compressão diametral, na qual as imagens estão apresentadas na Figura 4.6.1 – 4.6.9, todos os corpos de prova romperam na interface. Na interface Agregado exposto (A) houve lascamento do CAR e o mesmo ficou aderido ao UHPC, mas também houve fragmentação do UHPC que ficou aderido no CAR (Figura 4.6.1). Nos corpos de prova com interface Chave de cisalhamento (C), a ruptura da interface ocorreu com a quebra das chaves na superfície do CAR que ficou aderida ao UHPC, conforme pode ser visto na Figura 4.6.2. A ruptura das chaves de cisalhamento no CAR indica adesão elevada na interface e uma parcela da força de compressão atuando durante a execução do ensaio. Na interface Tela (T), Referência (R) e Jato de areia (J), houve quebra parcial do CAR e o mesmo ficou aderido ao UHPC.

Em relação as interfaces Intermediária – fibra (In), Intermediária – monolítico (I) e corpo de prova monolítico UHPC, após a força de ruptura não houve separação das partes do corpo de prova.

Na interface In e no corpo de prova monolítico UHPC, as fibras auxiliaram na união das peças após a ruptura e, na interface I, a presença da tela garantiu a ligação das duas partes.

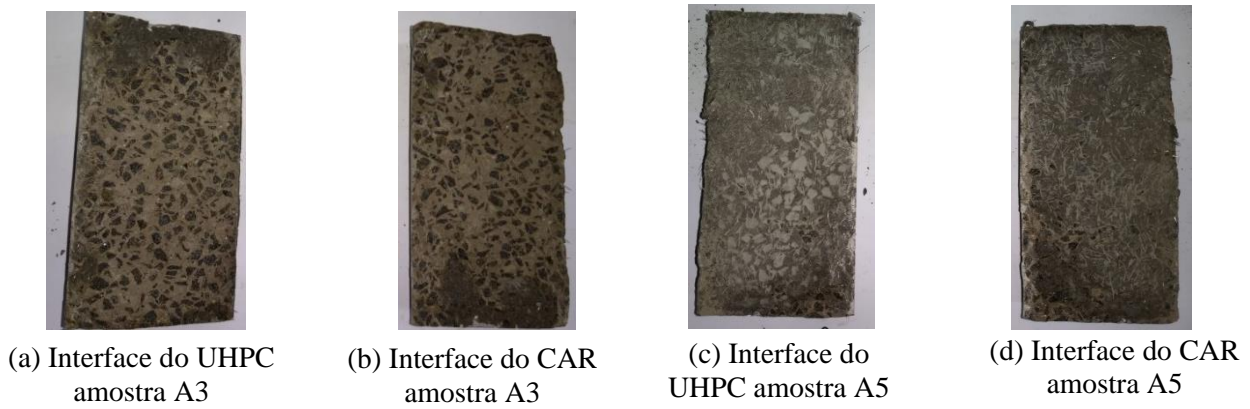


Figura 4.6.1- Imagem típica da interface Agregado exposto (A) após a ruptura

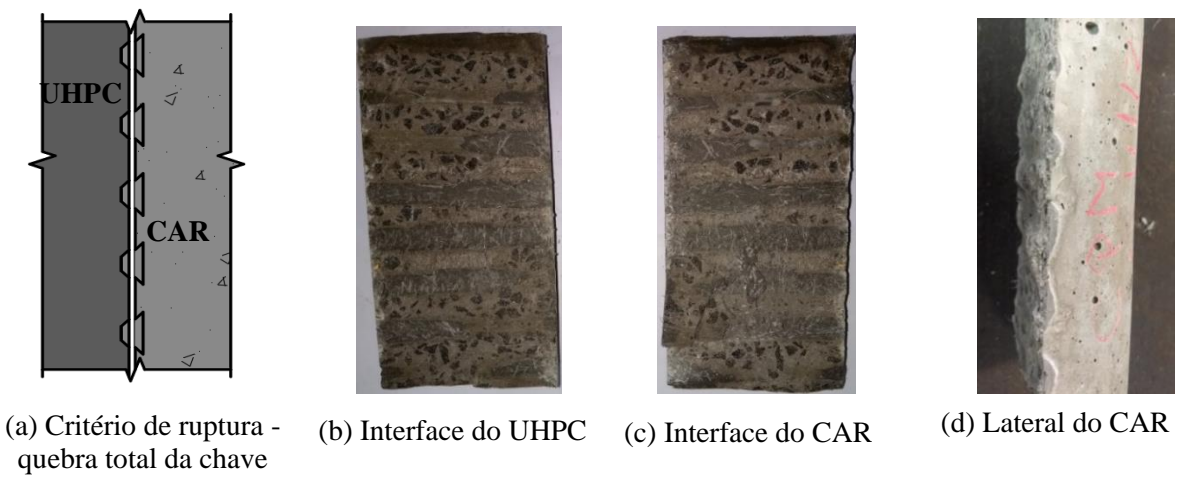


Figura 4.6.2 - Imagem típico da interface Chave de cisalhamento (C) após a ruptura

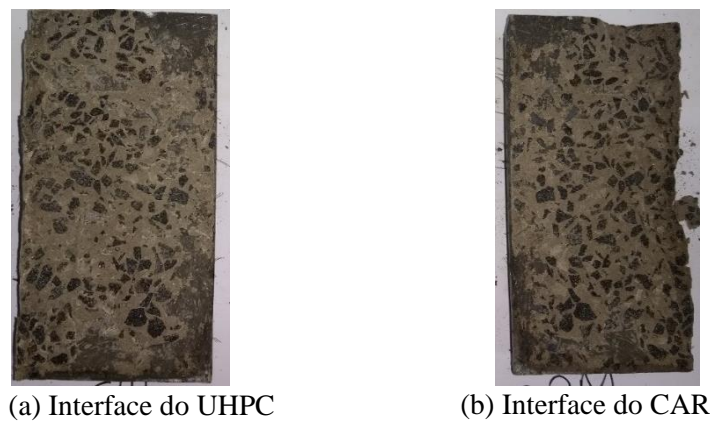


Figura 4.6.3 - Imagem típica da interface Jato de areia (J) após a ruptura



(a) Interface do UHPC



(b) Interface do CAR

Figura 4.6.4 - Imagem típica da interface Referência (R) após a ruptura



(a) Interface do UHPC



(b) Interface do CAR

Figura 4.6.5 - Imagem típica da interface Tela (T) após a ruptura



(a) Corpo de prova após a ruptura



(b) Interface do UHPC



(c) Interface do CAR

Figura 4.6.6 - Imagem típica da interface Intermediária - fibra (In) após a ruptura



(a) Corpo de prova após a ruptura



(b) Amostra separada

Figura 4.6.7 - Imagem típica da interface Intermediária - monolítico (I) após a ruptura



Figura 4.6.8 - Imagem típica do corpo de prova monolítico CAR após a ruptura



(a) Corpo de prova após a ruptura



(b) Corpo de prova rompido

Figura 4.6.9 - Imagem típica do corpo de prova monolítico UHPC após a ruptura

A Figura 4.6.10 apresenta a curva força versus deslocamento da média dos transdutores de deslocamento, no trecho ascendente, para as interfaces (a curva completa encontra-se no Apêndice E) e a Figura 4.6.11 mostra a curva média das interfaces, na qual é possível verificar que as amostras obtiveram um comportamento bem semelhante para esse ensaio na fase inicial da força aplicada. Em relação ao comportamento tendendo para a força de ruptura foi possível notar que as amostras

com Jato de areia (J) e Chave de cisalhamento (C) destoraram das demais, pois, enquanto as outras obtiveram uma suavização na curva na fase final, essas mantiveram uma linearização da curva, ou seja, não apresentaram nenhum aviso prévio de ruptura.

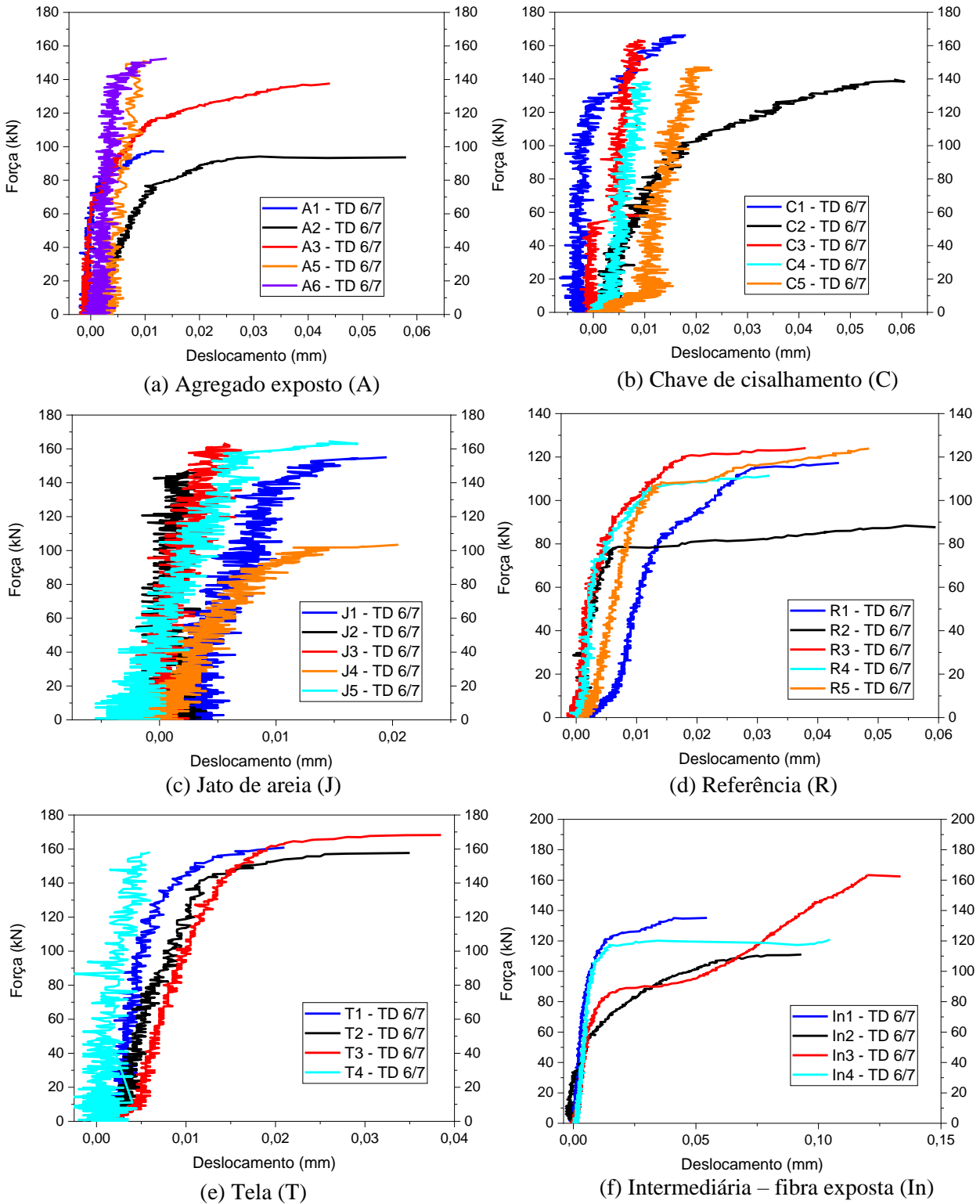
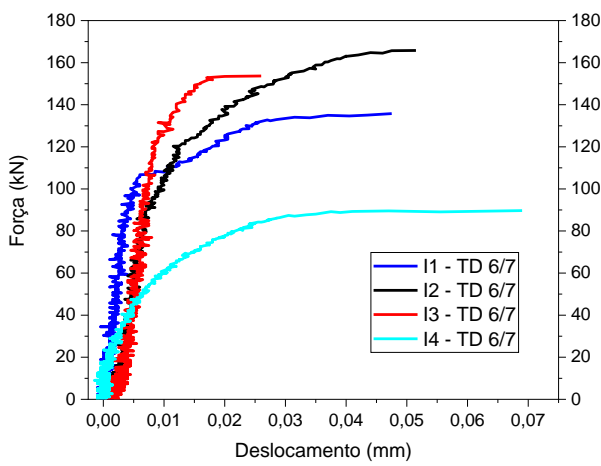
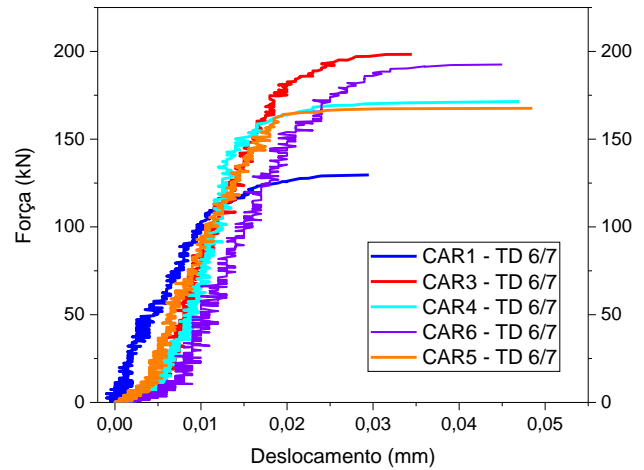


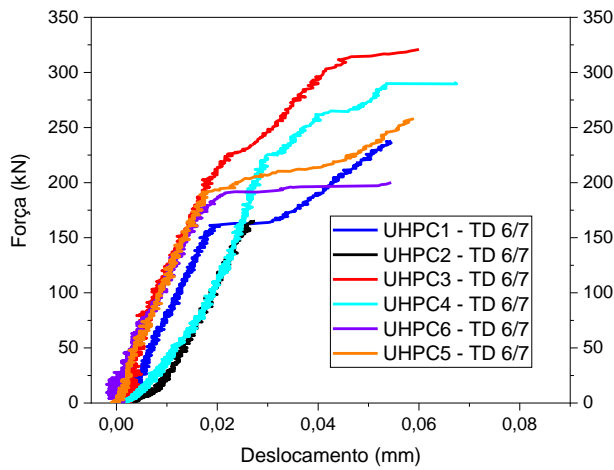
Figura 4.6.10 - Curva força versus deslocamento da média dos transdutores de deslocamento - Parte I



(f) Intermediária – monolítico (I)



(g) CAR



(h) UHPC

Figura 4.6.10 - Curva força versus deslocamento da média dos transdutores de deslocamento -parte II

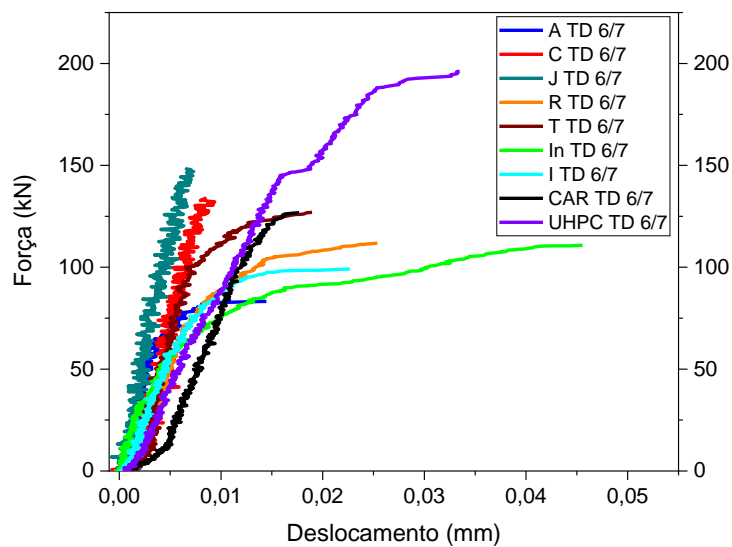


Figura 4.6.11- Curva da força média versus deslocamento médio dos transdutores de deslocamentos para cada interface

Os resultados médios, em ordem decrescente de força de ruptura para cada interface estudada são mostrados na Tabela 4.6.1 (os resultados discriminados encontram-se no Apêndice F do trabalho). A interface Tela (T) foi a que obteve maior resistência à tração por compressão diametral, com um resultado bem próximo ao do corpo de prova monolítico CAR, o que indica que a interface teve um bom comportamento. A interface que obteve menor resistência foi a Referência (R), ou seja, 73,42% do valor referente à interface T, porém os deslocamentos medidos pelos transdutores foram iguais aos valores medidos no corpo de prova monolítico CAR, indicando que houve o efeito cola do UHPC na superfície lisa. Como essa interface foi totalmente lisa, só houve contribuição da transferência de esforços por adesão, por isso que o resultado de força de ruptura foi menor em relação as outras interfaces.

Os resultados apresentados na Tabela 4.6.2 mostram que não houve diferença entre as forças de ruptura para as interfaces Intermediária-fibra (In), Intermediário – monolítico (I) e Agregado exposto (A) quando comparada à interface Referência. A interface Intermediária – fibra (In) obteve uma força de ruptura igual à da interface T, porém quando a mesma atingiu a força de ruptura já havia fissurado, pois a força de primeira fissura foi menor em relação à força de ruptura. Tal situação ocorreu nessa interface porque a presença das fibras ajudou a aumentar a aderência e a obter um ganho de força após a primeira fissuração, fato que pode ser visto nas medições dos transdutores de deslocamentos, na qual a interface In obteve o maior deslocamento das interfaces estudadas.

As interfaces Chave (C), Jato de areia (J) e Tela (T) apresentaram valores estatísticos superiores aos limites (Tabela 4.6.2), mostrando que houve diferença significativa dos valores para a força de ruptura quando comparada à interface Referência.

Considerando a relação resistência a tração por compressão diametral obtida para os corpos de prova com interface e o corpo de prova monolítico do CAR, é possível encontrar os seguintes coeficientes, relacionado à transferência adesiva, em ordem decrescente de resistência: $T = 0,94$; $J = 0,92$; $C = 0,88$; $I = 0,79$; $In = 0,77$; $A = 0,73$; $R = 0,69$.

Tabela 4.6.1 - Valores médios da força de primeira fissura, força de ruptura, resistência à tração diametral e suas correspondentes medições dos transdutores de deslocamento para as interfaces

Interface (desvio padrão - S)	F _{primeira fissura} (kN)	f _{ct,sp} (MPa)	TD 6/7 (mm)	F _{ruptura} (kN)	f _{ct,sp} (MPa)	TD 6/7 (mm)
T	162,31	5,16	0,024	162,31	5,16	0,024
(S)	4,91	0,156	0,015	4,91	0,156	0,015
J	157,52	5,01	0,012	157,52	5,01	0,012
(S)	8,18	0,8	0,008	8,18	0,8	0,008
C	150,84	4,80	0,013	150,84	4,80	0,013
(S)	13,17	0,42	0,006	13,17	0,42	0,006
I	136,22	4,33	0,048	136,22	4,33	0,048
(S)	33,38	1,06	0,018	33,38	1,06	0,018
In	132,23	4,20	0,096	162,62	5,17	0,357
(S)	22,45	0,72	0,033	29,99	0,95	0,077
A	126,36	4,02	0,027	135,22	4,30	0,192
(S)	28,94	0,92	0,022	23,93	0,76	0,18
R	119,18	3,79	0,040	119,18	3,79	0,040
(S)	6,074	0,19	0,007	6,074	0,19	0,007
UHPC	261,56	8,32	0,059	541,95	17,25	0,744
(S)	46,79	1,5	0,005	170,49	5,43	0,4
CAR	171,89	5,47	0,040	171,89	5,47	0,040
(S)	27,07	0,86	0,008	27,07	0,86	0,008

Tabela 4.6.2 - Teste-t considerando interface Referência presumindo variâncias equivalentes com erro de 5% - resistência à tração por compressão diametral

Interface	F _{ruptura} (kN)	desvio padrão (S)	Stat t	P(T<=t) bi-caudal	t crítico bi-caudal
Referência (R)	119,18	6,07	-	-	-
Intermediária – fibra (In)	132,23	22,45	-0,70	0,52	2,78
Intermediária - monolítico (I)	136,22	33,38	-0,69	0,53	2,78
Agregado exposto (A)	126,37	28,94	-0,83	0,44	2,57
Chave de cisalhamento (C)	150,84	13,17	-3,54	0,02	2,57
Jato de areia (J)	157,52	8,18	-5,47	0,01	2,78
Tela de aço expandida (T)	162,32	4,91	-8,89	0,00	2,57

5 CORRELAÇÃO DE RESULTADOS

5.1 Correlação da rugosidade com as resistências

Nas superfícies que foram feitas as medições da rugosidade: Agregado exposto (A), Jato de areia (J), Tela (T) e Referência (R) foram correlacionados os resultados dos parâmetros de rugosidade (R_z) com os resultados dos ensaios de resistência, conforme apresentado na Figura 5.1.1.

Os resultados obtidos dos ensaios de resistência à tração na flexão ($f_{ct,f}$), cisalhamento direto (τ_{ultima}), cisalhamento inclinado (σ_n e τ_n) e tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$) não mostraram um aumento diretamente proporcional ao parâmetro de rugosidade R_z (Figura 5.1.1). Em relação à interface R, o valor encontrado para o R_z foi de 0,05, sendo o menor de todas as interfaces medidas. Entretanto os valores alcançados de $f_{ct,f}$, τ_{ultima} , $f_{ct,sp}$, σ_n e τ_n não desviaram dos resultados das outras interfaces, Tela (T) e Agregado exposto (A), com os maiores valores de R_z , 2,14 e 1,52 respectivamente.

Ao analisar a correlação dos resultados de resistência à tração na flexão e cisalhamento inclinado para as interfaces, R, A e T, os valores podem ser considerados iguais, mostrando que a rugosidade da superfície no CAR, quando associado ao UHPC, não contribuiu nessas solicitações. Nas respostas obtidas do ensaio de resistência ao cisalhamento direto, pode-se dizer que o valor de R_z teve influência, pois as interfaces Tela (T), Jato de areia (J) e Agregado exposto (A) apresentaram valores maiores em relação à interface R, 14,5%, 16,9% e 27% respectivamente, mostrando que para esse ensaio a rugosidade teve contribuição na força de ruptura.

Os resultados encontrados de resistência à tração por compressão diametral foram iguais nas interfaces R e A, no entanto o valor de R_z para a interface A foi trinta vezes maior que a interface R. Já a interface T, que apresentou o melhor valor de R_z , obteve a maior resistência, no entanto, quando comparado à interface A, a diferença do R_z foi de 29% e da força de ruptura de 22,2%.

Na interface J, cujo R_z foi igual a 0,64, verificou-se que os valores de $f_{ct,f}$, σ_n e τ_n foram inferiores às outras interfaces estudadas. Também para essa interface não foi obtido nenhum valor de resistência igual à da interface Referência em todos os ensaios realizados, mostrando que realmente não há correlação da resistência com a rugosidade.

Para as interfaces que não foram efetuadas as medições da rugosidade, a Figura 5.1.2 apresenta os resultados em relação à interface Referência. Comparando os valores de resistência dos ensaios realizados da interface Intermediária - fibra (In) e Referência (R), pode-se dizer que são iguais, o que indica que a presença das fibras expostas não influenciou no valor da resistência, mas sim no comportamento pós-pico. Em relação a resistência ao cisalhamento direto, as interfaces

Referência (R), Chave de cisalhamento (C), Intermediária - monolítico (I) e Intermediária - fibra (In) podem ser consideradas com o mesmo valor, mesmo com rugosidades diferentes.

Para o ensaio de resistência ao cisalhamento inclinado e tração na flexão, as interfaces Referência (R) e Chave de cisalhamento (C) destoaram dos resultados (Figura 5.1.2). No ensaio de resistência à tração na flexão, a resistência da interface R foi o dobro do valor da interface C e, no ensaio de resistência ao cisalhamento inclinado, a resistência da interface R foi 0,8 do valor da interface C, mesmo a interface R tendo R_z mínimo.

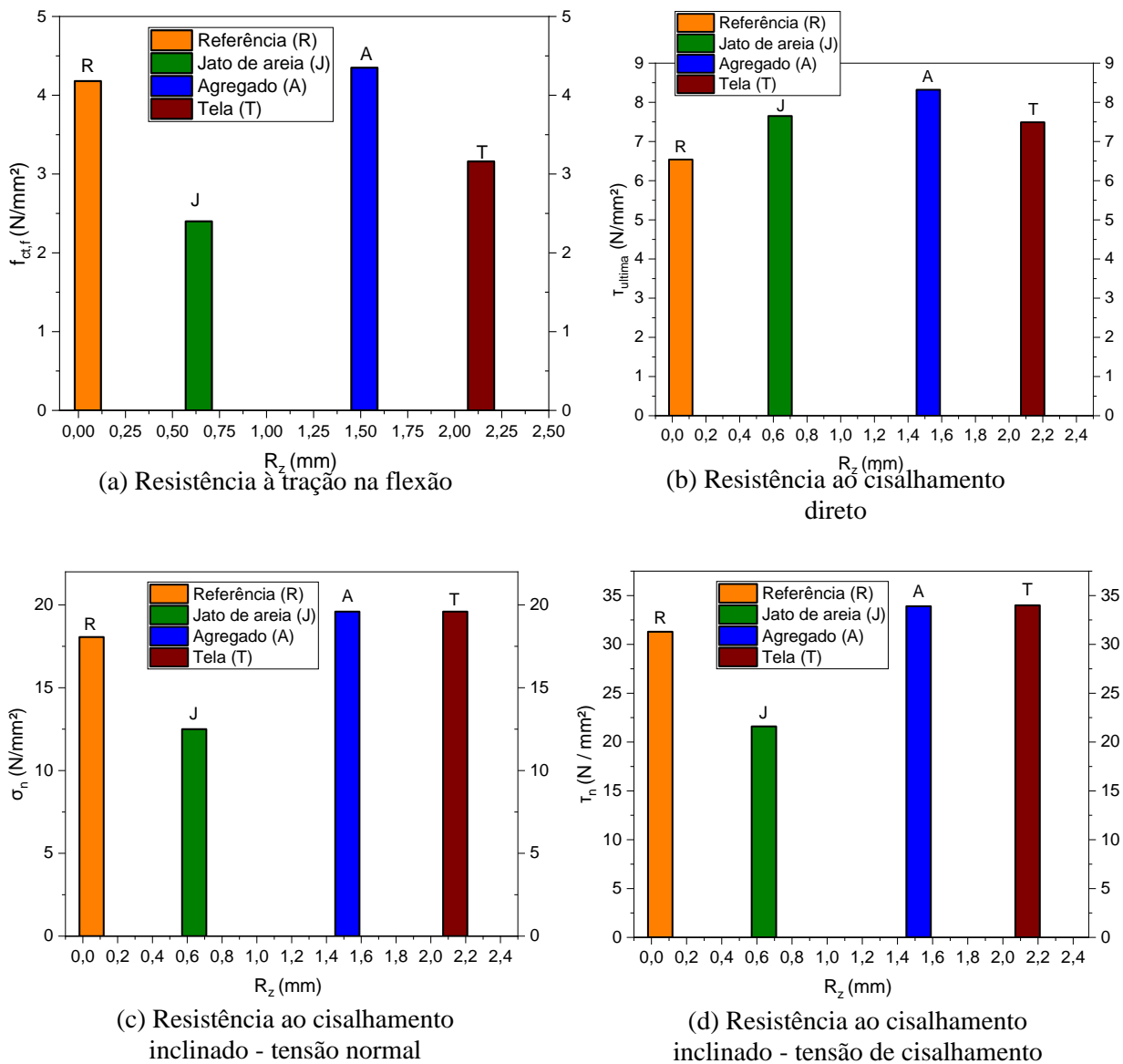
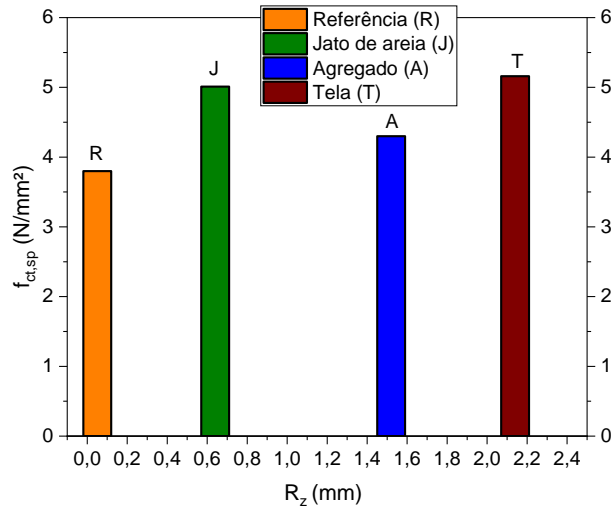
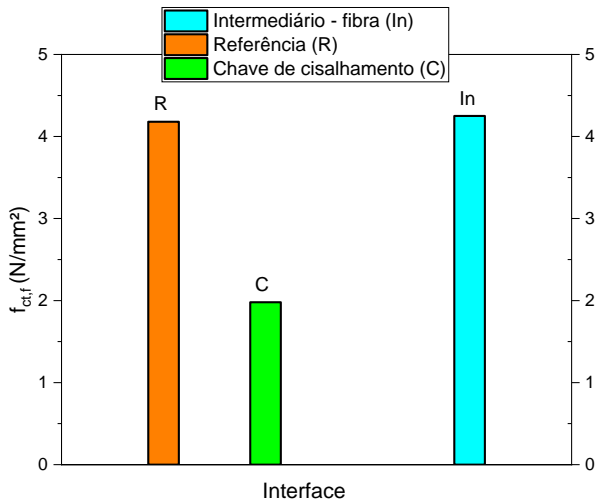


Figura 5.1.1 - Curva resistência versus rugosidade das interfaces - Parte I

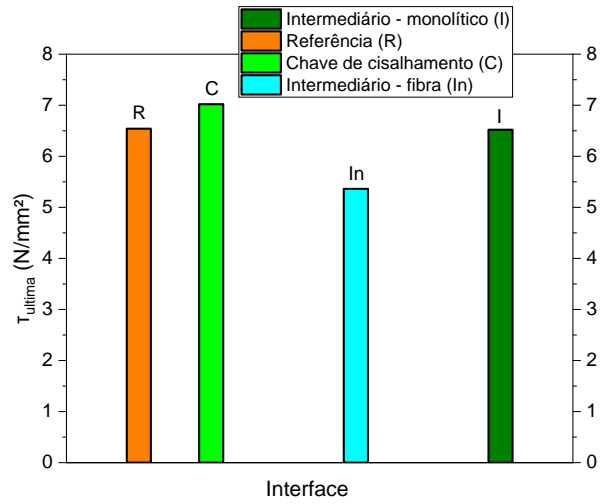


(e) Resistência à tração por compressão diametral

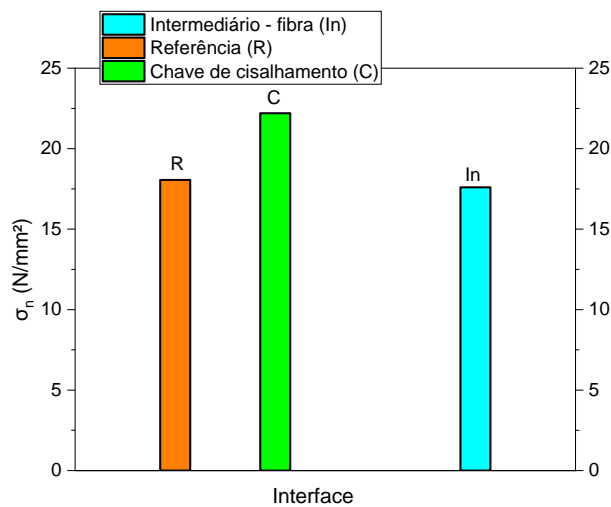
Figura 5.1.1 - Curva resistência versus rugosidade das interfaces - Parte II



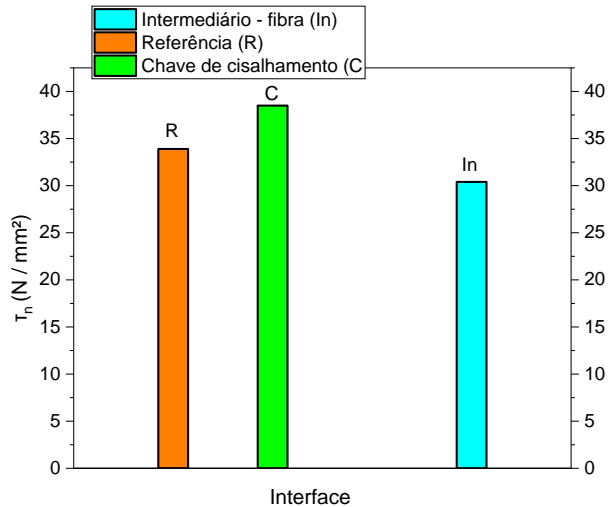
(a) Resistência à tração na flexão



(b) Resistência ao cisalhamento direto

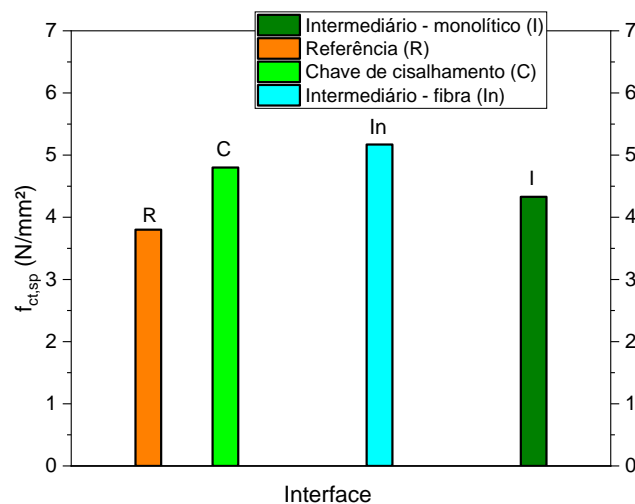


(c) Resistência ao cisalhamento inclinado - tensão normal



(c) Resistência ao cisalhamento inclinado - tensão de cisalhamento

Figura 5.1.2 - Curva resistência versus interface sem medição da rugosidade – Parte I



(c) Resistência à tração por compressão diametral.
Para a interface In foi considerada $F_{primeira\ fissura}$

Figura 5.1.2- Curva resistência versus interface sem medição da rugosidade – Parte II

Os resultados obtidos da correlação dos parâmetros de rugosidade com a resistência na interface do CAR e UHPC discordam da correlação proposta por Santos e Julio (2007), que estudaram a associação de concretos com propriedades iguais. Os autores obtiveram resistência da interface elevada conforme o parâmetro de rugosidade aumentava. Essa correlação não foi possível na aderência do CAR e UHPC pelo fato dos concretos possuírem propriedades distintas, na qual o UHPC possui uma maior plasticidade em relação ao CAR, funcionando como uma cola e gerando maior adesão, independente da rugosidade superficial na qual o mesmo é aderido. No entanto, para algumas solicitações, a rugosidade obteve contribuição.

Analisando de modo geral, as interfaces que obtiveram o parâmetro de rugosidade R_z elevado apresentaram maiores valores de resistência na maioria dos ensaios realizados, porém as interfaces que apresentaram menores valores de R_z também obtiveram valores de resistência superiores em alguns dos ensaios de resistência realizados. El Debs (2017) ressalta que tomando os devidos cuidados na execução do novo concreto, como o adensamento e a cura, e no tratamento da superfície, pode-se obter resultados de resistência para a superfície lisa superior ao observado para as superfícies rugosas, nas quais pouca atenção se deu a esse aspecto, indicando que esses fatores são tão importantes quanto a rugosidade superficial.

5.2 Parâmetros resistentes e de rigidez da interface

A rigidez consiste na relação entre a resistência e o deslocamento. No trabalho, os parâmetros de rigidez na interface das superfícies estudadas foram determinados dos resultados obtidos experimentalmente.

O coeficiente de rigidez normal secante, K_{nn} , foi obtido da relação resistência à tração e o seu correspondente deslocamento na interface, para cada amostra ensaiada, conforme apresentado na Figura 5.2.1. Nas amostras, cuja força de fissura era diferente da força de ruptura, foi considerada a resistência à fissuração para a determinação do coeficiente de rigidez normal secante. No ensaio de resistência à tração na flexão, o deslocamento na interface para o cálculo do K_{nn} foi o da abertura do clip gage e, no ensaio de resistência à tração por compressão diametral, foi o do transdutor de deslocamento posicionado na interface (TD 6/7). A Tabela 5.2.1 e 5.2.2 apresenta os valores discriminados de resistência, deslocamento e K_{nn} para o ensaio de resistência à tração na flexão e resistência à tração por compressão diametral da interface Agregado exposto (A). Os resultados das demais interfaces encontra-se no Apêndice G.

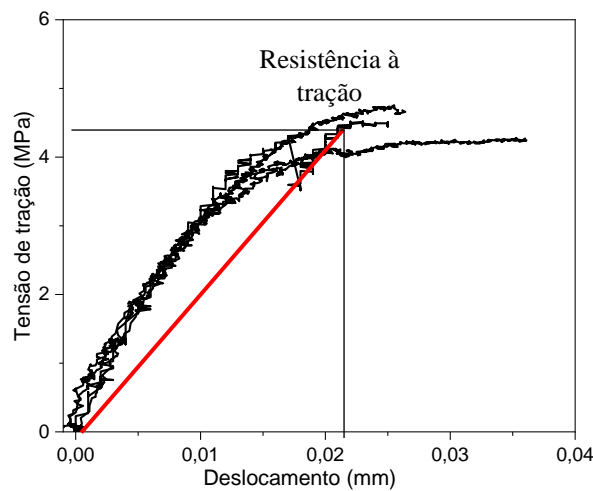
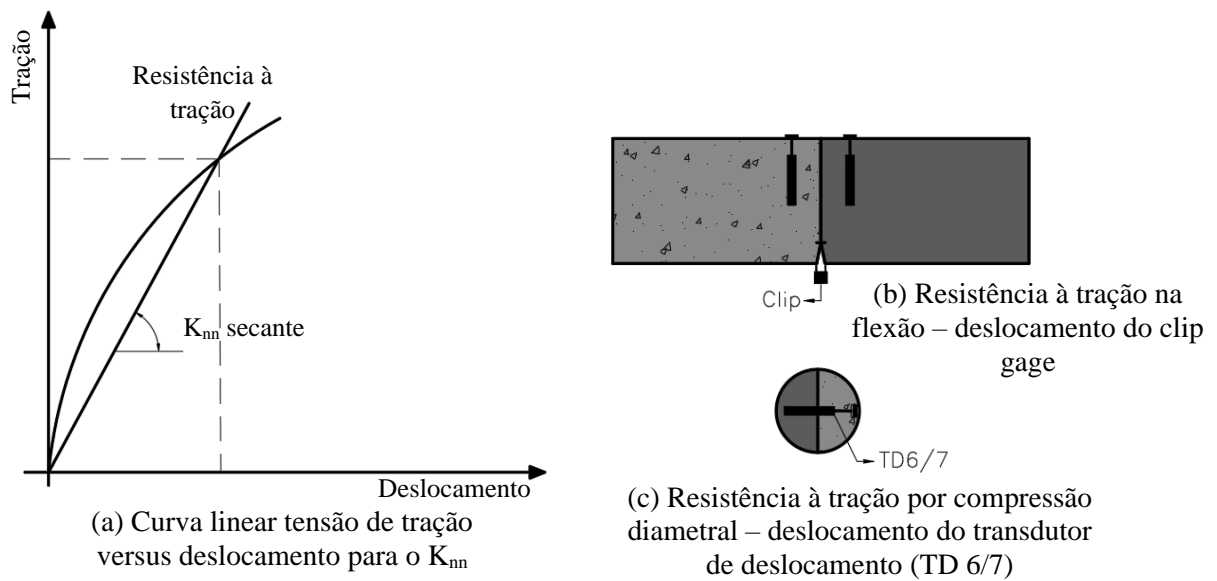


Figura 5.2.1 - Relação da resistência à tração versus separação para o coeficiente de rigidez secante normal

Tabela 5.2.1 - Valores do K_{nn} obtidos do ensaio de resistência à tração na flexão para a interface Agregado exposto

Agregado exposto (A)	$f_{ct,f}$ (MPa)	Clip (mm)	K_{nn}
A2	4,76	0,026	186,49
A3	4,31	0,023	187,27
A4	4,23	0,023	186,12
A5	4,12	0,02	201,10
Média	4,37	0,023	190,24
Desvio padrão (S)	0,27	0,002	39,49

Tabela 5.2.2 - Valores do K_{nn} obtidos do ensaio de resistência à tração por compressão diametral para a interface Agregado exposto

Agregado exposto (A)	f_{ct} fissuração (MPa)	TD 6/7 (mm)	K_{nn}
A1	3,08	0,013	228,85
A2	2,98	0,058	51,38
A3	4,38	0,044	99,56
A5	4,80	0,009	506,06
A6	4,85	0,014	346,73
Média	4,02	0,027	246,52
Desvio padrão (S)	0,92	0,021	185,33

A Tabela 5.2.3 apresenta os valores médios de rigidez normal secante (K_{nn}), obtidos do ensaio de resistência à tração na flexão das interfaces, e as análises estatísticas das interfaces. A interface Jato de areia (J) foi a que obteve maior rigidez e, a interface com menor rigidez, foi a Chave de cisalhamento, 30,73% do valor da interface J. Os valores estatísticos do K_{nn} mostram que não houve diferença para as interfaces Agregado exposto (A), Tela (T), Jato de areia (J) e Intermediária - fibra (In) em relação à interface Referência. No entanto verifica-se que o resultado da interface Intermediária - fibra (In) foi próximo ao valor crítico e o desvio padrão foi elevado, indicando um resultado não contundente para ser considerado com o mesmo valor da interface Referência.

O valor do K_{nn} para a interface Chave de cisalhamento (C) não pode ser considerado igual da interface R para o ensaio de resistência à tração na flexão, conforme apresentado nos resultados estatísticos da Tabela 5.2.3.

Tabela 5.2.3 - Valores obtidos para o K_{nn} com Teste-t considerando interface Referência e presumindo variâncias equivalentes com erro de 5% - ensaio de resistência à tração na flexão

Interface	K_{nn} ($f_{ct,f}$) (N/mm ³)	desvio padrão (S)	Stat t	P (T<=t) bi-caudal	t crítico bi-caudal
Referência (R)	241,37	43,82	-	-	-
Agregado exposto (A)	190,24	7,25	1,83	0,14	2,77
Tela de aço expandida (T)	192,48	45,00	1,33	0,25	2,77
Jato de areia (J)	322,96	100,0	0,94	0,39	2,77
Intermediária - fibra (In)	143,06	107,5	2,28	0,085	2,77
Chave de cisalhamento (C)	99,27	17,6	5,07	0,007	2,77

A Tabela 5.2.4 exibe os valores médios de rigidez normal secante (K_{nn}), obtidos do ensaio de resistência à tração por compressão diametral, e as análises estatísticas das interfaces. A interface Jato de areia (J) foi a que obteve maior rigidez e, a interface com menor rigidez foi a Intermediária – fibra (In), 11,18% do valor da interface J.

Nota-se que os desvios padrões do K_{nn} para esse ensaio foram maiores do que os desvios padrões do K_{nn} obtidos do ensaio de resistência à tração na flexão. Diante disso, os valores estatísticos não foram conclusivos para a igualdade dos parâmetros das interfaces em relação à interface Referência, salientando que houve influência da força de compressão atuando na execução do ensaio. As interfaces Intermediária – fibra (In) e Tela (T) obtiveram desvios padrões baixos e deste modo os resultados foram bem mais representativos, no entanto, como o valor estatístico foi maior do que o valor crítico, logo o K_{nn} não pode ser considerado igual ao da interface Referência (R).

Tabela 5.2.4 - Valores obtidos para o K_{nn} com Teste-t considerando interface Referência e presumindo variâncias equivalentes com erro de 5% - ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Interface	$K_{nn} (f_{ct})$ (N/mm ³)	desvio padrão (S)	Stat t	P ($T \leq t$) bi-caudal	t crítico bi-caudal
Referência (R)	95,49	14,16	-	-	-
Agregado exposto (A)	246,52	185,33	-1,20	0,28	2,57
Jato de areia (J)	430,17	353,31	-1,65	0,17	2,78
Chave de cisalhamento (C)	336,83	336,83	-1,77	0,14	2,57
Intermediária – fibra (In)	48,08	20,59	6,82	0,002	2,77
Tela de aço expandida (T)	175,43	59,24	-3,66	0,03	3,18

O coeficiente de rigidez obtido da resistência à tração na flexão obteve maior representatividade em relação ao coeficiente de rigidez obtido da resistência à tração por compressão diametral, haja visto que nesse ensaio há uma parcela da força de compressão que pode influenciar nos resultados. A resistência à tração por compressão diametral na interface Chave de cisalhamento foi 242,42% superior à resistência à tração na flexão, em virtude da quebra das chaves durante a execução do ensaio de tração por compressão diametral, fato que não ocorreu no ensaio de resistência à tração na flexão, mostrando a interferência da força de compressão. Diante disso o K_{nn} foi 339,3% maior na resistência à tração por compressão diametral do que na resistência à tração na flexão.

Os valores medidos pelos transdutores de deslocamento no ensaio de resistência à tração por compressão diametral na interface Referência foi 235,3% maior que no ensaio de resistência à tração na flexão, não expressando o real comportamento da interface, porque na iminência da força de ruptura houve uma variação elevada dos deslocamentos, conforme pode ser visto na Figura 4.6.10. Na interface Intermediária – fibra (In), o deslocamento médio medido pelo transdutor de deslocamento para os ensaios de tração por compressão diametral foi 50% maior em relação ao deslocamento médio medido no ensaio de resistência à tração na flexão. Tais resultados justificam a diferença obtida do parâmetro de rigidez normal secante para os ensaios de tração na flexão e tração por compressão diametral (Tabela 5.2.5).

Tabela 5.2.5 - Correlação dos resultados de resistência à tração e parâmetros de rigidez normal

Interface	$f_{ct,f}$ (N/mm ²)	$f_{ct,sp}$ (MPa)	$c = \frac{f_{ct,f}}{f_{ct,sp}}$	$K_{nn}(f_{ct,f})$ (N/mm ³)	$K_{nn}(f_{ct,sp})$ (N/mm ³)	$c = \frac{K_{nn}(f_{ct,f})}{K_{nn}(f_{ct,sp})}$
A	4,35	4,0 (1° fissura)	1,09	190,24	246,52	0,77
In	4,24	4,2 (1° fissura)	1,00	143,06	48,08	2,98
R	4,18	3,79	1,1	241,37	95,49	2,52
T	3,15	5,16	0,61	192,48	175,43	1,1
J	2,41	5,01	0,48	322,96	430,17	0,75
C	1,98	4,80	0,41	99,27	336,83	0,27

O coeficiente de rigidez tangencial secante, K_{ss} , foi obtido da relação resistência ao cisalhamento e o seu respectivo deslizamento na interface, determinado da leitura do transdutor de deslocamento 8 (TD8), conforme apresentado na Figura 5.2.2. A Tabela 5.2.6 apresenta os valores discriminados de resistência, deslocamento e K_{ss} para a interface Agregado exposto (A). Os resultados das demais interfaces encontra-se no Apêndice G.

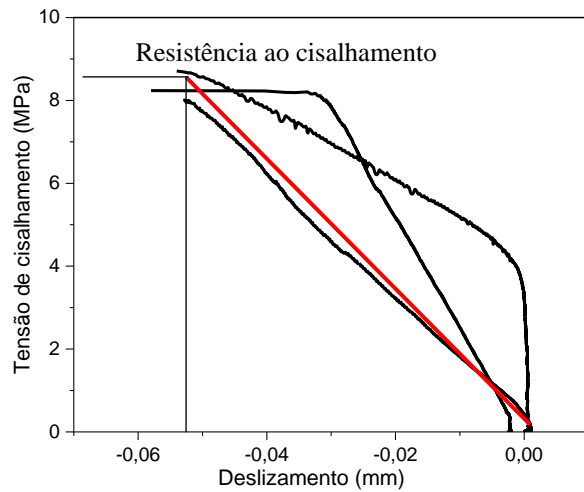
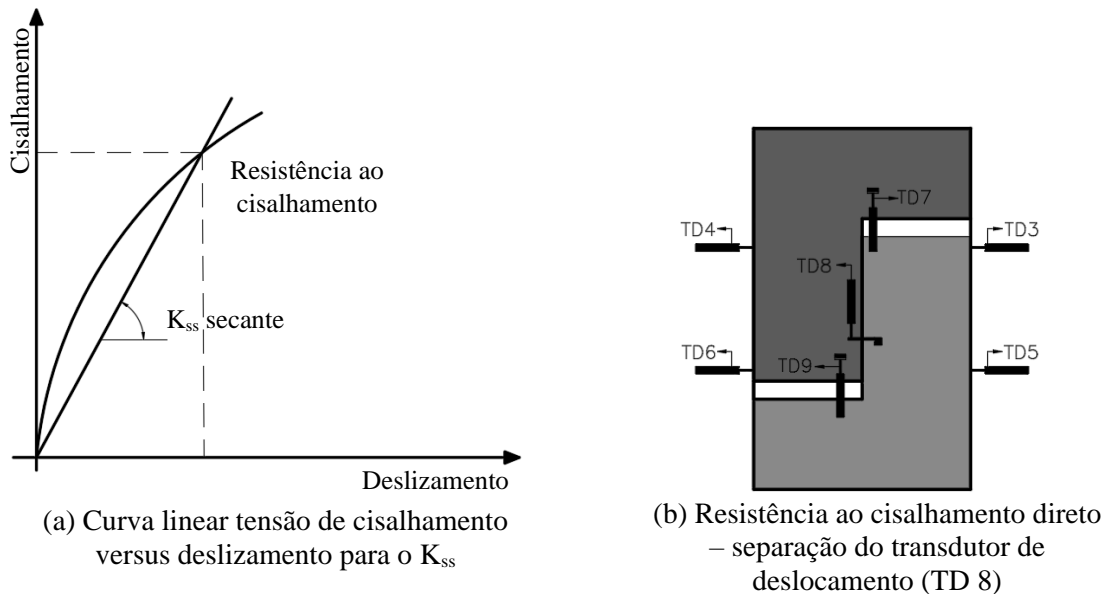


Figura 5.2.2 - Relação da resistência ao cisalhamento versus deslizamento para o coeficiente de rigidez na direção tangencial

Tabela 5.2.6 - Valores do K_{ss} obtidos do ensaio de resistência ao cisalhamento direto para a interface Agregado exposto

Agregado exposto (A)	τ_{ultima} (N/mm ²)	LVDT 8 (mm)	K_{ss}
A1	8,01	0,053	151,22
A2	8,71	0,054	161,28
A3	8,24	0,058	142,00
Média	8,32	0,055	151,50
Desvio padrão (S)	0,35	0,003	9,64

Conforme pode ser visto na Tabela 5.2.7, a interface Intermediária – fibra (In) foi a que obteve maior coeficiente de rigidez na direção tangencial e a interface Agregado exposto foi a com menor coeficiente de rigidez na direção tangencial, 28,64% da interface In, indicando que os agregados expostos foram capazes de mobilizar o deslizamento na interface.

Os resultados estatísticos apresentados na Tabela 5.2.7 indicam que não houve diferença de K_{ss} para a interface Agregado exposto (A) e Chave de cisalhamento (C) quando comparado com a interface Referência (R). Valores estatísticos abaixo do valor crítico também foram obtidos para a interface Jato de areia (J) e Intermediária – fibra (In), no entanto, como os resultados do K_{ss} para essas interfaces apresentaram desvios padrões elevados, não é possível considerar o mesmo valor em relação à interface R. O resultado estatístico para a interface Tela indica diferença em relação à interface Referência.

Tabela 5.2.7 - Valores obtidos para o K_{ss} com Teste-t considerando interface Referência e presumindo variâncias equivalentes com erro de 5% - ensaio de resistência ao cisalhamento direto

Interface	K_{ss} (N/mm ³)	desvio padrão (S)	Stat t	P (T ≤ t) bi-caudal	t crítico bi-caudal
Referência (R)	161,51	20,80	-	-	-
Agregado exposto (A)	151,5	9,64	0,22	0,85	4,3
Jato de areia (J)	419,11	116,95	2,37	0,14	4,3
Chave de cisalhamento (C)	172,82	65,89	1,37	0,31	4,3
Intermediária – fibra (In)	529,02	272,73	1,72	0,23	4,3
Tela de aço expandida (T)	244,77	81,95	7,14	0,02	4,3

O coeficiente de atrito da superfície foi determinado pela Equação 5.1 e os resultados estão apresentados na Tabela 5.2.8. O cálculo leva em consideração a coesão na interface, encontrada do ensaio de cisalhamento direto sem a atuação da força normal, e a tensão normal e de cisalhamento na interface, determinada do ensaio de cisalhamento inclinado.

$$\mu = \frac{\tau_n - c}{\sigma_n} \quad (5.1)$$

No ensaio de cisalhamento inclinado foi possível identificar os seguintes critérios de ruptura para as interfaces Agregado exposto (A), Jato de areia (J) e Chave de cisalhamento (C): parte dos corpos de prova romperam no CAR, com formação do cone de tensões (Figura 4.5.1, 4.5.3, 4.5.5), indicando que a falha foi um efeito combinado de Mohr - Coulomb com um limite de tensões de tração, na qual ocorreu a formação de fissuras normais na direção da tensão principal máxima

(tensão de cisalhamento) e as tensões de tração e cisalhamento foram redistribuídas para o concreto de menor resistência (CAR), ocasionando o enfraquecimento da estrutura do material e gerando ruptura. No entanto também houve ruptura na interface (Figura 4.5.2, 4.5.4, 4.5.6), sendo governada pela tensão de cisalhamento máxima do tipo Mohr-Coulomb e, nesse caso, o atrito está atuando na interface. Para essas interfaces foi possível estabelecer um valor para o coeficiente de atrito, na qual não houve variação significativa para as interface A e C, aumento de 7,7%. A interface J foi a que apresentou menor resultado do coeficiente de atrito em relação as interfaces estudadas.

Na interface Tela (T) houve ruptura predominante do efeito de Mohr-Coulomb com um limite de tração e nesse caso não foi possível estabelecer um valor para o coeficiente de atrito. Já para a interface Intermediária - fibra (In) a ruptura não ocorreu nessa interface e sim na interface do CAR com o concreto intermediário, por isso que não determinou o coeficiente de atrito para essa interface.

Em relação à interface Referência todos os corpos de prova romperam na interface, no entanto não é possível especificar um coeficiente de atrito propriamente dito, haja visto que a superfície foi lisa e o valor obtido foi elevado, pois houve a formação de uma cola na junta por parte do UHPC, intensificando a ligação adesiva.

Wichert, Matz e Empelmann (2019) determinaram o coeficiente de atrito no ensaio de cisalhamento inclinado para a ligação entre o UHPC e a argamassa de alta resistência. Os autores realizaram o tratamento da superfície no UHPC com jato de areia e superfície lisa e obtiveram valores iguais a 0,63 e 0,83 ou seja, 44% e 40% menor que os valores obtidos na pesquisa, respectivamente (Tabela 5.2.8). O modo de falha obtido pelos autores para os dois tratamentos de superfície foi do tipo cisalhamento com ângulo de inclinação de 30° em relação a vertical. A diferença de resultados obtidos pelos autores e os da pesquisa pode ter ocorrido pelo fato dos concretos terem propriedades distintas. No entanto cabe destacar que os autores obtiveram coeficientes de atrito para a superfície lisa maior que a superfície rugosa, resultado parecido ao obtido na pesquisa.

Austin, Robins e Pans (1999) cita que o coeficiente de atrito tem sido determinado por vários pesquisadores nos trabalhos de ligação, na qual valores variando de 0,75 a 0,8 foram encontrados para superfícies lisas e valores variando de 1,1 a 1,4 foram obtidos para superfície rugosa, similares aos obtidos na pesquisa (A = 1,3, C = 1,4).

Tabela 5.2.8 - Valores do coeficiente de atrito

Interface (desvio padrão - S)	$\tau_{\text{última}} (c)$ (N/mm ²)	$\tau_{\text{última}}$ (N / mm ²)	σ_N (N / mm ²)	μ
A	8,32	33,89	19,57	1,30
(S)	0,36	1,97	1,14	
In	5,36	30,44	17,57	Não houve ruptura clássica na interface
(S)	0,31	4,19	2,42	
R	6,55	31,28	18,06	1,37
(S)	0,65	3,35	1,93	
T	7,50	34,02	19,64	Não houve ruptura clássica na interface
(S)	0,34	2,44	1,41	
J	7,65	21,60	12,47	1,12
(S)	0,25	0,70	0,41	
C	7,03	38,45	22,20	1,41
(S)	0,81	1,97	1,14	

O MC-10 (fib, 2012) propõem a Equação 5.2 para expressar a resistência ao cisalhamento último na interface de concretos moldados em diferentes etapas com base na resistência à tração direta para o menos resistente dos concretos em contato e um coeficiente (c) para a parcela de adesão. De acordo com os resultados obtidos experimentalmente, $f_{ct,f} = 5,02$ MPa e $f_{ctm} = 3,5$ MPa, ou seja, 70% de $f_{ct,f}$, conforme relação sugerido no Código Modelo CEB-FIP (1990) (Equação (4.3)), com h_0 igual a 100 mm (valor definido). No entanto, de acordo com Mehta e Monteiro (2008), para concretos de alta resistência, $f_{ct,f}$ pode ser 50% a 60% mais alta do que f_{ctm} . Considerando f_{ctm} como sendo 58% $f_{ct,f}$, tem-se $f_{ctm} = 2,9$ MPa.

Zhang et al. (2019) sugere que a Equação 5.2 pode ser usada para a definir a capacidade de cisalhamento da interface do concreto normal e UHPC devido a consideração do efeito da resistência do concreto, na qual os autores avaliaram que a mesma tem um efeito significativo nas propriedades de cisalhamento da interface, depois de analisar a interface de concretos com diferentes resultados de resistência à compressão. No entanto, os coeficientes precisam ser modificados com base nos resultados experimentais. O MC-10 (fib 2012) propõem alguns coeficientes em função da rugosidade, mas não especifica a resistência do concreto considerada para a determinação desses coeficientes.

$$\tau_{ultima} = c \cdot f_{cm} + \mu \sigma_n \quad (5.2)$$

$$f_{cm} = f_{ct,f} \cdot \frac{2(h/h_0)^{0,7}}{1 + 2(h/h_0)^{0,7}} \quad (5.3)$$

A Tabela 5.2.9 apresenta a correlação da resistência ao cisalhamento direto com a resistência à tração do CAR. Exceto pela interface Intermediária – fibra (In), todos os valores do coeficiente “c” obtidos foram maiores que 2,0, até mesmo para a superfície Referência, cujo valor encontrado foi 2,26, na qual o efeito cola do UHPC no CAR teve uma grande contribuição para o resultado elevado. O maior coeficiente obtido foi para a interface Agregado exposto, cujo valor encontrado foi de 2,86. Zhang et al. (2019) encontrou o valor de coeficiente c igual a 1,86 para superfície rugosa e concretos com resistência à compressão e tração igual a 30 MPa e 2,5 MPa, respectivamente, aderidos ao UHPC.

Pode-se notar que a resistência ao cisalhamento obtida do ensaio de cisalhamento inclinado foi bem maior em relação ao cisalhamento direto, tendo em conta que nesse ensaio há o efeito combinado da força normal, aumentando a capacidade resistente da interface.

Tabela 5.2.9 - Correlação dos resultados de resistência ao cisalhamento

Interface	τ_{ultima} (N/mm ²)	$c = \frac{\tau_{ultima}}{f_{cm}}$	τ_n (N/mm ²)
A	8,32	2,86	33,89
In	5,36	1,85	30,44
R	6,55	2,26	31,28
T	7,50	2,6	34,02
J	7,65	2,64	21,60
C	7,03	2,4	38,45

6. MODELO NUMÉRICO

A simulação numérica dos ensaios de resistência à tração na flexão, cisalhamento direto e cisalhamento inclinado foi feita no software Abaqus®.

6.1 Propriedades do concreto no Abaqus®

O modelo constitutivo adotado para o concreto no Abaqus® foi o “Concrete Damage Plasticity (CDP)”, que corresponde ao modelo de dano e plasticidade, levando em consideração os parâmetros de fissuração. As principais características do modelo apresentadas no Guia de Usuário do Abaqus® (versão online) são:

- Capacidade geral para modelagem de concreto e outros materiais quase frágeis em todos os tipos de estruturas (vigas, treliças, cascas e sólidos)
- Usa o conceito de dano/elasticidade isotrópica em combinação com plasticidade de tração e compressão para representar o comportamento inelástico do concreto.
- É projetado para aplicações nas quais o concreto é submetido a carregamento monotônico, cíclico e/ou dinâmico sob pressões baixas de confinamento;

Nana et al. (2017) corrobora que os fenômenos que caracterizam o comportamento mecânico do concreto no ramo de atenuação da curva de deformação é a redução da rigidez elástica e o desenvolvimento de deformações irreversíveis. Caso fosse usado o modelo de dano puro, o mesmo ia ser superestimado em comparação com o valor experimental. Da mesma forma, se fosse considerado o modelo plástico puro, levaria em consideração fenômenos irreversíveis, mas este não é capaz de reproduzir a redução da rigidez característica devido a formação de microfissuras, fazendo com que o valor da deformação seja superestimado em relação ao modelo experimental. Logo a combinação de plasticidade e dano no modelo do CDP pode fornecer uma resposta para a limitação das duas formulações.

O Concrete Damage Plasticity é baseado no critério de plastificação de Drucker Prager (Figura 6.1) e aplica-se a materiais não dúcteis, dependendo das tensões hidrostáticas. Drucker e Prager propuseram um critério derivado de Von Mises, introduzindo em sua formulação o primeiro invariante de tensões que representa o estado hidrostático de tensões (ASSAN, 2014). De forma geral, esse critério é dado pela Equação (6.1).

$$F(I_1, I'_2) = \alpha I_1 + \sqrt{I'_2} - \beta = 0 \quad (6.1)$$

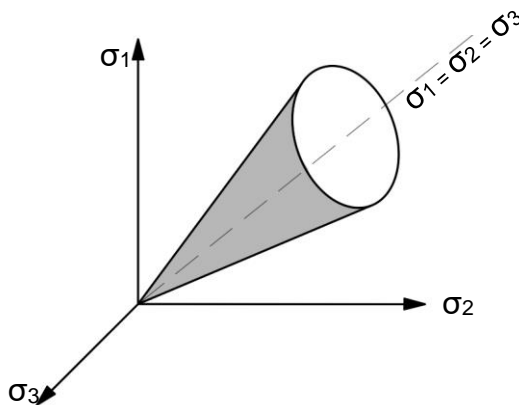


Figura 6.1 - Superfície de plastificação no Critério de Drucker - Prager (Fonte: Garner, S. et al., 2015)

Para materiais que não tem comportamento dúctil, como o concreto, cujas tensões de ruptura à tração e à compressão são muitos diferentes, os parâmetros α e β são determinados com base em ensaios de tração pura ($\sigma_1 = \sigma_t$ e $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$) e de compressão pura ($\sigma_1 = \sigma_2 = 0$ e $\sigma_3 = -\sigma_c$) (Assan, 2013).

De acordo com Nana et al. (2017) a superfície de plastificação representa a superfície no espaço de tensões que envolve o volume da região elástica, ou seja, o estado de tensão no interior da superfície é elástico, enquanto o estado de tensão na superfície atingiu o ponto de escoamento e se tornou plástico, sendo a função de plastificação baseada no Critério de Drucker-Prager, implementado no modelo do CDP.

Basicamente o modelo constitutivo do CDP é definido pela entrada de dados referente as tensões de compressão e tração uniaxial, podendo levar em consideração o comportamento de dano e os parâmetros constitutivos para modelar o formato da superfície de plastificação ajustando para o concreto.

Segundo o Guia de Usuário do Abaqus[®] (versão online), para levar em consideração a diferença da evolução de resistência à tração e compressão no concreto, Lee e Fenves (1998) fizeram modificações na formulação de Lubliner (1988) e introduziram na função de escoamento F que foi implementada no modelo de CDP do Abaqus[®], sendo que, a função da tensão de escoamento é baseada em dois invariantes de tensão do tensor de tensão efetivo: a pressão hidrostática p e a tensão equivalente de Von Mises (Equação (6.2)).

$$F = \frac{1}{1-\alpha} \left(\bar{q} - 3\alpha \bar{p} + \beta (\varepsilon^{pl}) \langle \sigma_{\max} \rangle - \gamma \langle -\sigma_{\max} \rangle \right) - \bar{\sigma}_c (\varepsilon^{pl}) = 0 \quad (6.2)$$

A pressão hidrostática efetiva e a tensão efetiva equivalente de Von Mises são apresentadas nas Equações (6.3) e (6.4), respectivamente. Já os parâmetros α , β e γ podem ser expressos pelas Equações (6.5), (6.6) e (6.7).

$$\bar{p} = -1/3\bar{\sigma} : I \quad (6.3)$$

$$\bar{q} = \sqrt{-3/2\bar{S} : \bar{S}} \quad (6.4)$$

$$\bar{S} = \bar{p}I + \bar{\sigma}$$

$$\alpha = \frac{\left(\frac{f_{bc}}{f_c} - 1\right)}{\left(2 \cdot \frac{f_{bc}}{f_c} - 1\right)} \quad (6.5)$$

$$\beta = \frac{\bar{\sigma}_c(\varepsilon_c^{pl})}{\bar{\sigma}_t(\varepsilon_t^{pl})} (1 - \alpha) - (1 + \alpha) \quad (6.6)$$

$$\gamma = \frac{3(1 - K_c)}{2K_c - 1} \quad (6.7)$$

Na qual σ_{\max} é a máxima tensão principal efetiva e $\frac{f_{bc}}{f_c}$ é a razão entre a resistência a compressão biaxial e a resistência à compressão uniaxial. Valores experimentais típicos da razão para o concreto estão na faixa de 1,10 a 1,16, de acordo com Guia de Usuário do Abaqus® (versão online). Krahl (2018) apresentou na Figura 6.2 os resultados experimentais da compressão biaxial para o concreto convencional (até 61 MPa), o CAR (até 94 MPa) e UHPC (até 170 MPa), desenvolvido por Speck (2008) e compara com o critério de escoamento de Lubliner, na qual foi possível obter a razão $\frac{f_{bc}}{f_c} = 1,26$ para o concreto convencional, $\frac{f_{bc}}{f_c} = 1,1$ para o concreto de alta resistência e $\frac{f_{bc}}{f_c} = 1,07$ para o UHPC.

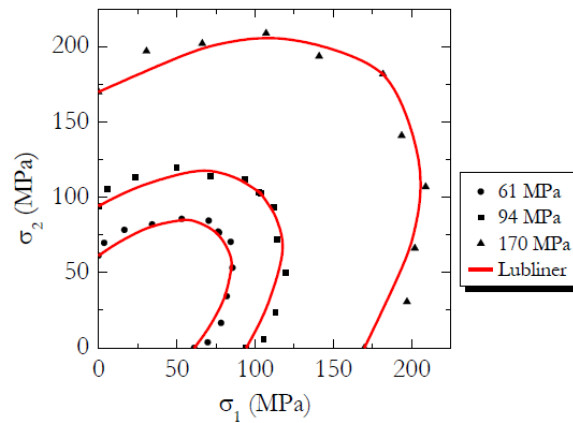


Figura 6.2 - Critério de escoamento de Lubliner e resultados na compressão biaxial de Speck 2008 (Fonte: adaptado por KRAHL, 2018)

A forma da superfície de plastificação no plano desviador é definida pelo parâmetro K_c , incluído na expressão do parâmetro γ , conforme apresentado na Figura 6.3 e ocorre no estado triaxial de compressão.

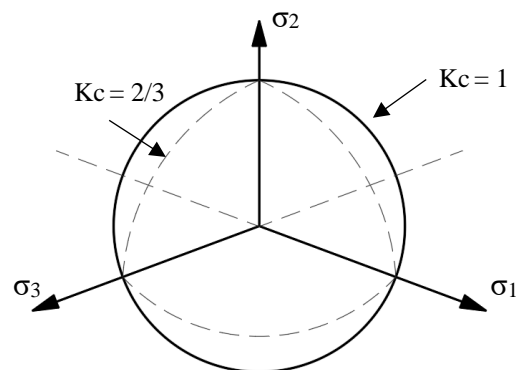


Figura 6.3 - Superfície de plastificação no plano desviador (corresponde a formulação de Rankine e corresponde ao critério de Drucker-Prager (Fonte: GENIKOUMSOU et al.; 2015)

De acordo com o Guia de Usuário do Abaqus® (versão online) no modelo do CDP é assumido a função potencial de fluxo que não está associado ao modelo Drucker - Prager, $G(\sigma)$, que é uma função hiperbólica definida pela Equação (6.8).

$$G(\sigma) = \sqrt{(\varepsilon\sigma_{i0} \tan \psi)^2 + \bar{q}^{-2}} - \bar{p} \tan \psi \tag{6.8}$$

Sendo ε a excentricidade que fornece a taxa a partir da qual a função potencial plástica se aproxima da assíntota, assumida como constante no modelo e sugerida com o valor de 0,1 (Guia de Usuário do Abaqus®), conforme apresentado na Figura 6.4, na qual mostra a função potencial plástica comparada com a superfície de escoamento e o incremento de tensão plástica normal à função potencial plástica, que difere da superfície de escoamento Genikoumsou et al. (2015).

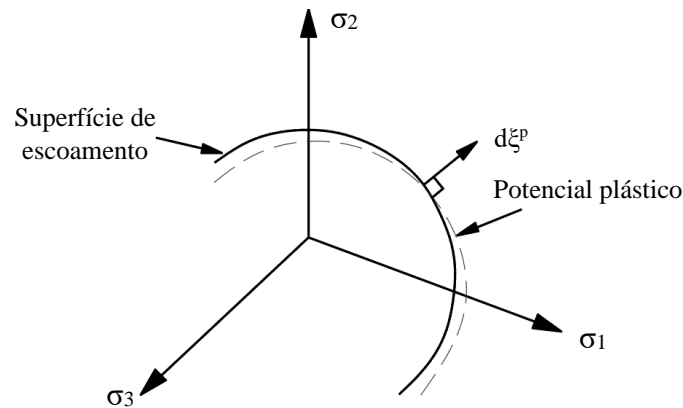


Figura 6.4 - Superfície potencial plástica e superfície de escoamento no plano desviatório (Fonte: GENIKOUMSOU et al., 2015)

Sendo σ_{t0} a tensão de tração uniaxial, ψ o ângulo de dilatação medido no plano $p-q$ como ângulo de inclinação da função potencial plástica (Figura 6.5) em alta pressão de confinamento (Guia de Usuário do Abaqus®). Nana et al. (2017) explica que esse parâmetro controla a quantidade de deformação volumétrica plástica desenvolvida durante o cisalhamento plástico e é assumida constante durante o escoamento plástico, sendo que, valores baixos do ângulo de dilatação produzirão um comportamento frágil e valores mais altos produzirão um comportamento dúctil. Ainda de acordo com pesquisas bibliográficas feitas pelos autores a respeito do estudo paramétrico em relação ao ângulo de dilatação para concretos de resistência normal, a variação do ângulo de dilatação entre 10° e 56° fez com que a capacidade de cisalhamento ampliasse quando o mesmo sofreu um aumento, devido ao acréscimo da ductilidade, sendo que, a melhor concordância com a resposta experimental foi obtida para um ângulo de dilatação escolhido entre 30° e 40° .

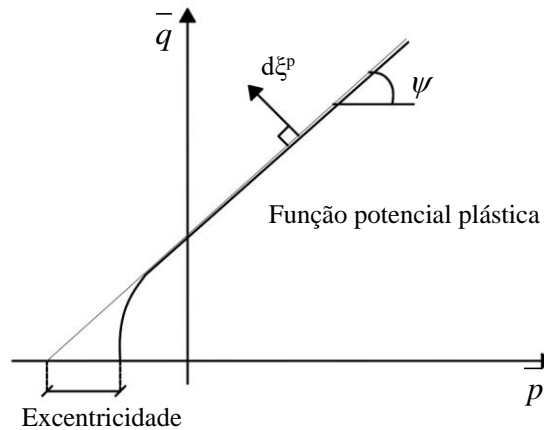


Figura 6.5 - Ângulo de dilatação e excentricidade no plano meridiano (Fonte: GENIKOUMSOU et al., 2015)

De acordo com o Guia de Usuário do Abaqus[®], os modelos de materiais que exibem um comportamento de amolecimento e degradação da rigidez geralmente causam dificuldades de convergência em programas implícitos de análise, sendo que, essa dificuldade pode ser solucionada usando uma regularização viscoplástica das equações constitutivas. Para permitir que as tensões fiquem fora da superfície de escoamento, o modelo de plasticidade danificado é regularizado pelo parâmetro de viscoplasticidade, de acordo com a aproximação de Devaut-Lions (Equação (6.9)). O parâmetro de viscosidade μ representa o tempo de relaxação do sistema viscoplastico, e é sugerido um valor pequeno de 0,0001 (Guia de Usuário do Abaqus[®]), para melhorar a taxa de convergência do modelo no regime de amolecimento sem comprometer os resultados. Deste modo, o tensor de deformação plástica é atualizado e o dano é reduzido usando um adicional tempo de relaxação.

$$\dot{\epsilon}_v^{pl} = \frac{1}{\mu} (\epsilon^{pl} - \epsilon_v^{pl}) \quad (6.9)$$

Do mesmo modo, a variável de degradação da rigidez viscosa, d_v , é definida pela Equação (6.10), na qual 'd' é a variável da degradação e a relação entre a tensão e deformação do modelo viscoplástico é dado pela Equação (6.11).

$$\dot{d}_v = \frac{1}{\mu} (d - d_v) \quad (6.10)$$

$$\sigma = (1 - d_v) E_0 : (\epsilon - \epsilon_v^{pl}) \quad (6.11)$$

O modelo é integrado usando o método generalizado retroativo de Euler com o modelo de plasticidade no Abaqus[®] e, para as iterações de equilíbrio, é usado um material Jacobiano consistente com esse operador de integração.

Fernandes et al. (2013) adotou o CDP como modelo constitutivo do concreto, sendo que, no comportamento à tração o mesmo assumiu um comportamento elástico até o início da fissuração, seguido por um amolecimento das tensões, calculado através da curva tensão-abertura de fissuras, considerando a energia de fratura. Os parâmetros adicionais do CDP considerados pelo autor estão descritos na Tabela 6.1.

Li, Hao e Bi (2017) adotaram os parâmetros solicitados no CDP para a entrada de modelo no Abaqus® (Tabela 6.1) com base nos valores sugeridos por Demir e Sumer (2016) e Zhu et al. (2017).

Tabela 6.1 - Valores de parâmetros adotados pelos autores para representação do concreto no CDP (Fonte: Adaptado pela autora)

Parâmetro	Significado	Fernandes et al. (2013)	Li, Hao e Bi (2017)
f_c (N/mm ²)	Resistência à compressão do concreto	27	48 à 57
ψ	Ângulo de dilatação	38°	30°
ε	Excentricidade potencial de fluxo	0,1	0,1
$\sigma_{b0} / \sigma_{c0}$	Razão entre tensão de plastificação na compressão em equilíbrio biaxial e tensão de plastificação na compressão uniaxial.	1,166	1,166
K_c	Parâmetro que define a forma das superfícies de ruptura do plano desviador.	0,6667	0,6667
μ	Parâmetro de viscosidade	0.000	0.0001

Jang. et al. (2018) adotaram o modelo do “Concrete Damage Plasticity (CDP)” para representar o UHPC, na qual corrobora que, quando comparado com outros modelos de materiais que representam o concreto no Abaqus®, como o modelo de concreto fissurado, o CDP é o que tem maior capacidade de representar o comportamento inelástico completo do concreto em tensão de compressão, incluindo as características do dano. A Tabela 6.2 apresenta os parâmetros adicionais considerados pelo autor.

Tabela 6.2 - Valores de parâmetros adotados pelos autores para representação do UHPC no CDP (Fonte: Adaptado pela autora)

Parâmetro	Significado	Valor adotado por Jang. et al. (2018)	Valor adotado por Krahl, Carrazedo e El Debs (2018)
f_c (N/mm ²)	Resistência à compressão do concreto	98	131,5
ψ	Ângulo de dilatação	30°	54°
ε	Excentricidade potencial de fluxo	0,1	0,1
$\sigma_{b0} / \sigma_{c0}$	Razão entre tensão de plastificação na compressão em equilíbrio biaxial e tensão de plastificação na compressão uniaxial.	1,1667	1,07
K_c	Parâmetro que define a forma das superfície de ruptura do plano desviador.	0,6667	0,6667
μ	Parâmetro de viscosidade	0,0001	0,0001

6.2 Propriedades da interface no Abaqus®

No estudo da interface dos dois concretos foi adotado o modelo de contato baseado na superfície a superfície (Surface-to-surface), podendo o mesmo ser usado como alternativa para modelar interações de contato geral de superfícies. Para a discretização da superfície por contato é necessário considerar o formato da superfície escrava e mestre na região da restrição do contato, na qual, de acordo com o Guia de Usuário do Abaqus®, a atribuição da superfície mestre e escrava pode obedecer as seguintes regras: 1) superfícies rígidas analíticas e superfície baseada em elementos rígidos devem ser sempre a superfície principal; 2) superfícies escravas devem ser sempre fixadas a corpos deformáveis ou corpos deformáveis definidos como rígidos. Como no trabalho em questão os concretos estudados (CAR, Concreto Intermediário e UHPC) possuem módulos de elasticidades parecidos, foi considerado a questão da deformabilidade, na qual, sendo o CAR mais rígido que o UHPC, o mesmo foi considerado como a superfície mestre e o UHPC como superfície escrava.

Para o deslizamento relativo entre as superfícies foi adotado na simulação de contato mecânica o deslizamento pequeno, na qual pressupõem que, embora dois corpos possam sofrer grandes movimentos, haverá pouco deslizamento relativo de uma superfície ao longo da outra.

A propriedade de interação mecânica considerada no contato da superfície foi o comportamento coesivo em conjunto com o dano para representar a falha da ligação das duas superfícies coesivas.

De acordo com o documento do Abaqus do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (2020), comportamento de contato coesivo é usado em interfaces na qual não há espessura de elemento, ou seja, quando ocorre o contato direto de um material com o outro material, podendo ser usado para modelar uma interface permanentemente ligada ou interfaces na qual a ligação pode danificar e falhar, sendo representado por um critério de iniciação do dano. Além disso, o mesmo pode ser usado como alternativa para interação de superfícies com rugosidade.

De acordo com Guia de Usuário do Abaqus[®], o comportamento coesivo é baseado no modelo de tração-separação elástico, na qual assume um comportamento elástico inicialmente linear seguido pela iniciação e evolução do dano. O comportamento elástico é escrito em função de uma matriz constitutiva elástica que relaciona as tensões normais (t_n) e de cisalhamento (t_s, t_t) com os seus respectivos deslocamentos nessas direções ($\delta_n, \delta_s, \delta_t$) (Equação (6.12)). Os coeficientes de rigidez na direção normal, K_{nn} , e nas direções tangenciais, $K_{tt} = K_{ss}$ são os parâmetros de entrada no modelo que relaciona as tensões e os deslizamentos (Equação (6.13)).

Conforme o Guia de Usuário do Abaqus[®], os coeficientes de rigidez normal e tangencial serão desacoplados, neste caso a separação normal pura não gera forças coesivas nas direções de cisalhamento e, o deslizamento do cisalhamento puro com separação normal igual a zero, não gera forças coesivas na direção normal, que consiste na especificação mais simples do comportamento coesivo nas direções normal e tangencial (Equação (6.14)). Caso o comportamento seja acoplado de tração-separação, os outros parâmetros de rigidez precisam ser definidos (Equação (6.12)).

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{ns} & k_{nt} \\ k_{ns} & k_{ss} & k_{st} \\ k_{nt} & k_{st} & k_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} = K \delta \quad (6.12)$$

$$k_{nn} = \sigma / \delta \quad (6.13)$$

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

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & 0 & 0 \\ 0 & k_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & k_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} = K \delta \quad (6.14)$$

A modelagem do dano permite que seja feita a simulação da degradação e eventual falha na ligação entre duas superfícies coesivas, sendo que, o mecanismo de falha consiste em duas etapas: um critério de iniciação do dano, que pode ser por meio de tensões ou separação de contato, e uma lei de evolução do dano.

A lei de evolução do dano descreve a taxa em que a rigidez coesiva é degradada quando o critério de iniciação correspondente é alcançado e a mesma é definida com a entrada de informações no modelo. No Abaqus[®] existem dois componentes para a definição da evolução do dano: o primeiro relacionado à separação efetiva quando ocorre a falha por completo na interface e o segundo relacionado a definição da evolução do dano, que corresponde ao início do dano e a falha final.

De modo geral o comportamento da interface pode ser explicado pela representação da Figura 6.6. Na fase inicial de carregamento a interface é governada pelo comportamento coesivo através dos parâmetros de rigidez na direção normal e tangencial (K_{nn} , $K_{tt} = K_{ss}$), em que a tensão na interface cresce proporcionalmente ao deslizamento. O critério de limitação da tensão na interface é definido pela iniciação do dano com a máxima tensão de pico limitada pelos valores de contato quando a separação é puramente normal ou puramente na primeira ou na segunda direção de cisalhamento, respectivamente (Figura 6.7-a) (Guia de Usuário do Abaqus[®]). A evolução do dano é dada pela separação efetiva exponencial (Figura 6.7-b), na qual é considerado no Abaqus[®] uma variável limitando o deslocamento plástico e um parâmetro exponencial adimensional α que define a taxa de evolução do dano. O critério de evolução do dano é o limitante para a contribuição do atrito na interface, representado pelo comportamento tangencial com a entrada no modelo do coeficiente de atrito da interface. Quando o dano é cessado o atrito começa a atuar na interface até a sua completa ruptura.

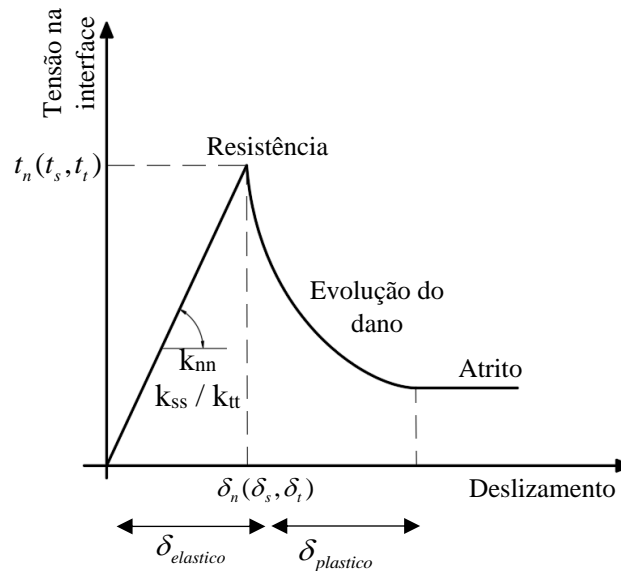


Figura 6.6 – Critério do comportamento da interface no modelo numérico do Abaqus®

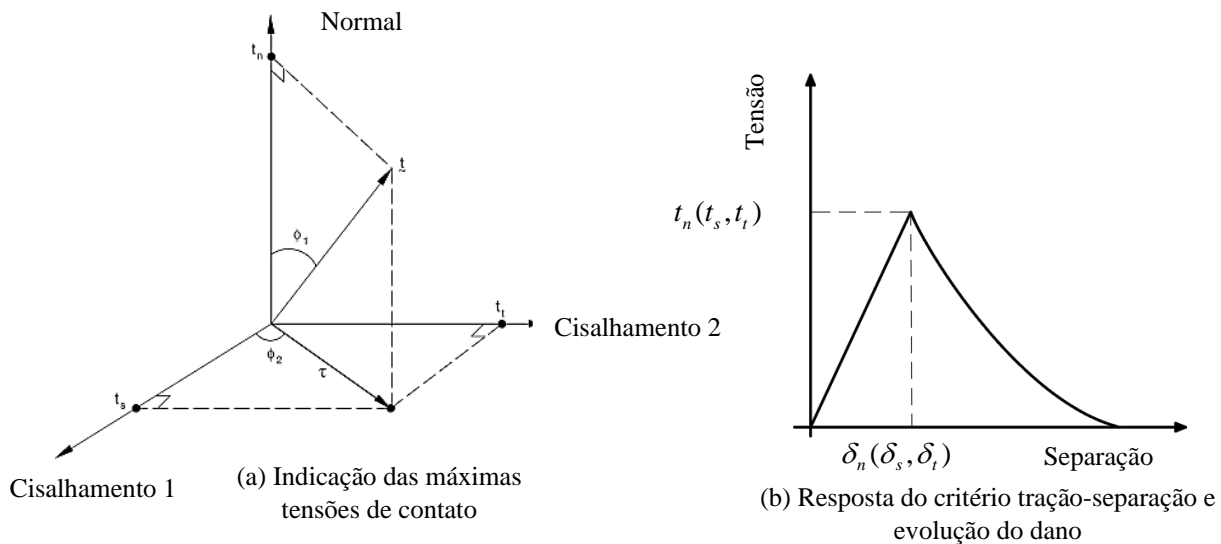


Figura 6.7 – Critério do dano na interface (Fonte: GUIA DE USUÁRIO DO ABAQUS®)

Jang. et al. (2018) analisaram no Abaqus® o desempenho de juntas com chaves de cisalhamento em peças feitas de UHPC para o ensaio de cisalhamento direto, considerando na modelagem o elemento sólido C3D8R. Para representar as chaves de cisalhamento na interface foram considerados o contato por superfície e dois critérios na interface foram adotados: o comportamento tangencial foi considerado na horizontal, com o valor do coeficiente de atrito adotado como sendo de 0,4 para ligação entre concreto e o valor da tensão de cisalhamento limite de 104 MPa, para indicar o início do deslizamento na interface; na vertical foi considerado o comportamento de contato coesivo de tração-separação elástica e evolução do dano, com o critério de máxima separação quadrática e evolução exponencial, cujo valor exponencial foi fixado como 2

e os demais valores de entrada no modelo, considerados pelo autor, estão apresentados na Tabela 6.3. A Figura 6.8 apresenta o comparativo dos resultados experimentais e numéricos obtidos pelos autores, na qual as respostas dos resultados foram bem compatíveis, tanto no que diz respeito ao deslocamento, a resistência ao cisalhamento máxima e os modos de falha, no entanto os mesmos citam que é necessário um estudo mais aprofundado sobre o uso do UHPC em juntas de construção.

Tabela 6.3 - Parâmetros adotados para modelar a superfície de contato vertical (Fonte: JANG et al., 2018)

Configuração da interface	Parâmetros de entrada (N, mm)		
	(k_{mn}, k_{ss}, k_{tt})	(t_n^0, t_s^0, t_t^0)	(δ_m^f)
Lisa	(490, 490, 490)	(0,7, 0,7, 0,7)	0,7
Com chave de cisalhamento	(980, 980, 980)	(1,4, 1,4, 1,4)	1,4

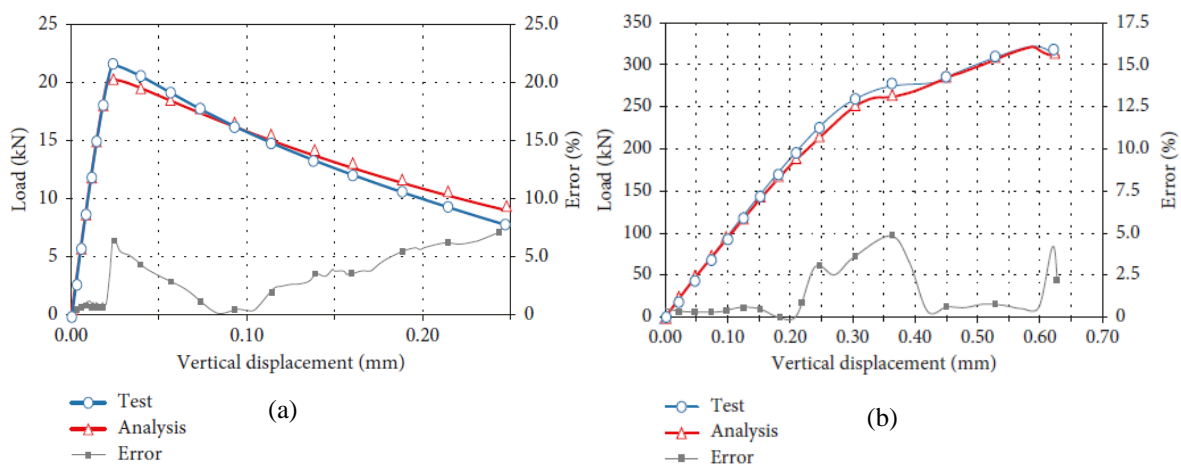


Figura 6.8 - Comparação entre os resultados analíticos e experimental: (a) interface lisa; (b) interface com chave de cisalhamento (Fonte: Jang, et al., 2018)

6.3 Parâmetros de entrada no modelo numérico no Abaqus®

6.3.1 CAR e Concreto Intermediário

Os parâmetros de entrada para o CAR no CDP estão apresentados na Tabela 6.4. Os mesmos parâmetros foram adotados para o Concreto Intermediário em virtude das propriedades mecânicas dos mesmos serem parecidas, diferenciando apenas pela presença das fibras.

Tabela 6.4 - Parâmetros de entrada do CAR para o CDP no Abaqus® (Fonte: LI, HAO E BI, 2017)

Parâmetro	Valor
ψ	30°
ε	0,1
$\sigma_{b0} / \sigma_{c0}$	1,1667
K_c	0,6667
μ	0.0001

Na resposta à compressão do CAR foi adotado os resultados obtidos experimentalmente, conforme apresentado na Figura 6.9. Como a diferença de resistência à compressão do CAR e do Concreto Intermediário foi de apenas 9 MPa, foi considerada a mesma curva de resistência à compressão versus deformação plástica do CAR para o concreto Intermediário.

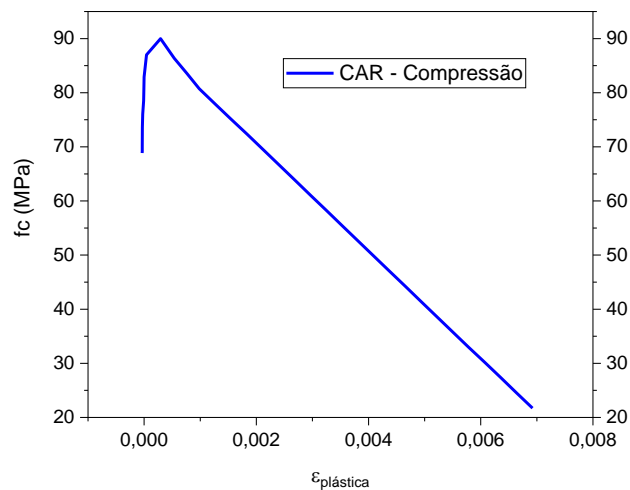


Figura 6.9 - Curva resistência à compressão versus deformação plástica para o CAR no Abaqus®

Em relação à curva resistência à tração direta versus deformação do CAR, foi considerada a resposta de rigidez bilinear proposto por Genikomsou e Polak (2016) baseado na energia de fratura (Figura 6.10), cujo valor encontrado experimentalmente foi de 0,139 N mm / mm². No sentido de minimizar a localização da fratura, a deformação de tração foi definida pela divisão do deslocamento da fissura (w) pela característica do comprimento do elemento ($l_c = 10$ mm). Para os elementos 2D

considerado no modelo numérico, a característica do comprimento foi adotada como sendo a raiz quadrada, diferente do proposto para os elementos 3D como a raiz cúbica do elemento.

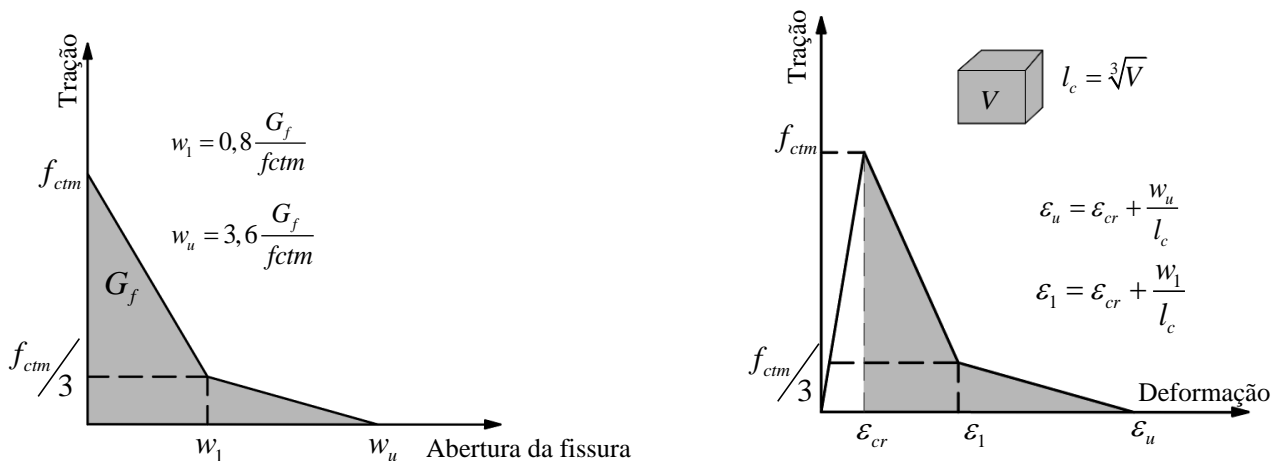


Figura 6.10 - Modelo proposto por GENIKOMSOU e POLAK (2015)

Os valores adotados para a confecção da curva resistência à tração direta versus deformação plástica para o CAR (Figura 6.11) estão apresentados na Tabela 6.5. As mesmas propriedades adotadas para o CAR foram consideradas para o concreto Intermediário.

Tabela 6.5 - Valores adotados para confecção da curva tração direta – deformação para o CAR

Parâmetro	Valor
f_{ctm} (MPa)	2,9 (58% $f_{ct,f}$)
ϵ_{pico}	6,17E-05
E_c (MPa)	45409,6
G_f (Nmm/mm ²)	0,139
w_1 (mm)	0,03
w_u (mm)	0,13

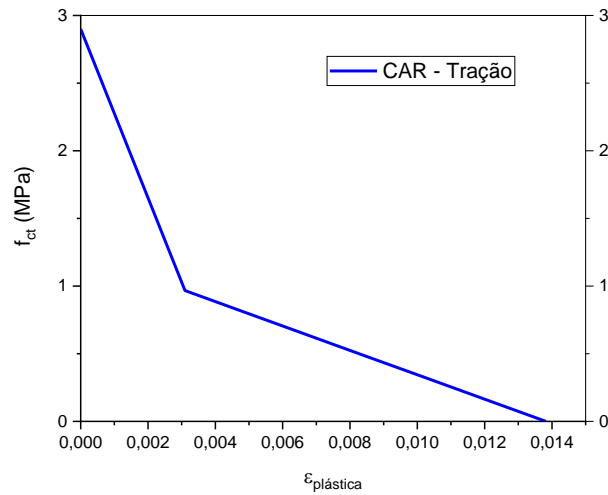


Figura 6.11 - Curva resistência à tração direta versus deformação plástica para o CAR no Abaqus®

6.3.2 UHPC

Os parâmetros de entrada no CDP para o UHPC estão apresentados na Tabela 6.6, a resposta do comportamento à compressão e tração para entrada no Abaqus® foi obtida através dos ensaios experimentais, apresentada na Figura 6.12. A curva de menor resistência à tração direta no ensaio experimental do UHPC (Figura 4.1.2 – UHPC 2-2) foi a que obteve a melhor correlação no ensaio de resistência à tração na flexão.

Tabela 6.6 - Parâmetros de plasticidade para o UHPC no Concrete Damage Plasticity no Abaqus® (Fonte: KRAHL, CARRAZEDO E EL DEBS, 2018)

Parâmetro	Valor
ψ	54°
ϵ	0.1
$\sigma_{b0} / \sigma_{c0}$	1,07
K_c	0.6667
μ	0.0001

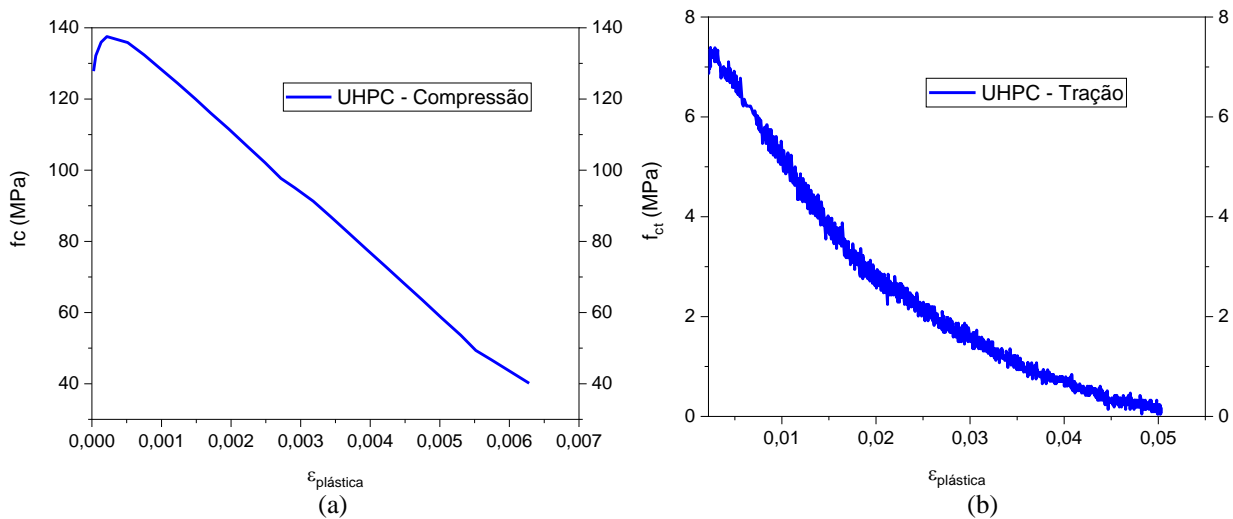


Figura 6.12 - Propriedades mecânicas do UHPC: (a) Resistência à compressão versus deformação plástica; (b) Resistência à tração direta versus deformação plástica

6.3.3 Geometria do modelo numérico

O comportamento mecânico do concreto foi modelado no software Abaqus[®]. Inicialmente realizou-se um estudo com modelos de elementos sólidos 3D e sólidos 2D. O elemento sólido 3D obteve um tempo de processamento maior, porém foi possível determinar os esforços em toda as direções (x,y,z). Já o elemento sólido 2D obteve um tempo de processamento menor e os esforços foram determinados apenas nas direções principais (x,y). Como os resultados experimentais foram medidos somente nas direções principais, adotou-se como padrão para modelagem dos ensaios o elemento sólido 2D, que obteve a mesma resposta que o modelo com elemento sólido 3D.

No modelo numérico as estruturas foram criadas em partes separadas adotando o modelo 2D deformável, sendo uma parte constituída pelas propriedades dos materiais referente ao CAR e a outra parte feita com as propriedades dos materiais referentes ao UHPC. Para a criação da seção foi considerado o elemento sólido homogêneo com a espessura no estado plano de tensões de 150 mm, referente a profundidade do corpo de prova. A associação das partes feitas separadamente se deu pela interface. O tamanho da malha do elemento finito foi de 10 mm (Figura 6.13), valor adotado com base em vários testes, que foi o que obteve melhor resultado. A ordem geométrica do elemento foi linear, considerando o estado plano de tensão com integração reduzida (CPS4R).

A aplicação do carregamento foi feita através do controle de deslocamento e as condições de apoio utilizadas foram baseadas nos ensaios realizados (Figura 6.14).

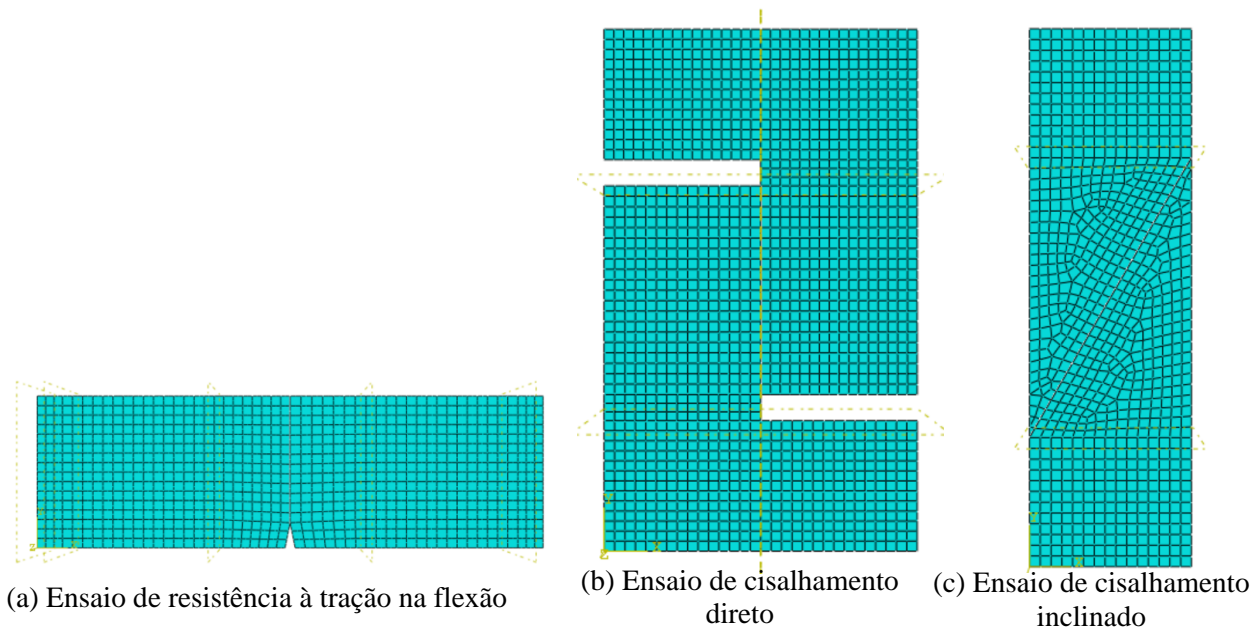


Figura 6.13 - Imagem da malha de elementos finitos para os ensaios modelados

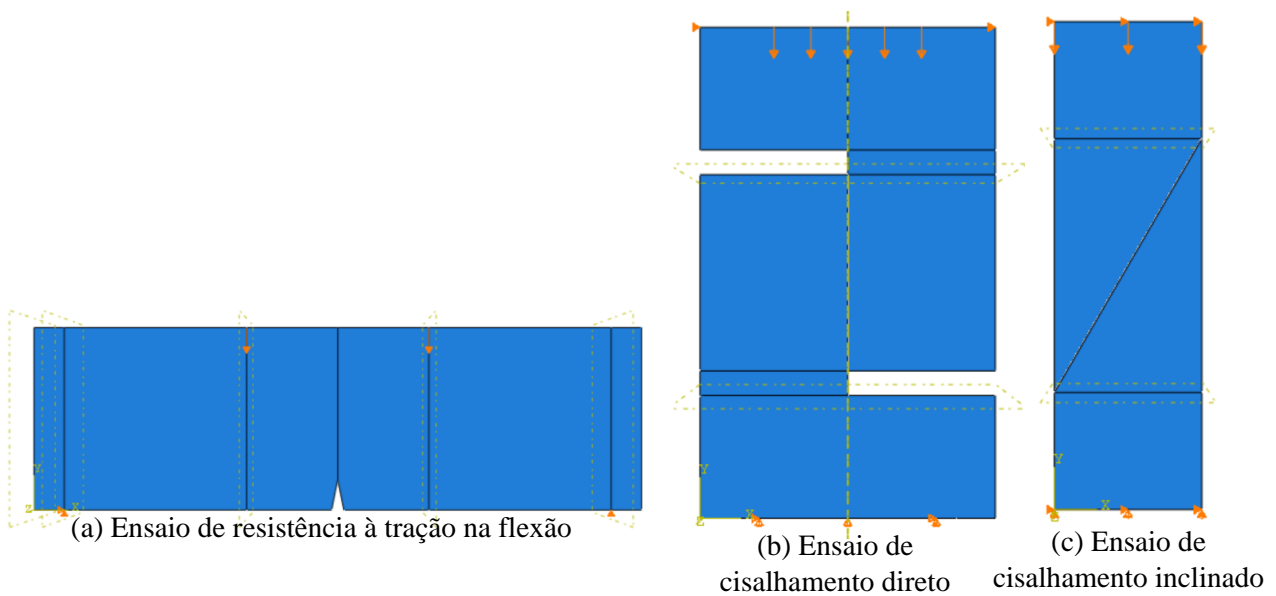


Figura 6.14 - Imagem das condições de apoio para os ensaios modelados

6.3.4 Interface

Para a interface foi considerado o contato superfície a superfície. Na propriedade de interação do comportamento coesivo foi empregado o critério de tração separação desacoplado considerando o coeficiente de rigidez na direção normal, K_{nn} , obtido do ensaio de resistência à tração na flexão por apresentar melhor representatividade, e o coeficiente de rigidez na direção tangencial, K_{ss} e K_{tt} , determinado do ensaio de cisalhamento direto. No dano foi empregado o critério de

máxima tensão nominal, com os valores de entrada obtidos dos resultados experimentais: resistência à tração na flexão ($f_{ct,f}$) e tensão de cisalhamento última (τ_{ultima}).

Na modelagem da interface a espessura considerada no estado plano de tensão, determinada na geometria do modelo numérico, tem influência, pois como os parâmetros da interface são regidos pela força e deslocamento, isso sofre variação ao longo da espessura. Para os modelos apresentados, a espessura no estado plano de tensão foi considerada com o valor unitário e os parâmetros de entrada na interface foram os resultados obtidos experimentalmente, conforme apresentado na Tabela 6.7. Caso tivesse considerado a espessura dos modelos na geometria do estado plano de tensão, os parâmetros de rigidez e as tensões teriam que ser multiplicadas por essa mesma espessura. Os valores de k_{nn} , k_{ss} e k_{tt} para algumas das interfaces foram tidas iguais, porque estatisticamente não houve diferença de resultados, conforme apresentado na Tabela 4.1 e Tabela 4.4.

Os resultados das forças obtidas na resposta do modelo numérico tiveram que ser multiplicados pela espessura do prisma (150 mm) para compatibilizar com o resultado da força obtida experimentalmente.

O critério de evolução do dano foi o deslocamento plástico, cujo valor de entrada esta apresentado na Tabela 6.7. Esse critério só foi empregado na modelagem do ensaio de resistência a tração na flexão, na qual foi possível obter o comportamento pós-pico. No ensaio de resistência ao cisalhamento direto e no ensaio de resistência ao cisalhamento inclinando a curva experimental foi até a força de ruptura, na qual a parcela do dano não foi mobilizada, por isso que a mesma não foi considerada.

Pode-se notar que os resultados dos parâmetros de caracterização da interface apresentados na Tabela 6.7 destoam dos resultados obtidos por Jang et al. (2018) (Tabela 6.3).

Em relação ao coeficiente de atrito, no ensaio de resistência à tração na flexão e no ensaio de cisalhamento direto o mesmo não foi mobilizado, por isso não foi considerado como propriedade na interface. No ensaio de cisalhamento inclinado foram feitos testes com o coeficiente de atrito e sem o coeficiente de atrito na interface e percebeu-se que o mesmo não influenciou no resultado da força de ruptura, logo não foi adotado na modelagem.

No ensaio de resistência à tração na flexão os parâmetros k_{ss} e k_{tt} não influenciaram nos resultados, por isso os mesmos não foram considerados. Quanto ao ensaio de resistência ao cisalhamento direto, o parâmetro K_{nn} não influenciou no valor final e o mesmo não foi adotado.

Tabela 6.7 - Valores de entrada na caracterização da interface no critério tração-separação Abaqus®

Interface	K_{nn} (N/mm ³)	$K_{ss} = K_{tt}$ (N/mm ³)	$f_{ct,f}$ (N/mm ²)	τ_{ultima} (N/mm ²)	$\delta_{plastico}$	Parâmetro exponencial
R	241,4	161,5	4,2	6,6	0,016	1,2
A	241,4	161,5	4,2	6,6	0,016	1,2
T	241,1	161,5	4,2	6,6	0,016	1,2
In	241,1	530,0	4,2	5,4	0,005	1,2
J	323,0	419,1	2,4	7,7	0,013	1,2
C	99,3	161,5	2,0	7,0	0,008	1,2

6.4 Análise dos resultados

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

6.4.1 Calibração dos concretos

Para validação das propriedades dos concretos, CAR e UHPC, realizou-se a simulação do modelo monolítico prismático do ensaio de resistência à tração na flexão. A Figura 6.15 apresenta os resultados da reação de apoio versus deslocamento dos nós analisados no modelo numérico comparado com os resultados obtidos experimentalmente.

De acordo com os resultados obtidos na Tabela 6.8 a diferença da força de ruptura do resultado numérico e experimental para o CAR e o UHPC foi de 3% e 0%, respectivamente. Isso indica que as propriedades dos materiais inseridas no modelo numérico estão bem representadas. Não houve diferença no deslocamento do clip do resultado numérico e experimental para o CAR. Para o UHPC a diferença de deslocamento do clip obtida do modelo numérico e experimental foi de 25% devido ao efeito das fibras.

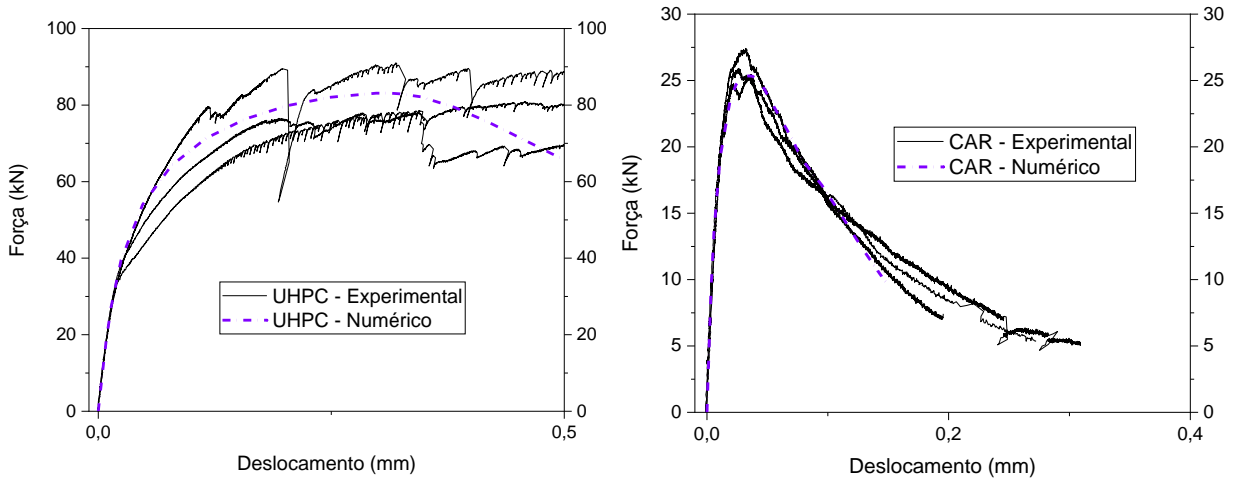


Figura 6.15 - Curva força versus deslocamento dos resultados experimentais e numéricos para o ensaio de resistência à tração na flexão - corpo de prova monolítico

Tabela 6.8 - Comparação dos resultados numérico e experimental para o ensaio de resistência à tração na flexão – corpo de prova monolítico

Interface	$F_{ruptura}$ - experimental (kN)	$F_{ruptura}$ - numérico (kN)	$F_{numérico} / F_{experimental}$	Deslocamento Clip - experimental	Deslocamento Clip - numérico	$Clip_{numérico} / Clip_{experimental}$
CAR	26,26	25,36	0,97	0,03	0,03	1,0
UHPC	83,8	83,13	1,0	0,54	0,4	0,75

6.4.2 Ensaio de resistência à tração na flexão

A Figura 6.16 exibe a forma de ruptura obtido no modelo numérico para o ensaio de resistência à tração na flexão, indicando os nós analisados nos resultados dos deslocamentos.

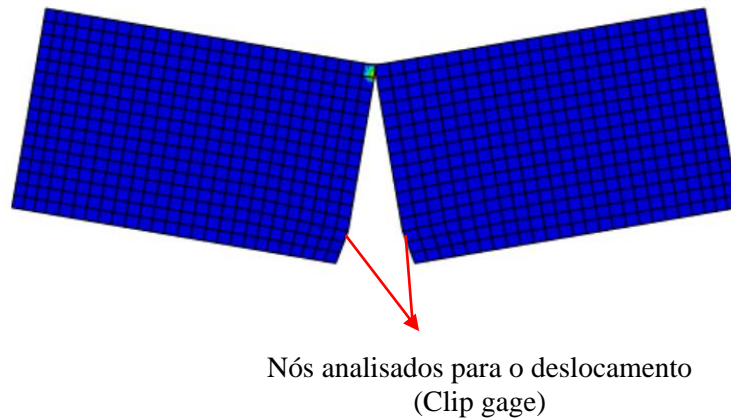


Figura 6.16 - Critério de ruptura no modelo numérico para o ensaio de resistência à tração na flexão

A Figura 6.17 e Figura 6.18 apresenta os resultados das reações dos apoios versus deslocamento dos nós analisados no modelo numérico comparado com os resultados obtidos experimentalmente, mostrando o comportamento pós-pico e a evolução do dano exponencial. Para as interfaces Agregado exposto (A), Referência (R), Tela (T) e Intermediária-fibra (In), que foram considerados os mesmos valores das propriedades das interfaces, as curvas obtidas numericamente foram bem parecidas com as curvas obtidas experimentalmente, exceto para a interface Tela, cujo valor de pico foi relativamente maior.

Quanto ao comportamento pós-pico, para as interfaces A e T o modelo numérico conseguiu reproduzir o resultado experimental. Na interface R o parâmetro do dano não foi representativo, em virtude da ruptura brusca, e na interface In a presença das fibras expostas teve atuação no comportamento pós-pico, por isso que o modelo numérico não conseguiu ter essa representação quando comparado com o modelo experimental.

Nas interfaces Jato de areia (J) e Chave de cisalhamento (C), que foram considerados os seus próprios valores nas propriedades da interface, o comportamento de pico foi bem retratado, porém o pós-pico não houve boa caracterização, conforme pode ser visto na Figura 6.18.

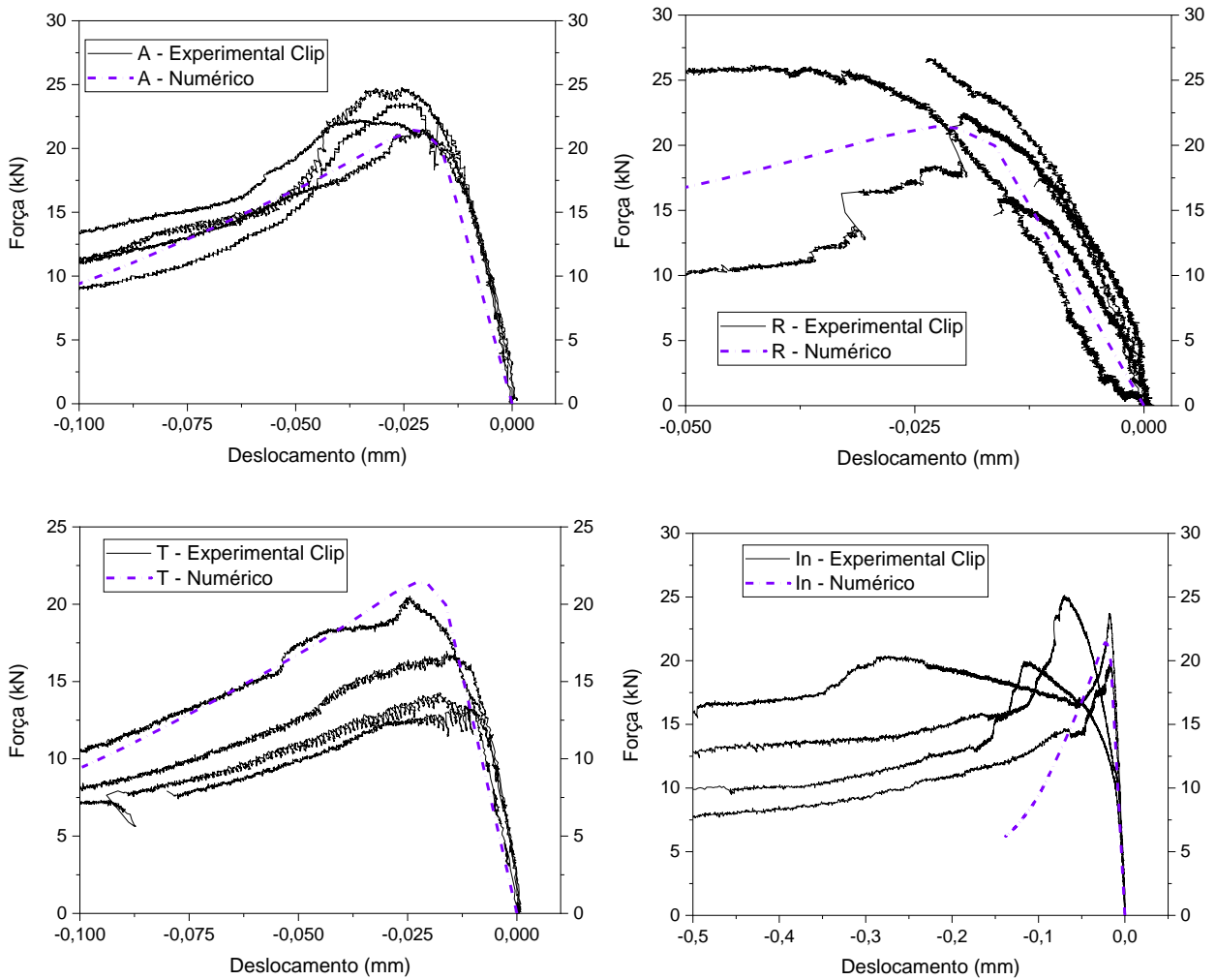


Figura 6.17 - Curva força versus deslocamento dos resultados experimentais e numéricos – resistência à tração na flexão das interfaces com parâmetros agrupados

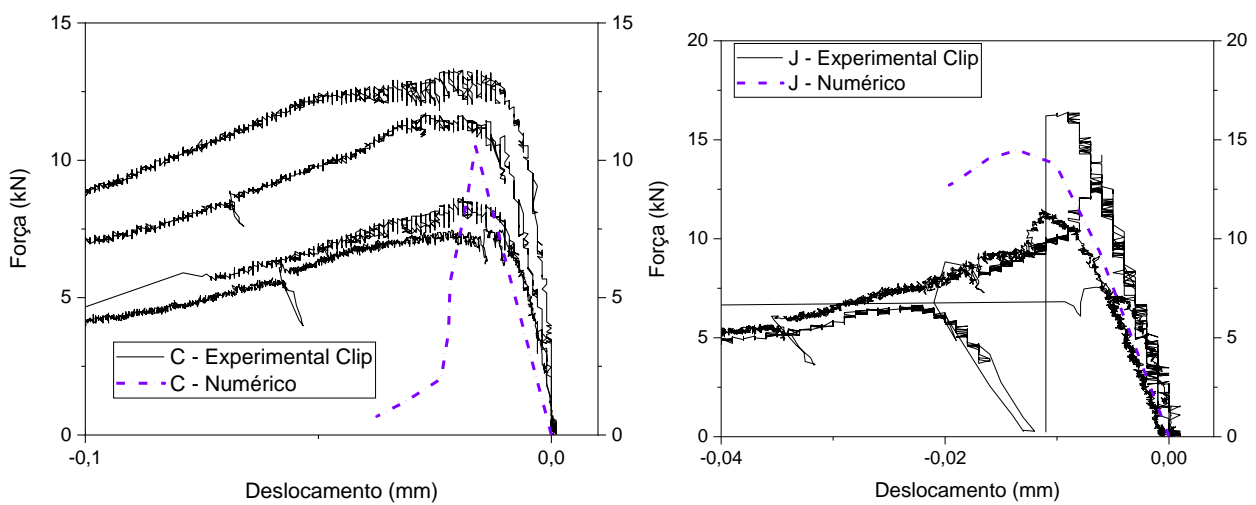


Figura 6.18 - Curva força versus deslocamento dos resultados experimentais e numéricos – resistência à tração na flexão das interfaces com parâmetros individualizados

A Tabela 6.9 apresenta os resultados comparativos dos valores obtidos experimentalmente e numericamente para o ensaio de resistência à tração na flexão. As interfaces que obtiveram a melhor aproximação da força de ruptura do comportamento numérico em relação ao experimental foram a Agregado exposto (A), Intermediária – fibra (In), Referência (R), e Chave de cisalhamento (C), com uma variação máxima de 6%. As interfaces Tela (T) e Jato de areia (J) foram as que obtiveram a menor representatividade, com uma diferença de 30% e 15% respectivamente do modelo numérico para o experimental. Em relação aos deslocamentos obtidos numericamente e experimentalmente, as interfaces Agregado exposto (A) e Chave de cisalhamento (C) obtiveram a melhor expressão e as interfaces Jato de areia (J) e Intermediária-fibra (In) obtiveram a menor representação.

Tabela 6.9 - Comparação dos resultados numérico e experimental para o ensaio de resistência à tração na flexão - corpo de prova com interface

Interface	$F_{ruptura} -$ experimental (kN)	$F_{ruptura} -$ numérico (kN)	$F_{numérico} /$ $F_{experimental}$	Deslocamento Clip - experimental	Deslocamento Clip - numérico	$Clip_{numérico} /$ $Clip_{experimental}$
A	22,7	21,3	0,94	-0,02	-0,02	1,00
In	22,1	21,3	0,96	-0,05	-0,02	0,4
R	21,7	21,3	0,98	-0,017	-0,02	1,2
T	16,4	21,3	1,3	-0,016	-0,02	1,25
J	12,5	14,4	1,15	-0,008	-0,013	1,6
C	10,3	10,5	1,01	-0,02	-0,02	1,0

6.4.3 Ensaio de resistência ao cisalhamento direto

A Figura 6.19 apresenta a forma de ruptura obtido no modelo numérico para o ensaio de cisalhamento direto, indicando os nós analisados nos resultados dos deslocamentos. Na Figura 6.20 mostra o resultado típico da interface Agregado exposto para o deslocamento na horizontal (TD4), justificando o posicionamento dos apoios horizontais na parte superior para evitar a queda brusca do corpo de prova. Esses apoios não geraram um travamento rígido na horizontal, por isso que a curva numérica e experimental exhibe esse deslocamento.

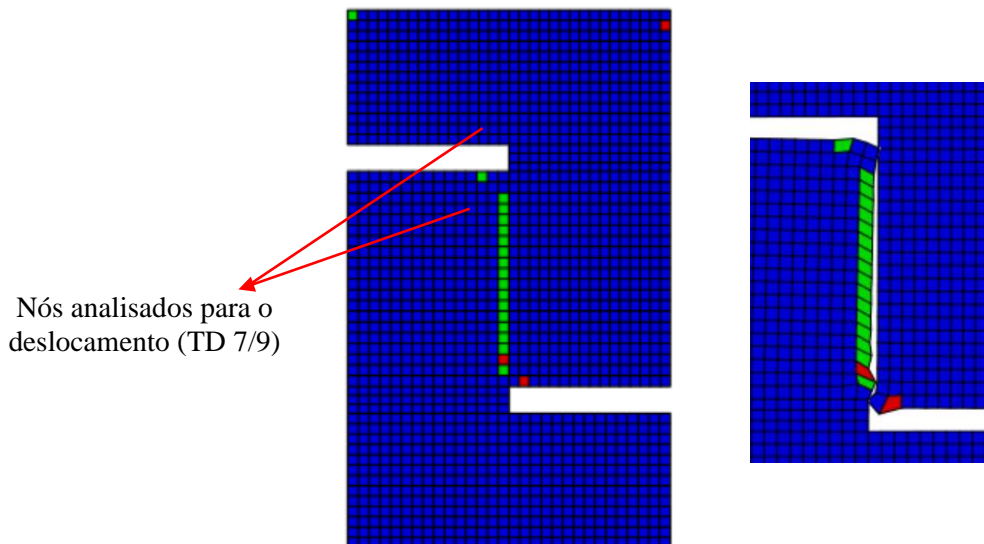


Figura 6.19 - Critério de ruptura no modelo numérico para o ensaio de cisalhamento direto

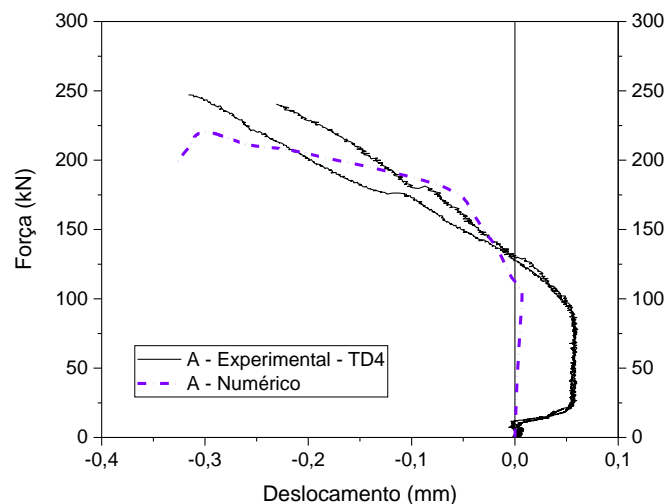


Figura 6.20 - Resultado de Força versus deslocamento do TD4 da interface Agregado exposto para o posicionamento dos apoios fixos na horizontal nas extremidades

Os resultados da reação do apoio versus deslocamento dos nós analisados no modelo numérico, comparado com os resultados obtidos experimentalmente referente aos transdutores de deslocamento 7 e 9, são mostrados na Figura 6.21 e Figura 6.22. Para as interfaces Agregado exposto (A), Referência (R), Tela (T) e Chave de cisalhamento (C), que foram considerados os mesmos valores das propriedades das interfaces, as curvas obtidas numericamente foram bem parecidas com as curvas obtidas experimentalmente, exceto para a interface A e J, cujo valor de pico foi relativamente menor, porém as mesmas conseguiram representar o resultado experimental no trecho ascendente.

Nas interfaces Jato de areia (J) e Intermediária-fibra (In), que foram considerados os seus próprios valores nas propriedades da interface, o comportamento de pico foi bem retratado (Figura 6.22).

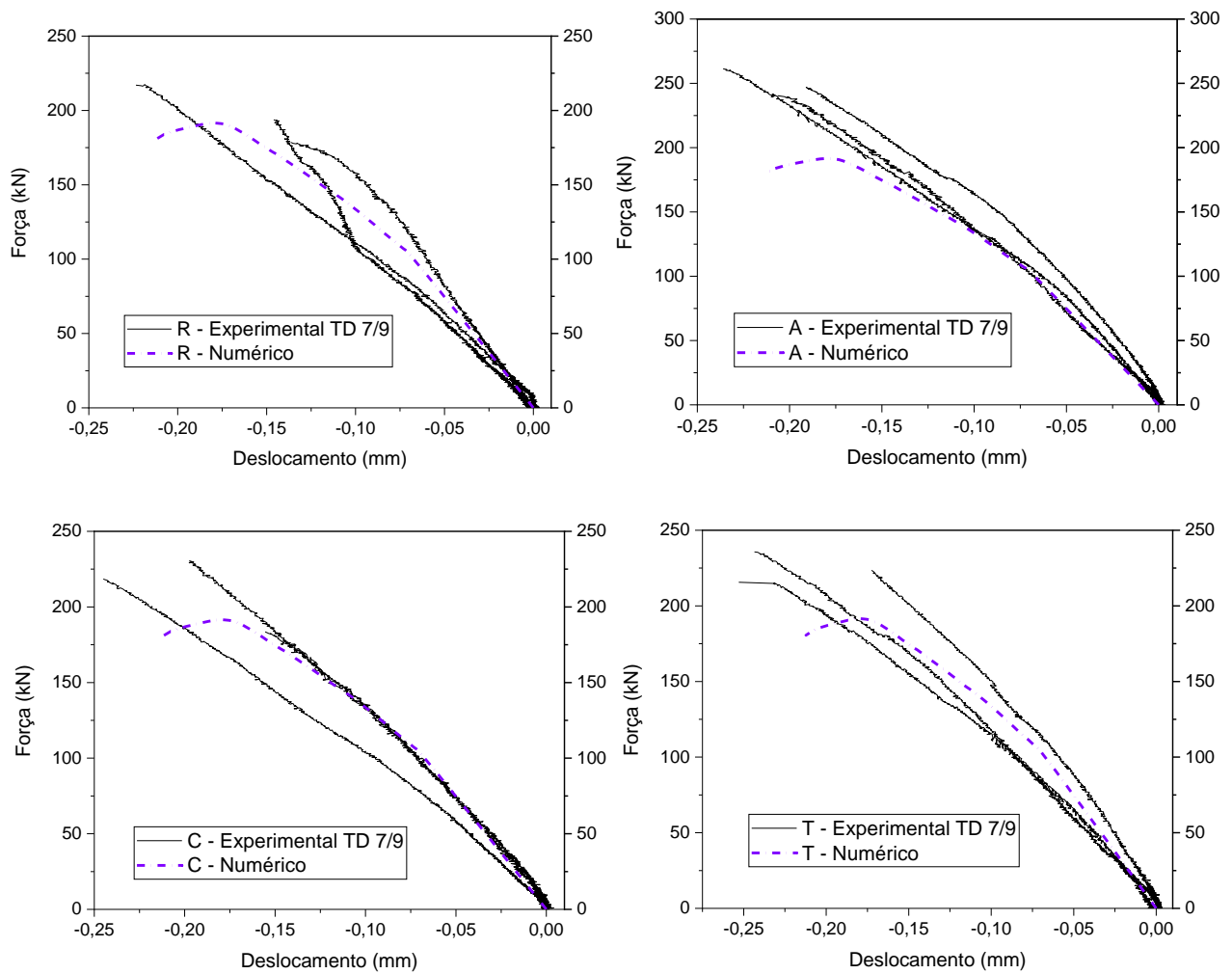


Figura 6.21 - Curva força versus deslocamento dos resultados experimentais e numéricos – resistência ao cisalhamento direto das interfaces com parâmetros agrupados

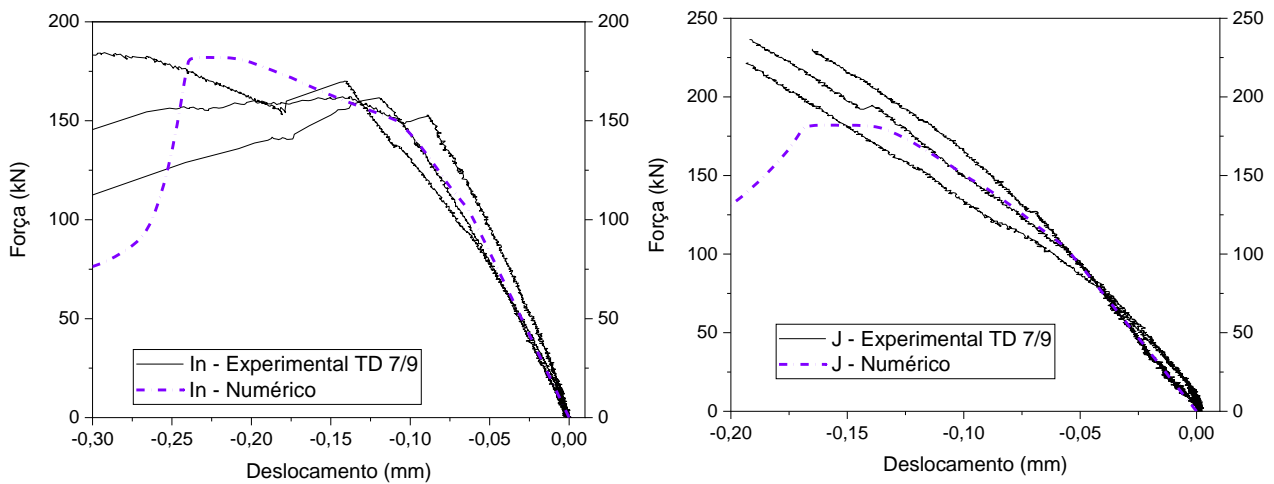


Figura 6.22 - Curva força versus deslocamento dos resultados experimentais e numéricos – resistência ao cisalhamento direto das interfaces com parâmetros individualizados

A Tabela 6.10 apresenta os resultados comparativos dos valores obtidos experimentalmente e numericamente para o ensaio de cisalhamento direto. As interfaces que obtiveram a melhor aproximação da força de ruptura do comportamento numérico em relação ao experimental foram a Referência (R) e Chave de cisalhamento (C), com uma variação máxima de 9%. A interface Agregado exposto (A) foi a de menor representatividade do modelo numérico para o experimental em relação a força de ruptura, 33%.

Quanto as deformações numérica e experimental, as interfaces C e J tiveram uma boa correspondência e as interfaces A e In foram as que refletiram as maiores diferenças.

Tabela 6.10 - Comparação dos resultados numérico e experimental para o ensaio de resistência ao cisalhamento direto

Interface	$F_{ruptura}$ - experimental (kN)	$F_{ruptura}$ - numérico (kN)	$F_{numérico} / F_{experimental}$	TD 7/9 (mm) - experimental	TD 7/9 (mm) - numérico	$TD_{numérico} / TD_{experimental}$
R	196,46	191,6	0,98	-0,169	-0,18	1,23
A	249,60	191,6	0,77	-0,211	-0,18	1,5
T	224,95	191,6	0,85	-0,223	-0,18	0,95
C	210,87	191,6	0,91	-0,199	-0,18	1
J	229,60	182,0	0,80	-0,183	-0,16	1
In	160,78	182,0	1,13	-0,119	-0,24	2,0

6.4.4 Resistência ao cisalhamento inclinado

A Figura 6.23 apresenta o critério de ruptura obtido no modelo numérico para o ensaio de cisalhamento inclinado, indicando os nós analisados nos resultados das deformações.

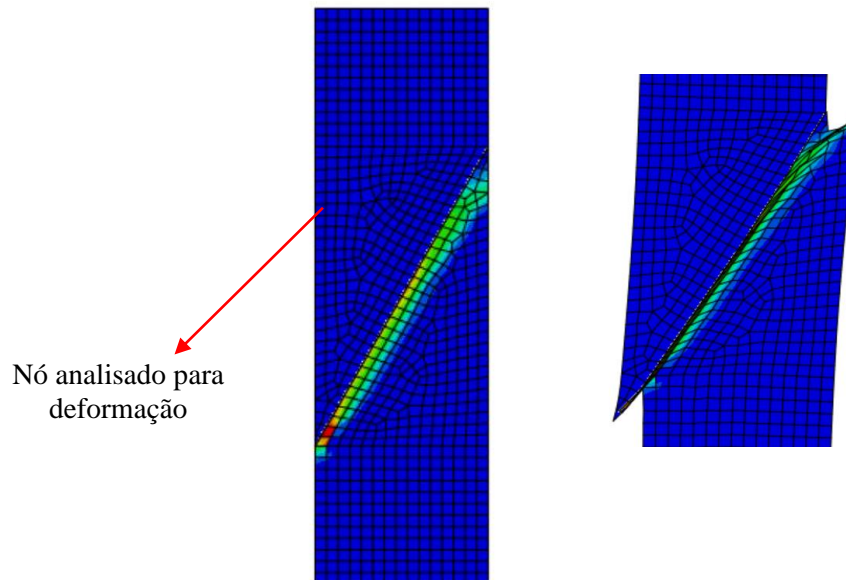


Figura 6.23 - Critério de ruptura no modelo numérico para o ensaio de cisalhamento inclinado

A Figura 6.24 e Figura 6.25 mostra os resultados da reação do apoio versus deformação dos nós analisados no modelo numérico comparado com os resultados obtidos experimentalmente referente à análise de imagem. Nota-se que não foi possível alcançar o comportamento pós-pico, pois a ruptura foi frágil quando o modelo atingiu a carga máxima. As interfaces Tela (T), Agregado exposto (A) e Referência (R), que foram considerados os mesmos valores das propriedades das interfaces, descreveram um comportamento numérico e experimental parecidos. Em relação as interfaces com os parâmetros individualizados, o comportamento numérico e experimental obteve uma variação significativa.

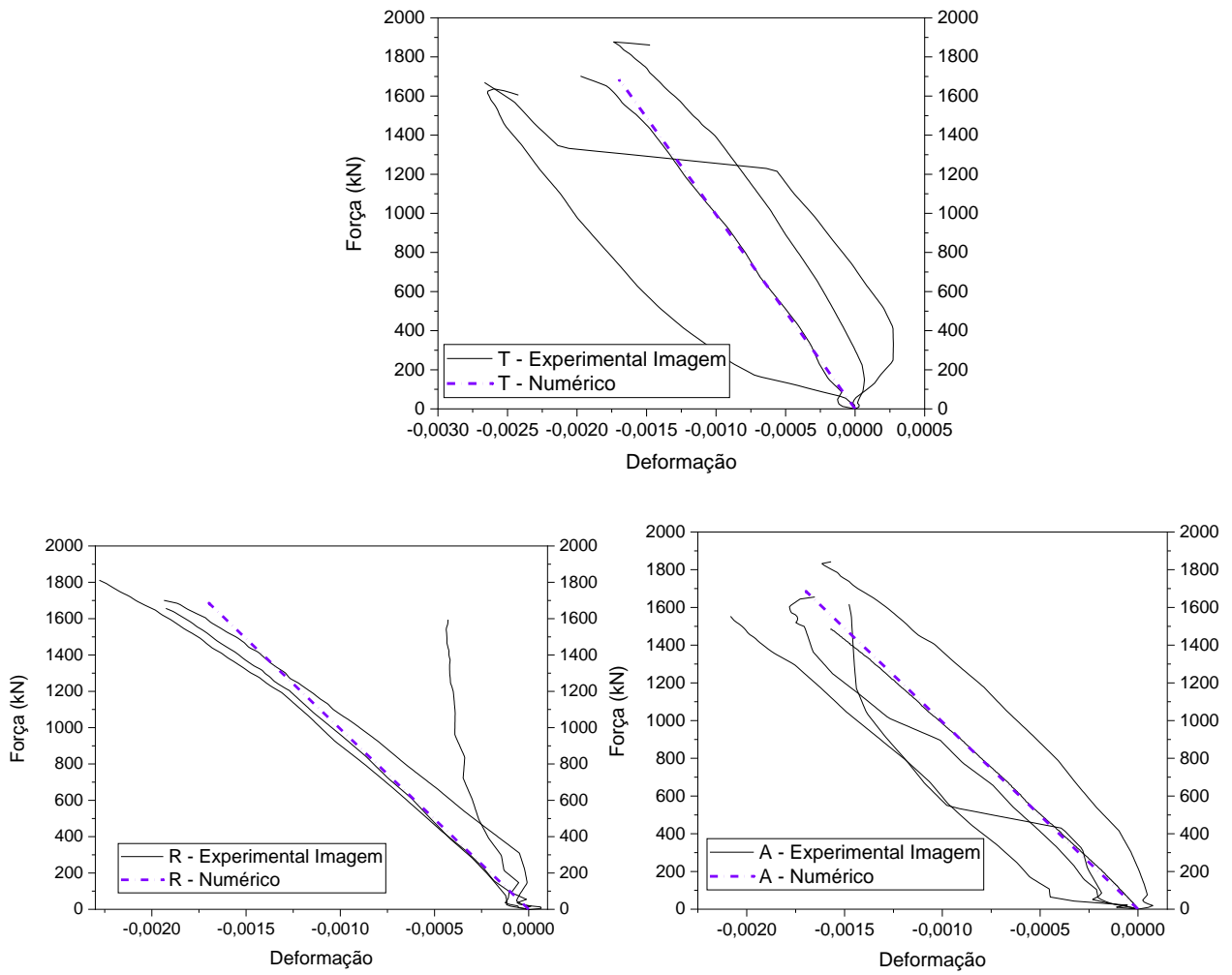


Figura 6.24 - Curva força versus deslocamento dos resultados experimentais e numéricos – resistência ao cisalhamento inclinado das interfaces com parâmetros agrupados

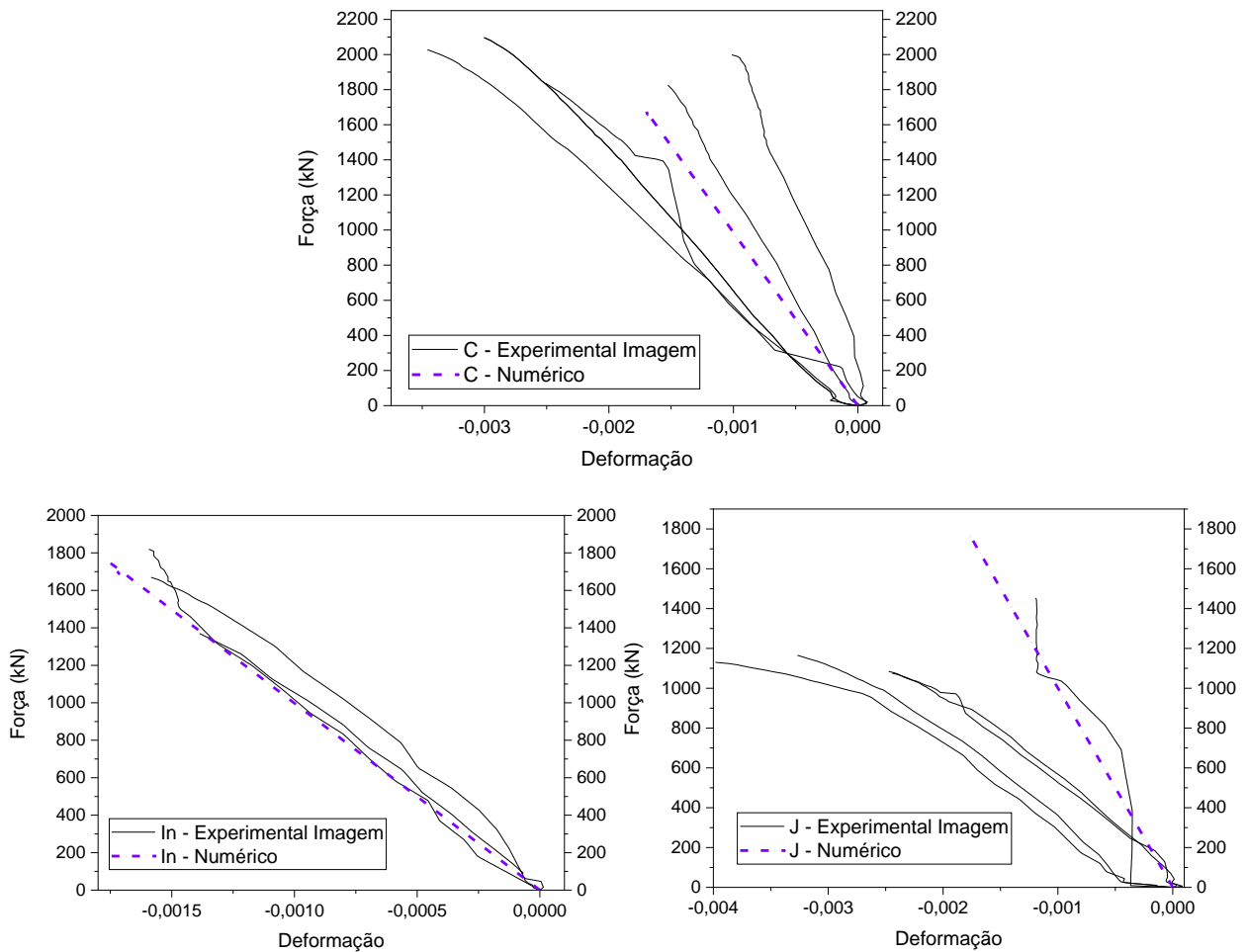


Figura 6.25 - Curva força versus deformação dos resultados experimentais e numéricos – resistência ao cisalhamento inclinado das interfaces com parâmetros individualizados

A Tabela 6.11 apresenta os resultados comparativos dos valores obtidos experimentalmente e numericamente para o ensaio de cisalhamento inclinado. As interfaces que apresentaram o melhor comportamento em relação à força de ruptura do modelo numérico e experimental foi a interface Tela, 5%, e a interface Referência, 3%. A interface que obteve menor representatividade na força de ruptura numericamente e experimentalmente foi a interface Chave de cisalhamento (C), com uma diferença de 16% e a interface Jato de areia, 57%. Essas interfaces foram as que obtiveram as maiores diferenças nos valores das deformações obtidas experimentalmente e numericamente.

Tabela 6.11 - Comparação dos resultados numérico e experimental para o ensaio de resistência ao cisalhamento inclinado

Interface	$F_{ruptura}$ - experimental (kN)	$F_{ruptura}$ - numérico (kN)	$F_{numérico} / F_{experimental}$	ε Correli	ε numérico	$\varepsilon_{numérico} / \varepsilon_{Correli}$
T	1768,02	1679,9	0,95	0,0022	0,0017	0,77
A	1761,40	1679,9	0,95	0,0019	0,0017	0,90
R	1625,69	1679,9	1,03	0,0017	0,0017	1
In	1582,03	1748,9	1,1	0,0015	0,0018	1,2
C	1998,32	1686,0	0,84	0,0023	0,0016	0,7
J	1122,74	1764,4	1,57	0,0027	0,0014	0,52

7. CONCLUSÕES

Neste estudo, o comportamento da interface do concreto pré-moldado de alta resistência (CAR) e o concreto de ultra alta resistência com fibras (UHPC) foi investigado. Diferentes tipos de superfícies no concreto pré-moldado foram considerados: Agregado exposto (A), Chave de cisalhamento (C), Jato de areia (J), Tela de aço expandida (T), Referência (R) feita com a própria fôrma de madeira e Intermediária – fibra (In). Para quantificar as rugosidades das interfaces foram feitas medições em laboratório e, na determinação da resistência e análise da transferência dos esforços, foram realizados os ensaios de resistência: tração na flexão, cisalhamento direto, cisalhamento inclinado e tração por compressão diametral. De posse das resistências e dos deslizamentos medidos experimentalmente na interface foram determinados os parâmetros de rigidez a serem usados na modelagem numérica em elementos finitos para representar as interfaces estudadas.

Quanto à confecção das superfícies feitas no CAR, atenção especial foi dada para a superfície Jato de areia, na qual o serviço de jateamento precisou ser executado nas idades iniciais do concreto, quando apresentava menor resistência. Tal situação ocorreu também com a interface Intermediária – fibra (In), onde o apicoamento manual para exposição das fibras foi realizada mais facilmente nas primeiras idades. O procedimento adotado para expor os agregados na superfície com aplicação do aditivo retardador de pega foi realizado com facilidade.

O método da medição por coordenadas foi o mais eficiente para caracterizar a rugosidade das superfícies analisadas, embora o método da mancha de areia, de execução mais simples, também tenha sido expressivo. Ambos os ensaios forneceram resultados semelhantes do parâmetro R_z , que foi considerado o mais apropriado para representar a rugosidade da superfície. A rugosidade determinada por medição por coordenadas se apresentou de forma decrescente para as interfaces Tela (T), Agregado exposto (A), Jato de areia (J) e Referência (R). Os diferentes indicadores de rugosidade obtidos por esta técnica mostraram resultados compatíveis entre si.

A resistência à tração na flexão obtida com as superfícies Agregado exposto (A) e Intermediária - fibra (In) foi estatisticamente igual à da superfície Referência (R) e da ordem de 84% da obtida no ensaio do prisma monolítico de CAR. As resistências obtidas para as demais superfícies (T, J e C) foram inferiores à superfície Referência (R) e à do prisma monolítico. As rigidezes normais de interface obtidas no ensaio de flexão foram estatisticamente iguais para as superfícies A, R, T e J. A rigidez obtida para as interfaces C e In foi significativamente inferior. Não houve uma correlação clara entre a rugosidade, resistência e rigidez neste ensaio.

Da mesma forma que no ensaio de flexão, no ensaio de tração por compressão diametral nenhum tipo de superfície atingiu resistência maior ou igual à do corpo de prova monolítico CAR. As superfícies T, J e C apresentaram resistência superior à da Referência (R) e da ordem de 91% da obtida em corpos de prova monolíticos. A resistência à tração das demais superfícies foi estatisticamente igual à da Referência e da ordem de 75% da obtida do corpo de prova monolítico. Neste caso, notou-se que houve maior correlação entre a rugosidade da superfície e a resistência, com exceção da superfície Agregado exposto (A) que apresentou resistência abaixo da esperado.

No ensaio de cisalhamento direto observou-se que as superfícies A, J, T e C obtiveram resistência no mínimo igual ou superior à superfície Referência (R). As três primeiras apresentaram resistência superior à do elemento monolítico moldado em CAR. Neste caso houve uma boa correlação de rugosidade e resistência. Neste caso houve uma boa correlação entre rugosidade e resistência. A única superfície com resistência menor que à Referência (R) foi a Intermediária – fibra (In) (da ordem de 72% da obtida no caso monolítico). A rigidez tangencial da interface A e C foi semelhante à de referência (R). Já para as superfícies In, J e T, a rigidez tangencial foi significativamente superior à da Referência (R).

No caso do ensaio de cisalhamento inclinado, com exceção da interface obtida com Jato de areia (J), as demais superfícies (C, T, A e In) permitiram que a resistência obtida fosse no mínimo estatisticamente igual ou superior à da Referência (R). Além disso, todas as superfícies apresentaram resistência comparável ou superior à do corpo de prova monolítico CAR, com exceção da obtida com Jato de areia (J)

As medições feitas pela Correlação de Imagem Digital foram coerentes com as medições realizadas pelos transdutores de deslocamento indicando que, mesmo com os ruídos presentes nos resultados, o método pode ser empregado para medições de corpo de prova com pequenos deslocamentos e rigidez elevada.

Os parâmetros de rigidez na direção normal e tangencial conseguiram ter boa correlação do comportamento experimental no modelo numérico. Para todos os modelos numéricos estudados, a melhor representatividade com o comportamento experimental foi de 95% e a menor representação foi de 70%, obtida no ensaio de resistência à tração na flexão.

A resistência à tração na flexão e a resistência à tração por compressão diametral na interface do CAR e o UHPC foram inferiores à resistência das amostras monolíticas de CAR utilizadas para comparação. Não houve correlação clara entre a rugosidade da superfície e a resistência à tração na interface dos concretos, especialmente no ensaio de resistência à tração na flexão. Nos ensaios de resistência ao cisalhamento direto e cisalhamento inclinado, os valores de resistência para a

superfície Agregado exposto (A) foram 10% superior ao modelo monolítico CAR. Isso indica que para esses ensaios a rugosidade influenciou na resistência. Notou-se que o efeito combinado da tensão normal e tensão tangencial no ensaio de cisalhamento inclinado aumentou a resistência da interface em relação aos ensaios mobilizados por um único esforço solicitante.

De modo geral a escolha do tipo de superfície depende do esforço predominante na interface. A interface Agregado exposto (A) e Referência (R) foram as que obtiveram os melhores desempenhos dos ensaios de resistência realizados para a força de ruptura. No entanto o modo de ruptura para a superfície R foi mais frágil que a superfície A. A presença das fibras na interface auxiliou no comportamento pós-pico na interface Intermediária-fibra (In). Já a interface Jato de areia (J) foi a que obteve os menores valores de resistência dos ensaios realizados

7.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se elencar os seguintes itens:

1 - Fazer um estudo com outros ângulos de inclinação no ensaio de resistência ao cisalhamento inclinado para analisar a influência dos resultados.

2 - Investigar a contribuição do coeficiente de atrito no ensaio de resistência ao cisalhamento direto com aplicação da força normal em diferentes intensidades, perpendicular à interface.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AALETI, S.; SRITHARAN, S.; **Investigation of a Suitable Shear Friction Interface between UHPC and Normal Strength Concrete for Bridge Deck Applications**. Report from: Bridge Engineering Center and Institute for Transportation Iowa State University. Federal Highway Administration Iowa Department of Transportation (InTrans Project 10-379). Final report, maio 2017.

ACI - AMERICA CONCRETE INSTITUTE. Committee 363. **Report on High-Strength Concrete**. Detroit: American Concrete Institute, 2010.

AÏTCIN, P-C. **Binders for durable and sustainable concrete**. Ney York: Taylor & Francis e-Library, 2008.

ALFERES FILHO, R. S.; MONTE, R.; FIGUEIREDO, A. D. **Avaliação do grau de orientação de fibras de aço induzida na moldagem de elementos planos com concreto autoadensável**. Revista Matéria, v.24, n.2, 2019.

ARAÚJO, D. L. **Cisalhamento entre viga e laje pré-moldada ligadas mediante nichos preenchidos com concreto de alto desempenho**. 2002. 319 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

ASSAN, A. E. **Método dos elementos finitos**. Unicamp: Edição Engenharia, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4287**: Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Termos, definições e parâmetros de rugosidade. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4288**: Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais — Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto - Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, 2017. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142**: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16504** - Misturas asfálticas — Determinação da profundidade média da macrotextura superficial de pavimentos asfálticos por volumetria — Método da mancha de areia - Especificação. Rio de Janeiro, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C293 / C293 M**. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading), **2016**

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C882** Standard Test Method for Bond Strength of Epoxy-Resin Systems Used With Concrete By Slant Shear. West Conshohocken, 2013. 4 p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1609** Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading). West Conshohocken, 2013. 9 p.

AUSTIN, S.; ROBINS, P.; PAN, Y. **Shear bond testing of concrete repairs**. Cement and Concrete Research 29, 1999. p. 1067–1076

BENTUR, A. MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. Londres e Nova York: Taylor & Francis Group, 2007.

BESNARD, G.; HILD, F.; ROUX, S. **“Finite-Element” Displacement Fields Analysis from Digital Images: Application to Portevin-Le Châtelier Bands**. Experimental Mechanics 46, 2006. p. 789-803.

CANHA, R. M. F. **Estudo teórico-experimental da ligação pilar-fundação por meio de cálice em estruturas de concreto pré-moldado**. 2004. 309 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

CANTELI, A. F.; CASTAÑÓN, L.; NIETO, B.; LOZANO M. **Determining fracture energy parameters of concrete from the modified compact tension test**. Fracture and Structural Integrity related Issues, 30, 2014). p. 383-393.

CARREIRA, D. J.; CHU, K. H. **Stress-Strain relationship for plain concrete in compression**. Technical paper ACI Journal, November-December, 1985.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **CEB – FIP – MODEL CODE 1990**. London: Thomas Telford, 1993.

“Disponível em: <https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEITNRefMap/simaitn-cohesivebehavior.htm>”. Acessado em: março de 2020.

EL DEBS, M. K. **Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2017

ESPECHE, A; LEÓN, J. **Estimation of bond strength envelopes for old-to-new concrete interfaces based on a cylinder splitting test**. Construction and Building Materials. Elsevier Ltd., v.25, 2010. p. 1222-1235.

FEHLING, E. THIEMICKE, J. **Experimental investigation on i-shaped UHPC-beams with combined reinforced under shear load**. Ultra-High Performance Concrete and Nanotechnology in Construction. 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials. Kassel, 2012. p. 477-484.

FEHLING, E.; SCHIDT, M. WALRAVEN, J.; LEUTBECHER, T.; FRÖHLICH, S. **Ultra-High Performance Concrete UHPC Fundamentals – Design – Examples**. Berlin, Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co, 2014.

FERREIRA, M. D. C. **Análise inversa utilizando o método dos elementos finitos de contorno e correlação de imagens digitais**. 2012. 173 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

FIB – INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE. **fib model code for concrete structures 2010 (MC-10)**. 1 ed. Berlin: Ernst & Sohn, 2013. 434 p. Corresponde aos boletins 65 e 66 d fib.

FIGUEIREDO, A. D. Livro Concreto: **Ciência e Tecnologia. Concreto com fibras**. Instituto Brasileiro do Concreto. 2011, 36p.

- GAN, Y. **Bond stress and slip modeling in nonlinear finite element analysis of reinforced concrete structures.** 2000. 269 p. Dissertação (Mestrado) – Department of Civil Engineering University of Toronto, Toronto - Canada, 2000.
- GAO, S.; ZHAO, X.; QIAO, J.; GUO, Y.; HU, G. **Study on the bonding properties of Engineered Cementitious Composites (ECC) and existing concrete exposed to high temperature.** Construction and Building Materials, v. 196, 2019. p. 330-344.
- GENIKOMSOU, A.; POLAK, M.A.; **Finite element analysis of punching shear of concrete slabs using damaged plasticity model in ABAQUS.** Engineering Structures 98, 2015. p.38-48.
- GUIA DE USUÁRIO DO ABAQUS/CAE - **Abaqus 6.13, Analysis User's Guide.** “Disponível em: <http://dsk.ippt.pan.pl/docs/abaqus/v6.13/index.html>”. Acesso em: março de 2020.
- HARRIS, D.; MUNÓZ, C.; GHEITASI, A.; AHLBORN, T.; RUSH, S. **The Challenges Related to Interface Bond Characterization of Ultra-High Performance Concrete With Implications for Bridge Rehabilitation Practices.** Advances in Civil Engineering Materials. v.4, n.2, 2015.
- HENRIQUES, J.; SILVA, L. S.; VALENTE, I. B. **Numerical modeling of composite beam to reinforced concrete wall joints Part I: Calibration of joint componentes.** Engineering Structures, v.52, 2013, p.747–761.
- HOESCHEMACHER, K.; MUELLER, T.; RIBAKOV, Y. **Effect of steel fibres on mechanical properties of high-strength concrete.** Materials and Design. Elsevier Ltd., 2010. p. 2604-2615.
- HUSEIN, H. H.; SARGAND, S. M.; AL RIBAKI, F. T.; STEINBERG, P. E. **Laboratory Evaluation of Ultrahigh-Performance Concrete Shear Key for Prestressed Adjacent Precast Concrete Box Girder Bridges.** Journal of Bridge Engineering, 2017.
- INTERNATIONAL CONCRETE REPAIR INSTITUTE. **Technical Guidelines. Selecting and Specifying Concrete Surface Preparation for Sealers, Coatings, Polymer Overlays, and Concrete Repair.** Guideline n°310.2R-2013.
- JU, Y.; SHEN, T; WANG, D. **Bonding behavior between reactive powder concrete and normal strength concrete.** Construction and Building Materials. Elsevier Ltd., v.242, 2020. 15p.
- JANG, H. O.; LEE, H. S.; CHO, K.; KIM, J. **Numerical and Experimental Analysis of the Shear Behavior of Ultrahigh-Performance Concrete Construction Joints.** Hindawi Advances in Materials Science and Engineering. v. 2018, Article ID 6429767, 17p.
- JAFARINEJAD, S.; RABIEE, A.; SHEKARCHI, M. **Experimental investigation on the bond strength between Ultra high strength Fiber Reinforced Cementitious Mortar & conventional concrete.** Construction and Building Materials. Elsevier Ltd., v.229, 2019. 10p.

- KANG, S.; CHOI, J.; KOH, K.; LEE, K. S.; LEE, B. Y. **Hybrid effects of steel fiber and microfiber on the tensile behavior of ultra-high performance concrete**. *Composite Structures*, v. 145, 2016, p. 37-42.
- KRAHL, P. A. **Instabilidade Lateral de vigas de concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras com ênfase em fases transitórias**. 2018. 200 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.
- KRAHL, P. A.; CARRAZEDO, R.; EL DEBS, M. K. **Mechanical damage evolution in UHPFRC: experimental and numerical investigation**. *Engineering Structures*, 170, 2018, p. 63-77.
- LAGIER, F.; MASSICOTTE, B.; CHARRON, J-P. **Experimental investigation of bond stress distribution and bond strength in unconfined UHPFRC lap splices under direct tension**. *Cement & Concrete Composites*. Elsevier Ltd., 2016. p. 26-38.
- LEBLOUBA, M.; BARAKAT, S.; AHMED, M. S. A.; AL-TOUBAT, S. **Shear strength at the interface of precast bridge concrete decks and girders subjected to cyclic loading with varying speeds**. *Engineering Structures*. v.196, 2019, 14p.
- LI, V. C; FISHER, G. **Reinforced ECC - an evolution from materials to structures**. *Proceedings of the First Fib Congress 2002: Concrete Structures in the 21st Century*. Keynote papers, contributed papers, v. 5. Osaka Prefectural Government, 2002. p. 105-122.
- LI, Z.; RANGARAJU, P. R. **Effect of Surface Roughness on the Bond Between Ultrahigh-Performance and Precast Concrete in Bridge Deck Connections**. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n. 2577, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2016, pp. 88–96.
- LI, C.; HAO, H.; BI, K. **Numerical study on the seismic performance of precast segmental concrete columns under cyclic loading**. *Engineering Structures*, 148, 2017, p. 373-386.
- LIU, T.; WANG, Z.; GUO, J.; WANG, J. **Shear Strength of Dry Joints in Precast UHPC Segmental Bridges: Experimental and Theoretical Research**. In: *Journal of Bridge Engineering*. v.24, 2018, 19 p.
- LOPEZ, J. A.; COLL, H.; SERNA, P.; GALÁN, F. **The UHPFRC pedestrian bridge above the V-21 Highway in Puzol, Valencia: Design, Construction and Cost**. *HiperMat: Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Materials*, 2016, Kassel, Germany. Anais.
- MAYA L. F.; ZANUY, C.; ALBAJAR, L.; LOPEZ, C.; PORTABELLA, J. **Experimental assessment of connections for precast concrete frames using ultra high performance fibre reinforced concrete**. *Construction and Building Materials* 48. Elsevier Ltd., 2013. p. 173-186.

- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.
- MELIM, F. M. M. **Influência da incorporação de ar em concreto autoadensável para paredes de concreto moldadas no local**. 2019. 197 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.
- MOREILLON, L. **Shear strenght of structural elements in high performance fibre reinforced concrete (HPFRC)**. University Paris-Est, 2013. Cap 3, p.107.
- NANA, W. S. A.; BUI, T. T.; ABOURI, L. S. **Experimental and Numerical Modelling of Shear Behaviour of Full-scale RC Slabs Under Concentrated Loads**. Structures, v.10, 2017, p. 96-116
- NEZHENTSEVA, A.; SORENSEN, E. V.; ANDERSEN, L. V.; SHULER, F. **Distribution and Orientation of Steel Fibres in UHPFRC**. Aalborg: Aalborg University, 2013.
- OLIVEIRA JUNIOR, L. A. **Ligação viga-pilar em elementos pré-moldados de concreto solidarizados por concreto reforçado com fibras de aço: análises estática e dinâmica**. 2012. 254 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- OSORIO, E.; BAIRÁN J. M.; MARÍ, A. R. **Lateral behavior of concrete under uniaxial compressive cyclic loading**. Materials and Structure, v.46, 2013; p. 709-724.
- RACKY, P. **Cost-effectiveness and sustainability of UHPC**. In: International Symposium on Ultra High Performance Concrete (UHPC), Anais Kassel, Germany, 2004.
- RANDL, N. **Design recommendations for interface shear transfer in fib Model Code 2010**. Structural Concrete 14. Berlin, Ernst & Sohn, 2013. p. 230-241.
- RILEM - **Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three point bend tests on notched beams**. Matériaux et Constructions, v.18, n.106, 1985. p.285-290.
- RILEM 89-FMT, R. D. R.-F., **Size-effect methods for determining fracture energy and process zone size of concrete**. Materials and Structure, v. 23,1990, p. 461-465.
- SANTOS, P. M. D.; JÚLIO, E. N. B. S.; SILVA, V. **Correlation between concrete-to-concrete bond strength and the roughness of the substrate surface**. Construction and Building Materials. Elsevier Ltd., v.21, 2006. p. 1688-1695.
- SANTOS, P. M. D.; JÚLIO, E. N. B. S. **Development of a laser roughness analyser to predict in situ the bond strength of concrete-to-concrete interfaces**. Magazine of Concrete Research 60, 2008. p. 329 -337.

- SANTOS, P. M. D.; JÚLIO, E. N. B. S.; SILVA. **Factors affecting bond between new and old concrete**. ACI Material Journal – Technical Paper. v.108, n.108, July – August 2011, p. 449-456.
- SANTOS, P. M. D.; JÚLIO, E. N. B. S.; SILVA. **A state-of-the-art review on roughness quantification methods for concrete surfaces**. Construction and Building Materials. Elsevier Ltd., v.38, 2012. p. 912-923.
- SANTOS, P. M. D.; JÚLIO, E. N. B. S. **Interface Shear Transfer on Composite Concrete Members**. ACI Structural Journal, Farmington Hills, 2014. p. 113 – 122.
- SEMENDARY, A. A.; SVECOVA, D. **Interfacial Parameters for Bridge Connections at High-Strength Concrete–Ultrahigh-Performance Concrete Interface**. Journal of Materials in Civil Engineering. v. 32, 2020, 14p.
- SPECK, K. **Beton unter mehraxialer Beanspruchung Ein Materialgesetz für Hochleistungsbetone unter Kurzzeitbelastung**. University of Dresden, 2008.
- SOETENS, T.; MATTHYS, S. **Shear-stress transfer across a crack in steel fibre-reinforced concrete**. Cement and Concrete Composites. Elsevier Ltd., v.82, 2017. 13p.
- TAM C. M.; TAM, V. W. Y.; NG K. M. **Assessing drying shrinkage and water permeability of reactive powder concrete produced in Hong Kong**. Construction and Building Materials. Elsevier Ltd., 2012. p. 79-89.
- TAYEH, A. B.; BAKAR, A. H. A.; JOHARI, M. A. M. **Characterization of the interfacial bond between old concrete substrate and ultra high performance fiber concrete repair composite**. Materials and Structures. RILEM, 2012. p. 743-753.
- VÍTEK, J. L.; ČÍTEK, D.; KOLÍSKO, J.; RYDVAL, M.; COUFAL, R.; JURSIK, P. **Application of UHPC Joints in Bridge Construction – experimental Testing**. HiperMat: Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Materials, 2016, Kassel, Germany. **Anais**.
- ZANOTTI, C.; BANTHIA, N. **Modified slant shear cylinder test for inherent characterization of bond in concrete repairs**. The Indian Concrete Journal, 2016, v. 90.
- ZHANG, Y. 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. Elsevier Ltd., v.236, 2020. 15p.
- ZOHREVAND P, MIRMIRAN A. **Behavior of Ultrahigh-Performance Concrete Confined by Fiber-Reinforced Polymers**. J Mater Civ Eng 2011; v.23: p.27–34.

WICHERT, M.; MATZ, H.; EMPELMANN, M; **Grouted segment joints for structures made of ultra-high performance concrete.** Concrete - Innovations in Materials, Design and Structures. Proceedings of the *fib* Symposium 2019. 9p.

WU, P.; WU, C.; LIU, Z.; HAO, H. **Investigation of shear performance of UHPC by direct shear tests.** Engineering Structures. v.183, 2019, p. 780-790.

YOO, D. – Y; KANG, S. – T, YOON, Y. – S. **Effect of fiber length and placement method on flexural behavior, tension-softening curve, and fiber distribution characteristics of UHPFRC.** Construction and Building Materials. Elsevier Ltd., 2014. p. 67-81.

APÊNDICE

Apêndice A – Caracterização dos materiais e resultados das propriedades mecânicas dos concretos*A1 - Propriedades dos materiais usados na confecção dos concretos*

As propriedades dos materiais não industrializados usados na produção do Concreto de Alta Resistência (CAR) e concreto Intermediário encontra-se na Tabela A1, Tabela A2 e Figura A1.

Tabela A1 - Parâmetros físicos dos agregados miúdos e graúdos (Fonte: FERREIRA, F. M. M., 2019)

Agregado	Massa específica aparente do agregado seco (g/cm ³)	Massa específica do agregado saturado superfície seca (g/cm ³)	Massa específica (g/cm ³)	Absorção de água (%)
Areia fina	2,56	2,56	2,57	0,18
Areia média	2,56	2,57	2,58	0,24
Agregado	2,99	2,88	2,83	1,87

Tabela A2 - Distribuição granulométrica dos agregados miúdos e graúdos (Fonte: FERREIRA, F. M. M., 2019)

Areia fina		Areia média		Brita	
Abertura da peneira (%)	% Passante	Abertura da peneira (%)	% Passante	Abertura da peneira (%)	% Passante
1,18	100	12,5	100	12,5	100
0,6	99,7	9,5	99,6	9,5	99,8
0,3	61,7	6,3	98,6	6,3	61,2
0,15	7,5	4,75	98,2	4,75	11,4
0,001	0	2,36	96,1	2,36	0,9
		1,18	84,1	1,18	0,7
		0,6	58,96	0,6	0,7
		0,3	31,4	0,3	0,7
		0,15	4,4	0,15	0,4
		0,001	0	0,001	0

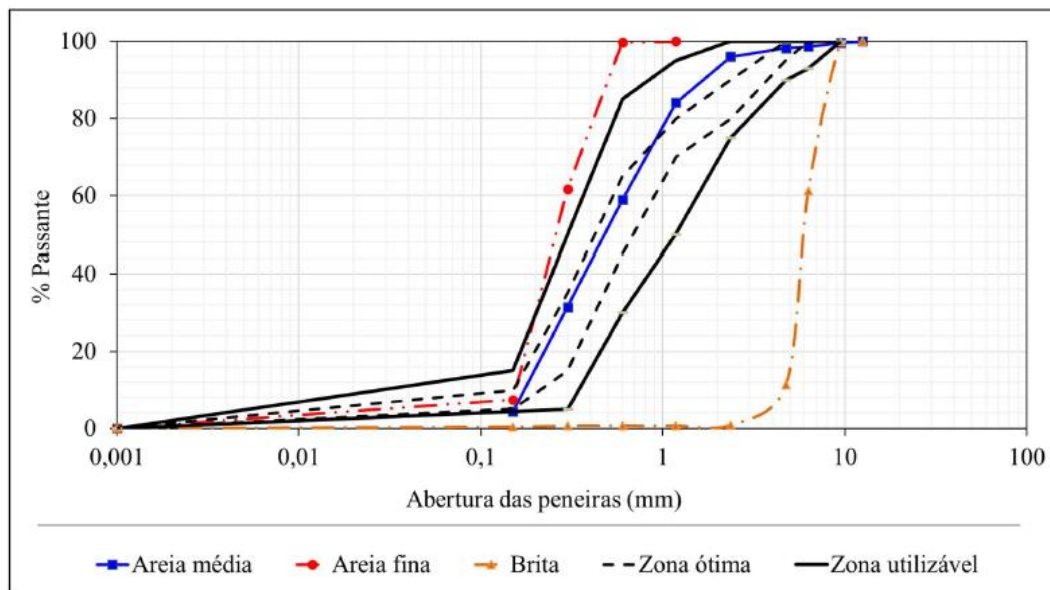


Figura A1 - Distribuição granulométrica dos agregados miúdos e graúdos (Fonte: FERREIRA, F. M. M., 2019)

A2 – Propriedades mecânicas dos concretos

A2.1 - Ensaio de resistência ao cisalhamento inclinado

Para os concretos usados na confecção dos prismas na análise da interface no ensaio de resistência ao cisalhamento inclinado foram realizados o ensaio de resistência à compressão, cujos valores estão apresentados na Tabela A3 para o CAR, Tabela A4 para o UHPC e Tabela A5 para o concreto Intermediário.

Tabela A3 - Evolução da resistência à compressão do CAR usado na produção dos prismas para o ensaio de resistência ao cisalhamento inclinado das interfaces

Idade de ruptura	f_c médio (MPa)	Desvio padrão (S)
1 dia (Execução jato de areia)	44,9	5,18
7 dias	64,2	0,9
28 dias	66,8	7,6
200 dias (Execução do ensaio)	94,2	1,5

Tabela A4 - Evolução da resistência à compressão do UHPC usado na produção dos prismas para o ensaio de resistência ao cisalhamento inclinado das interfaces

Concreto	Idade de ruptura	f_c médio (MPa)	Desvio padrão (S)
UHPC1	7 dias	86,4	1,1
	77 dias (Execução do ensaio)	135,3	3,6
UHPC2	7 dias	88,7	5,9
	77 dias (Execução do ensaio)	140,2	3,0

Tabela A5 - Evolução da resistência à compressão do concreto Intermediário confeccionado para o ensaio de resistência ao cisalhamento inclinado com interface

Idade de ruptura	f_c médio (MPa)	Desvio padrão (S)
7 dias	77,8	6,0
200 dias (Execução do ensaio)	106,2	3,1

A2.2 - Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Para os concretos usados na confecção dos cilindros na análise da interface no ensaio de resistência a tração por compressão diametral foram realizados o ensaio de resistência à compressão, cujos valores estão apresentados na Tabela A6 para o CAR, Tabela A7 para o UHPC, que também foi determinado o módulo de elasticidade e resistência à tração uniaxial, e Tabela A8 para o concreto Intermediário.

Tabela A6 – Propriedades mecânicas do CAR usado na produção dos cilindros para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral das interfaces

Idade de ruptura	f_c médio (MPa)	Desvio padrão (S)
1 dia (Execução jato de areia)	45,9	1,2
7 dias	70,1	3,9
156 dias (Execução do ensaio)	90,3	5,1

Tabela A7 - Propriedades mecânicas do UHPC usado na produção dos cilindros para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral das interfaces

Idade de ruptura	f_c médio (MPa)	(S)	E_{cs} médio (MPa)	Desvio padrão (S)	f_{ct} médio (MPa)	Desvio padrão (S)
7 dias	93,6	3,1	-	-	-	-
104 dias (Execução do ensaio)	140,0	9,3	46547,4	1305,6	9,7	1,6

Tabela A8 - Propriedades mecânicas do concreto Intermediário usado na produção dos cilindros para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral das interfaces

Idade de ruptura	f_c médio (MPa)	Desvio padrão (S)
7 dias	54,2	6,0
200 dias (Execução do ensaio)	107,5	9,05

A2.3 - Ensaio de resistência ao cisalhamento direto

Para os concretos usados na confecção dos prismas na análise da interface no ensaio de resistência ao cisalhamento direto foram realizados o ensaio de resistência à compressão e módulo de elasticidade, cujos valores estão apresentados na Tabela A9 para o CAR, e ensaio de resistência à compressão para o UHPC e concreto In, cujos valores estão apresentados na Tabela A10 e Tabela A11, respectivamente.

Tabela A9 - Propriedades mecânicas do CAR usado na produção dos modelos para o ensaio de resistência ao cisalhamento direto das interfaces

Idade de ruptura	f_c médio (MPa)	Desvio padrão (S)	E_{cs} médio	Desvio padrão (S)
2 dias (Execução jato de areia)	55,9	1,6	-	-
94 dias (Execução do ensaio)	88,1	1,3	44164,4	2826,5

Tabela A10 - Propriedades mecânicas do UHPC usado na produção dos modelos para o ensaio de resistência ao cisalhamento direto das interfaces

Concreto	Idade de ruptura	f_c médio (MPa)	Desvio padrão (S)
UHPC1	10 dias	99,0	8,2
	73 dias (Execução do ensaio)	141,8	4,0
UHPC2	10 dias	106,9	5,5
	73 dias (Execução do ensaio)	140,0	5,1

Tabela A11 - Propriedades mecânicas do concreto In usado na produção dos modelos para o ensaio de resistência ao cisalhamento direto das interfaces

Idade de ruptura	f_c médio (MPa)	Desvio padrão (S)
14 dias	92,5	4,2
94 dias (Execução do ensaio)	107,9	15,5

Apêndice B – Resultado da caracterização da rugosidade

B1 - Medições por coordenadas

B1.1 - Agregado exposto (A)

A Figura B1, Figura B2 e Figura B3 apresenta os resultados das medições por coordenadas e a Tabela B1 apresenta os resultados dos parâmetros calculados para a interface com Agregado exposto (A).

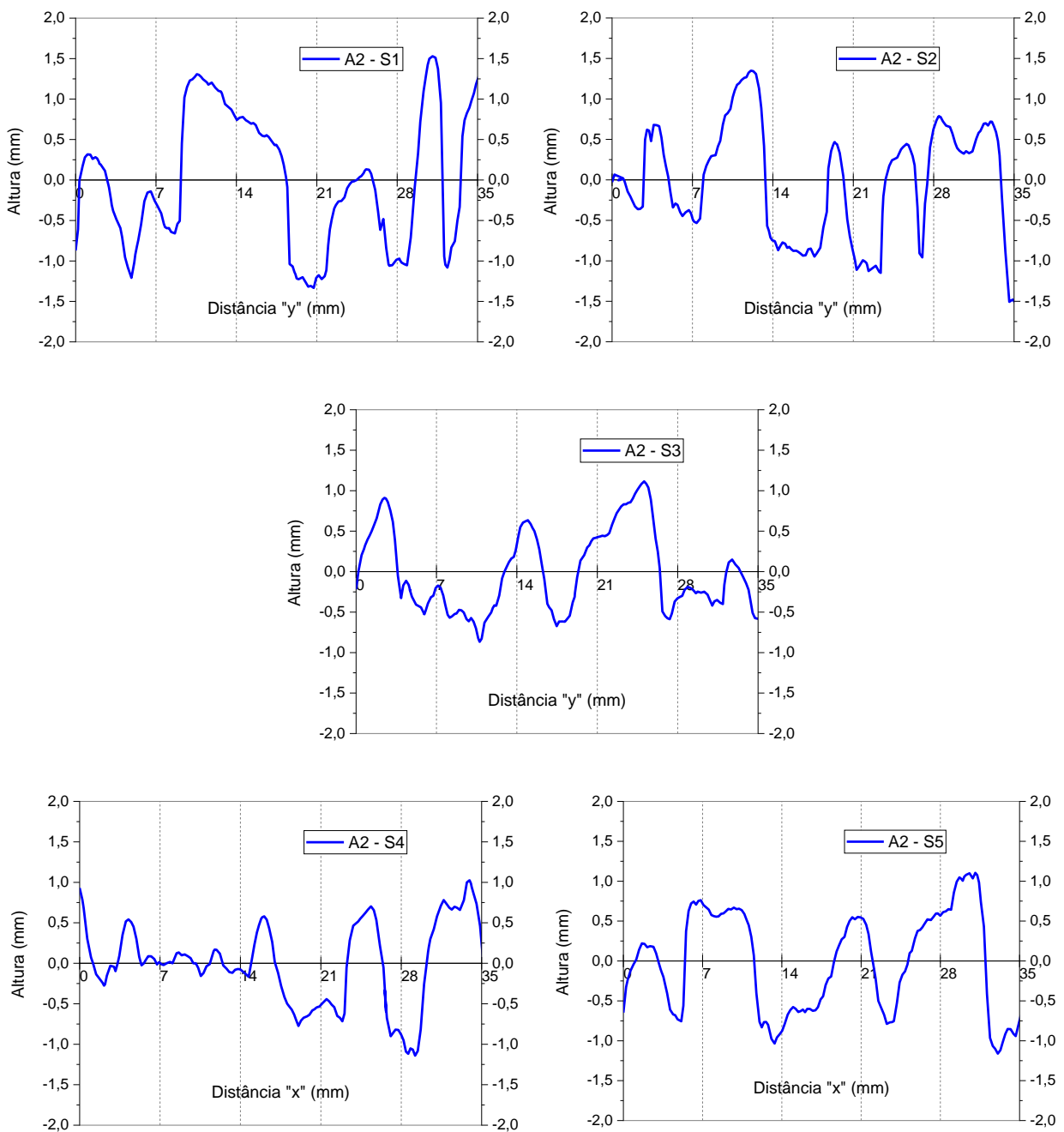


Figura B1 - Medição da rugosidade para a amostra A2

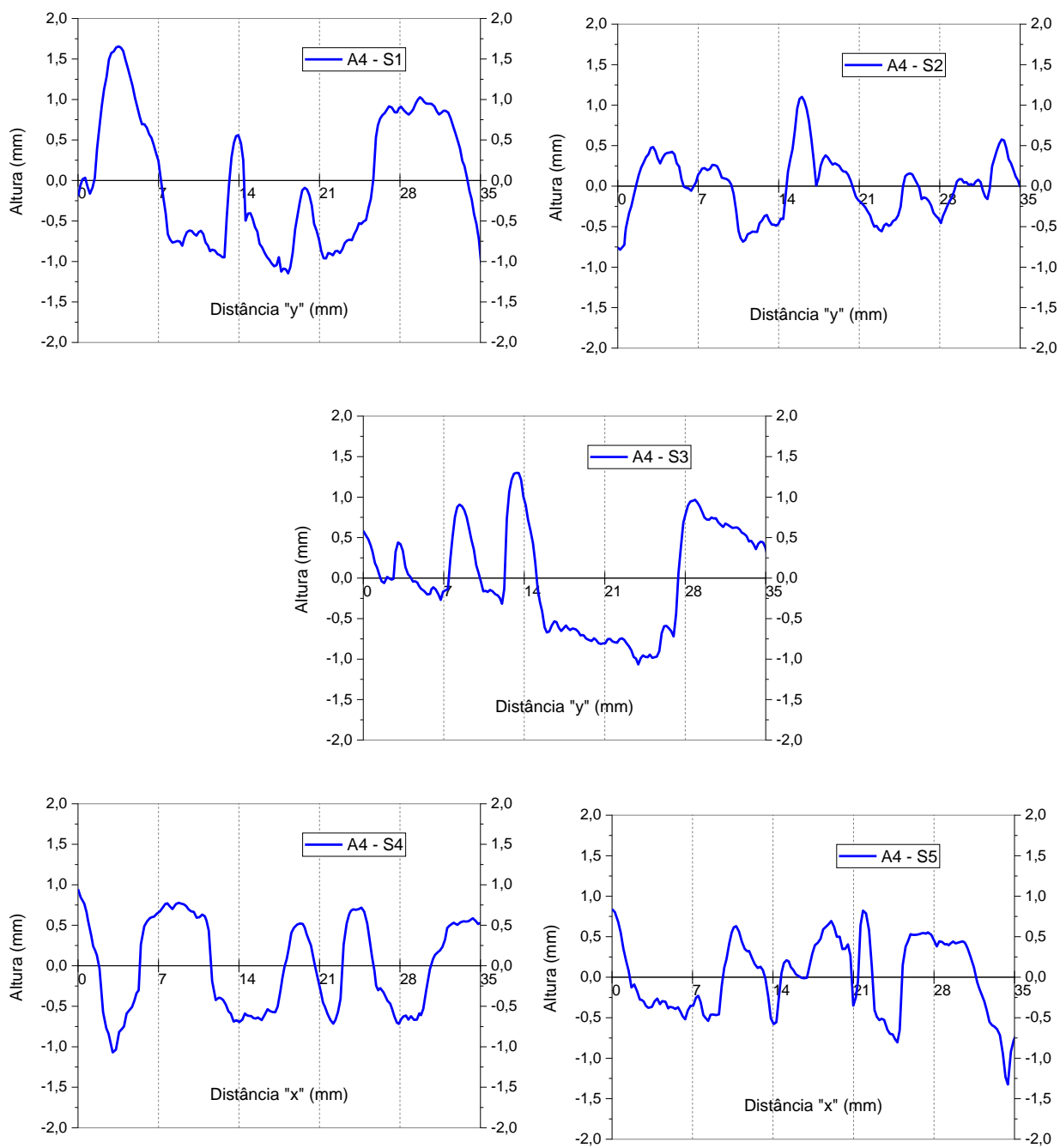


Figura B2 - Medição da rugosidade para a amostra A4

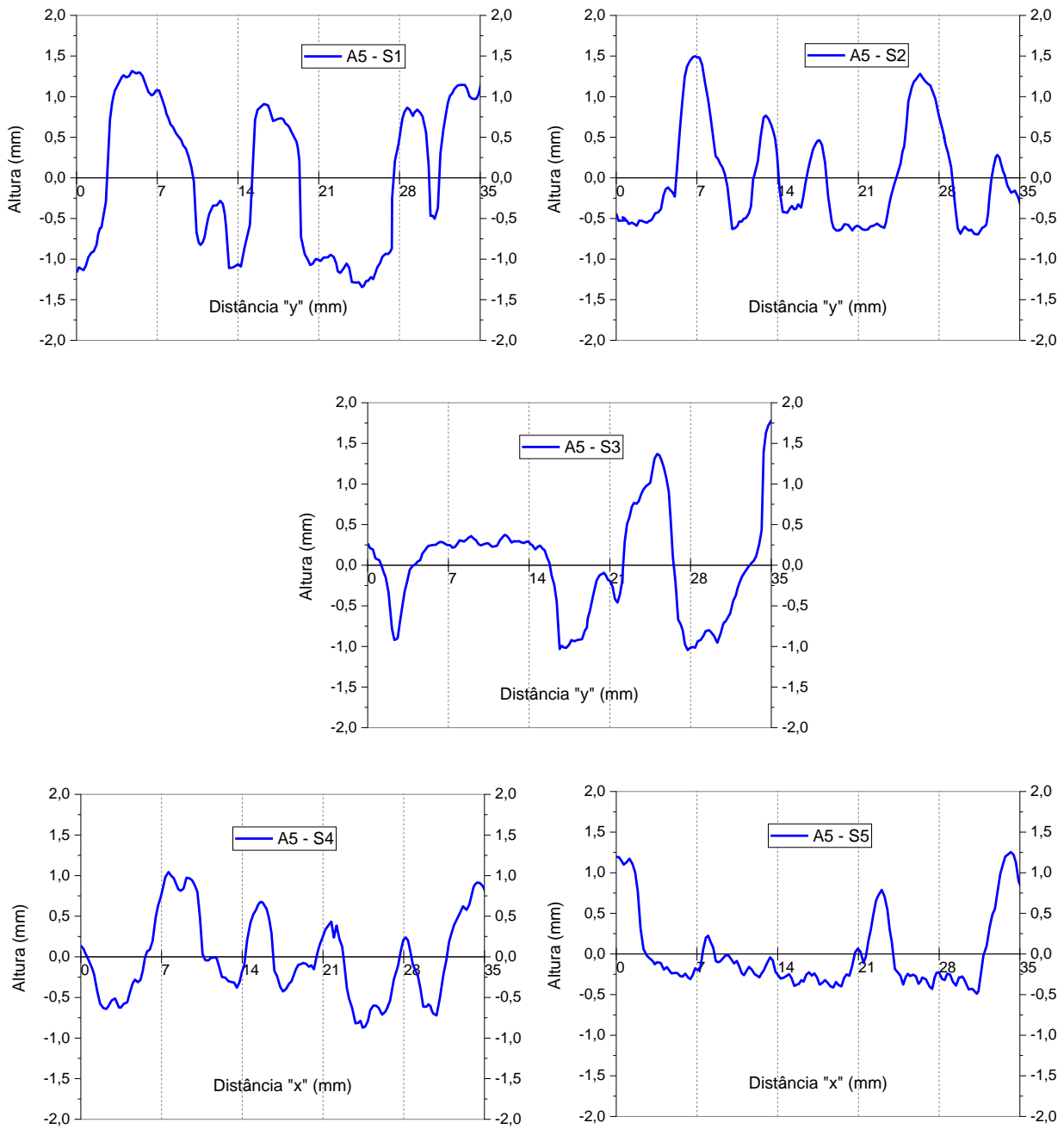


Figura B3 - Medição da rugosidade para a amostra A5

Tabela B1 - Parâmetros calculados da medição por coordenadas para a interface com Agregado exposto

Agregado	$R_{\text{máxp}}$ (mm)	$R_{\text{máxv}}$ (mm)	$R_{z(\text{DIN})}$ (mm)	R_a (mm)	R_{vm} (mm)	R_{pm} (mm)
A2 - S1	1,53	-1,31	1,92	0,72	-0,81	1,10
A2 - S2	1,35	-1,52	1,75	0,60	-0,78	0,96
A2 - S3	1,12	-0,87	1,27	0,45	-0,61	0,65
A2 - S4	1,02	-1,14	1,33	0,40	-0,68	0,65
A2 - S5	1,11	-1,16	1,67	0,57	-0,74	0,93
A4 - S1	1,66	-1,15	1,78	0,72	-0,86	0,92
A4 - S2	1,10	-0,79	1,09	0,31	-0,58	0,52
A4 - S3	1,30	-1,06	1,31	0,561	-0,44	0,89
A4 - S4	0,95	-1,07	1,48	0,53	-0,76	0,71
A4 - S5	0,84	-1,32	1,44	0,41	-0,75	0,68
A5 - S1	1,32	-1,34	2,02	0,85	-1,05	0,98
A5 - S2	1,49	-0,69	1,71	0,55	-0,65	1,07
A5 - S3	1,82	-1,02	1,58	0,51	-0,76	0,82
A5 - S4	1,04	-0,87	1,37	0,44	-0,61	0,76
A5 - S5	1,25	-0,49	1,09	0,36	-0,39	0,71
Média	1,26	-1,06	1,52	0,53	-0,69	0,82

B1.2 - Jato de areia (J)

A Figura B4, Figura B5 e Figura B6 apresenta os resultados da medição por coordenadas e a Tabela B2 apresenta os resultados dos parâmetros calculados para a interface Jato de areia.

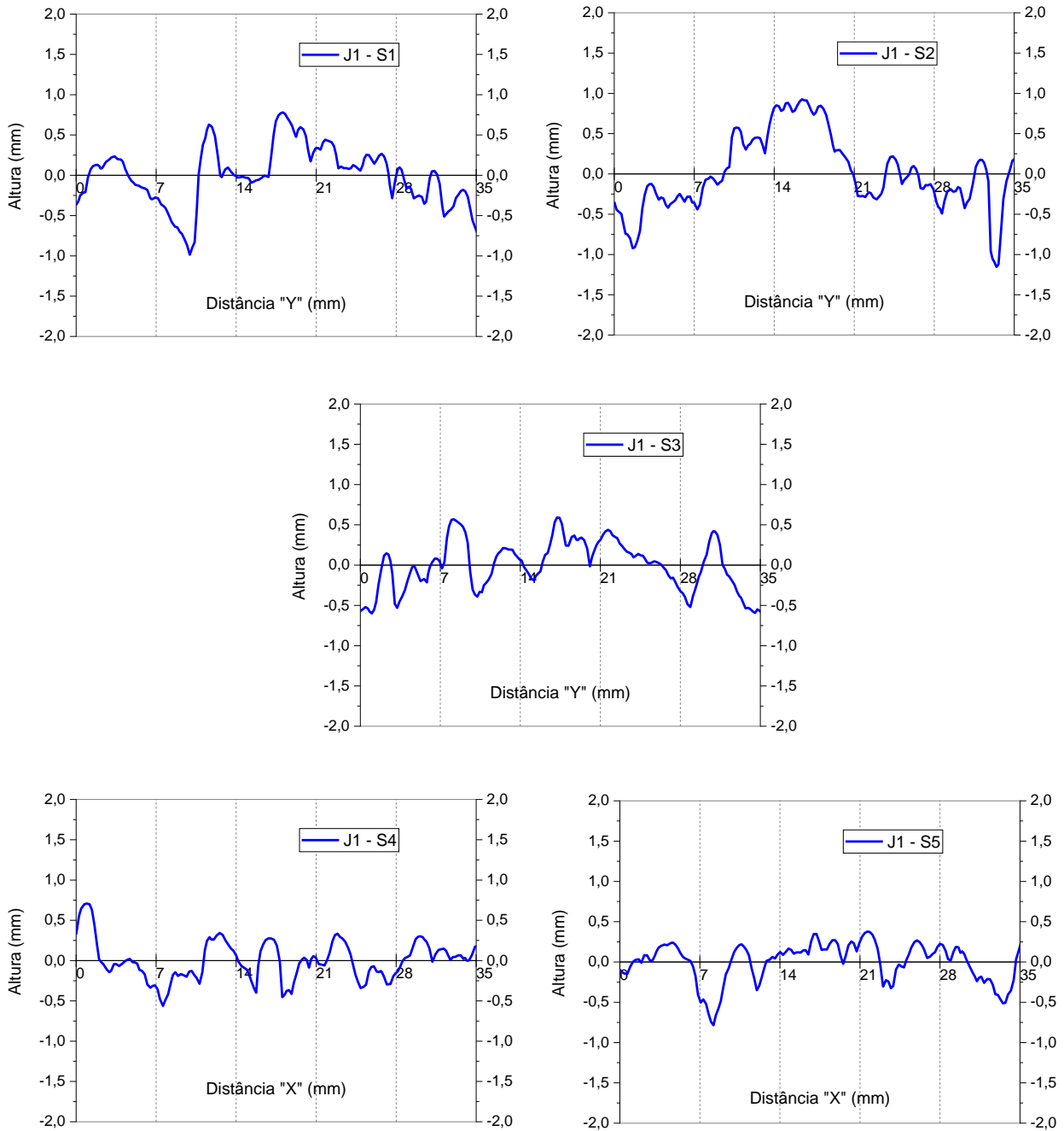


Figura B4 - Medição da rugosidade para a amostra J1

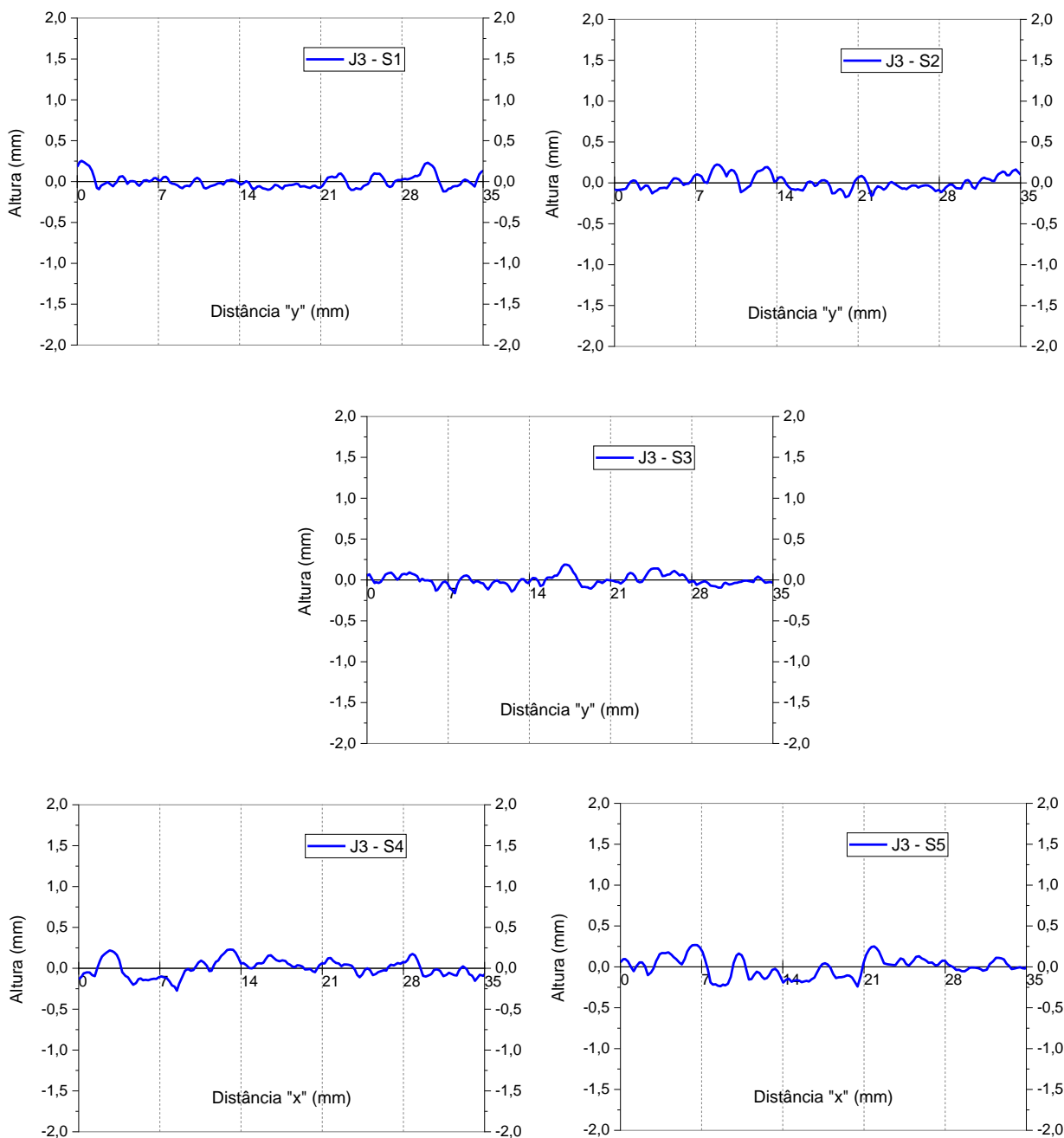


Figura B5 - Medição da rugosidade para a amostra J3

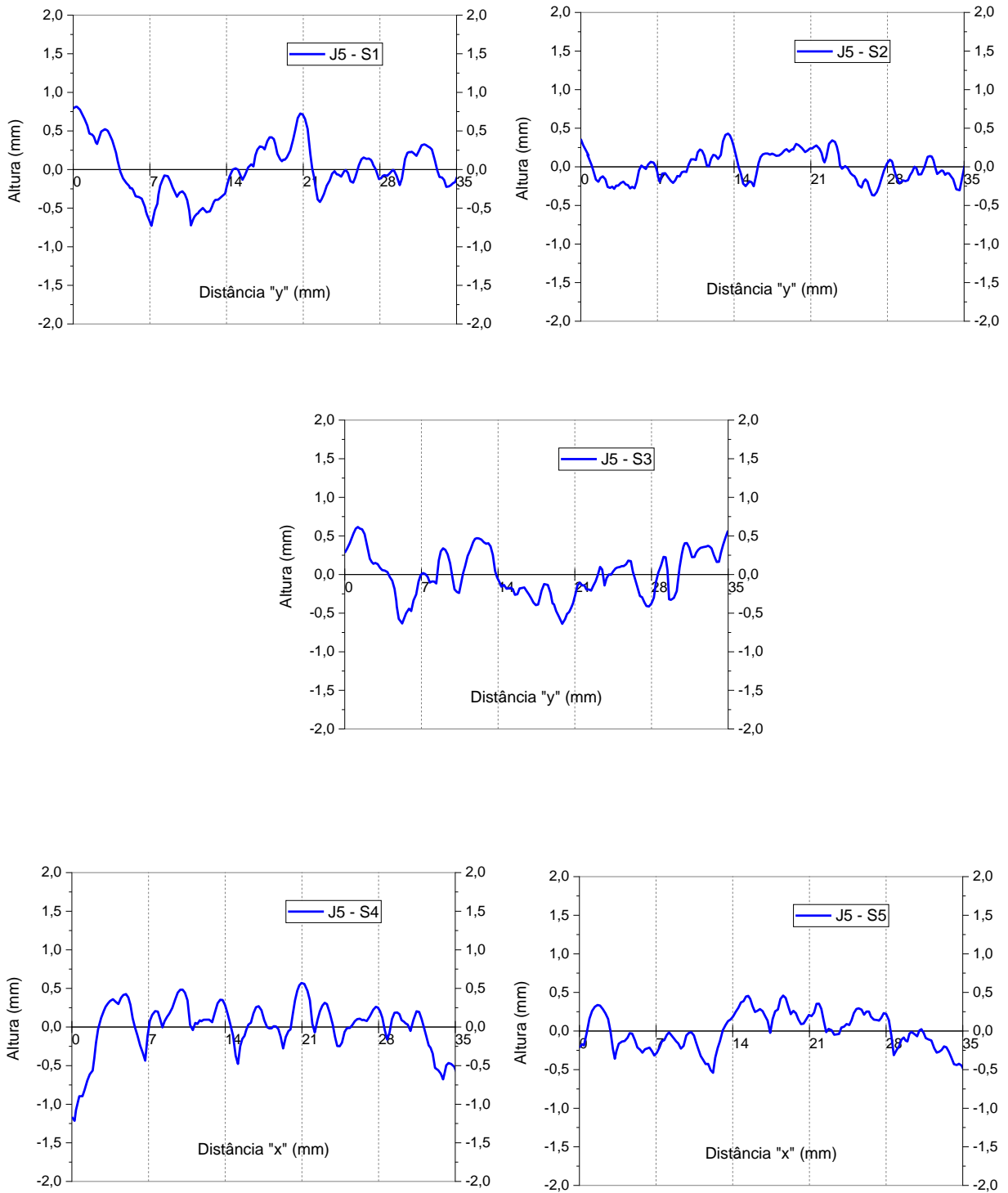


Figura B6 - Medição da rugosidade para a amostra J5

Tabela B2 - Parâmetros calculados da medição por contato para a interface com Jato de areia

Jato de areia	Máximo pico (mm)	Máximo vale (mm)	$R_{z(DIN)}$ (mm)	R_a (mm)	R_{vm} (mm)	R_{pm} (mm)
J1 - S1	0,781	-0,986	0,926	0,280	-0,49	0,44
J1 - S2	0,926	-1,154	1,056	0,399	-0,6	0,4
J1 - S3	0,591	-0,613	0,843	0,258	-0,41	0,43
J1 - S4	0,708	-0,563	0,759	0,191	-0,36	0,39
J1 - S5	0,378	-0,786	0,702	0,195	-0,41	0,29
J3 - S1	0,254	-0,121	0,230	0,061	0,10	0,13
J3 - S2	0,225	-0,176	0,266	0,072	-0,13	0,13
J3 - S3	0,188	-0,163	0,212	0,053	-0,1	0,1
J3 - S4	0,230	-0,274	0,339	0,085	-0,16	0,18
J3 - S5	0,267	-0,241	0,325	0,098	-0,12	0,2
J5 - S1	0,814	-0,728	0,934	0,281	-0,44	0,49
J5 - S2	0,430	-0,371	0,598	0,160	-0,28	0,31
J5 - S3	0,616	-0,639	0,808	0,255	-0,46	0,34
J5 - S4	0,570	-1,215	0,981	0,249	-0,53	0,45
J5 - S5	0,460	-0,541	0,574	0,200	-0,31	0,27
Média	0,496	-0,571	0,637	0,189	-0,31	0,3

B1.3 - Referência (R)

A Figura B7, Figura B8 e Figura B9 apresenta os resultados da medições por coordenadas e a Tabela B3 apresenta os resultados dos parâmetros calculados para a interface Referência (R).

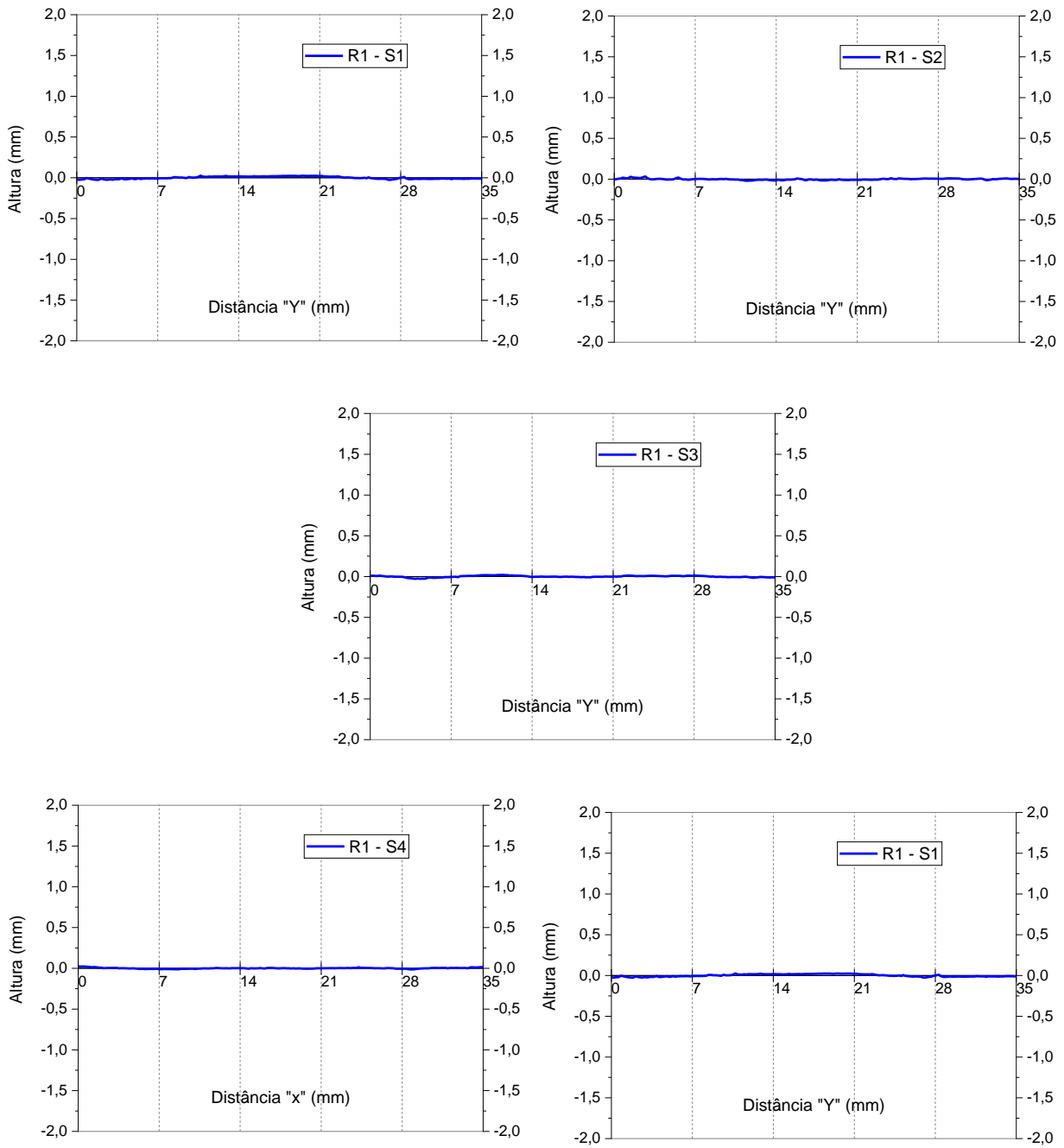


Figura B7 - Medição da rugosidade para a amostra R1

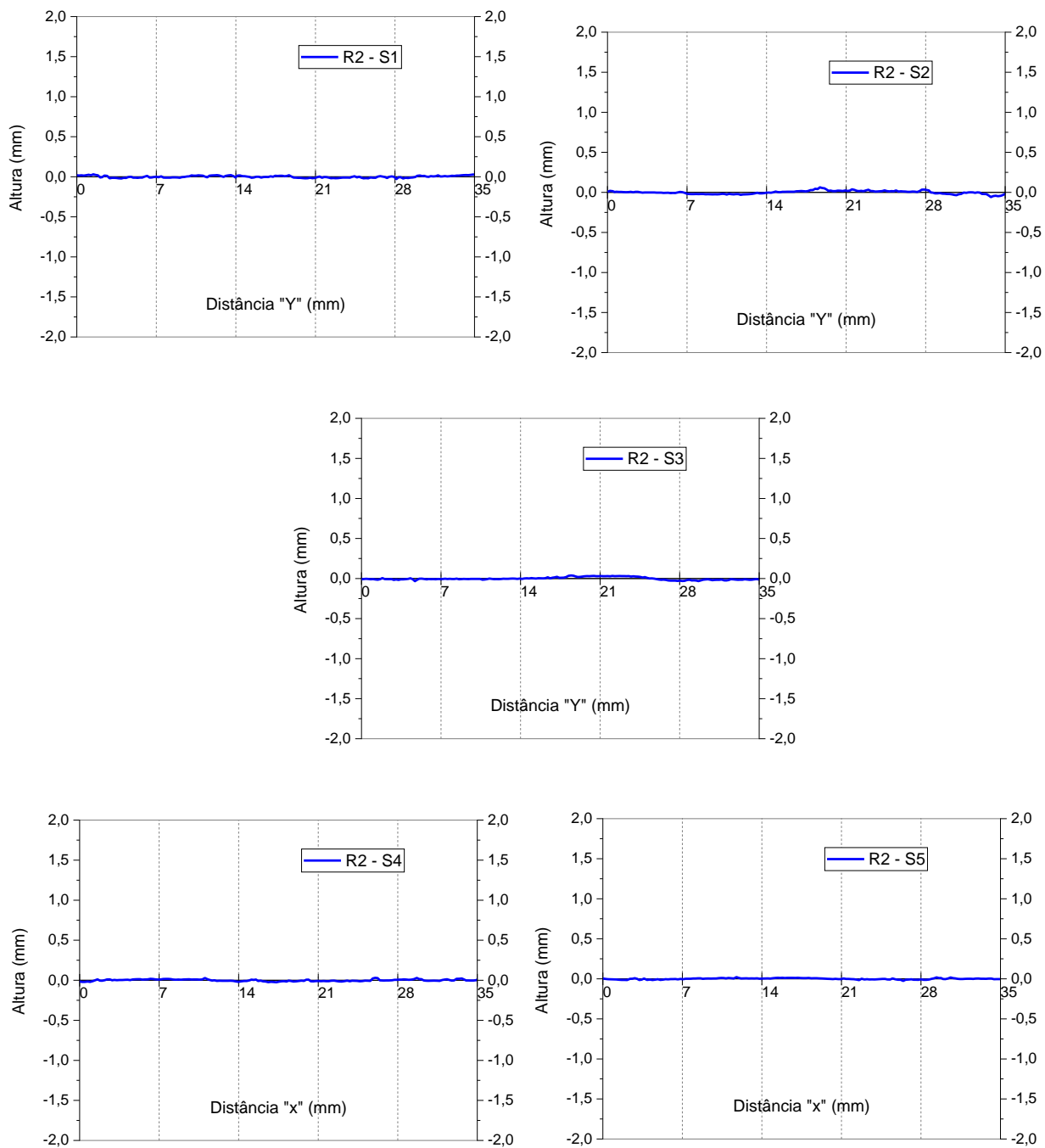


Figura B8 - Medição da rugosidade para a amostra R2

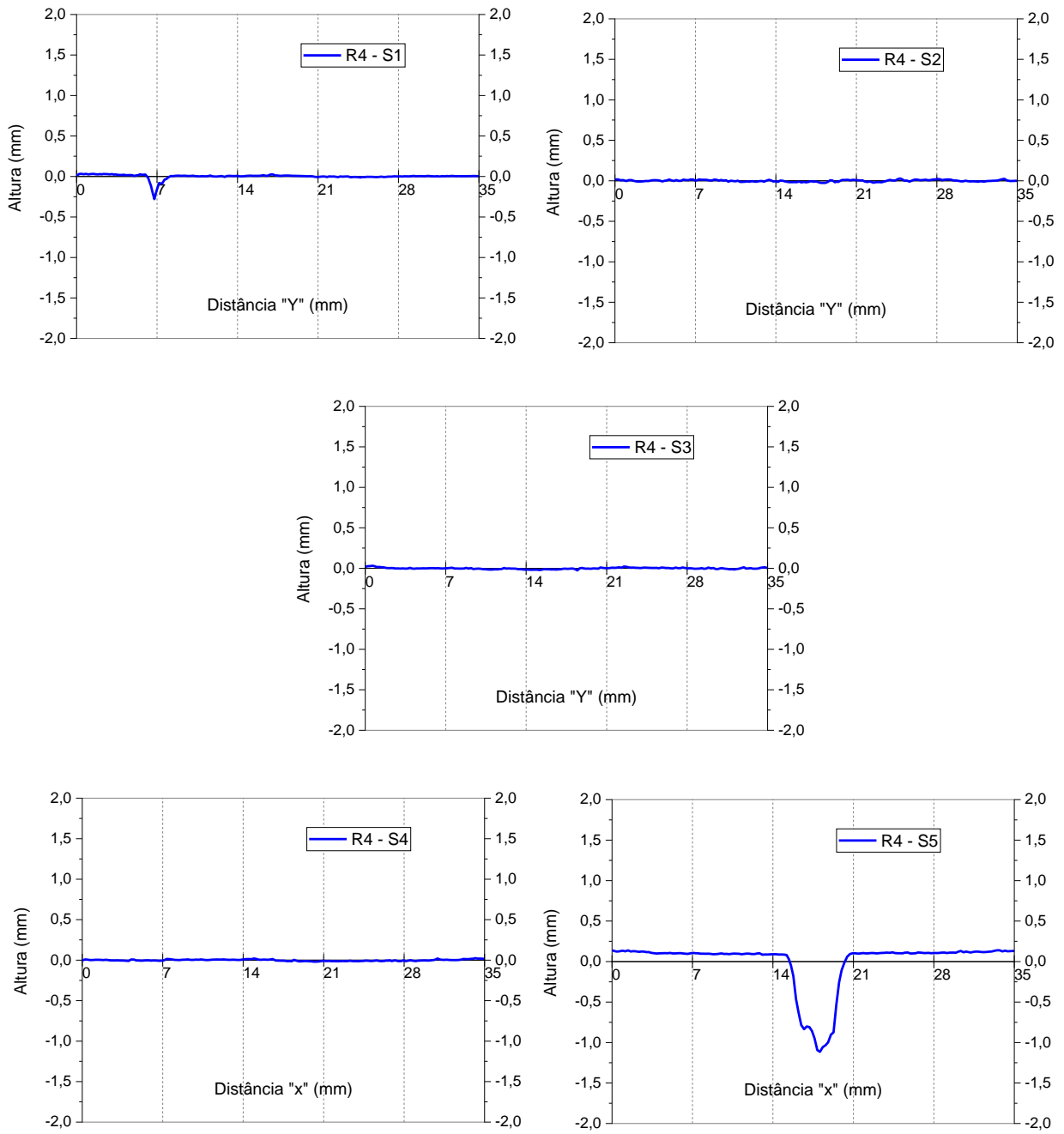


Figura B9 - Medição da rugosidade para a amostra R4

Tabela B3 - Parâmetros calculados da medição por contato para a interface Referência

Referência	Máximo pico (mm)	Máximo vale (mm)	R _{z(DIN)} (mm)	R _a (mm)	R _{vm} (mm)	R _{pm} (mm)
R1 - S1	0,026	-0,026	0,028	0,014	-0,012	0,016
R1 - S2	0,033	-0,021	0,027	0,007	-0,014	0,018
R1 - S3	0,021	-0,027	0,024	0,008	-0,012	0,012
R1 - S4	0,022	-0,013	0,021	0,005	-0,009	0,012
R1 - S5	0,019	-0,021	0,025	0,008	-0,013	0,012
R2 - S1	0,030	-0,028	0,041	0,011	-0,02	0,02
R2 - S2	0,064	-0,059	0,051	0,017	-0,02	0,03
R2 - S3	0,038	-0,033	0,037	0,014	-0,023	0,015
R2 - S4	0,031	-0,024	0,040	0,010	-0,018	0,023
R2 - S5	0,022	-0,026	0,026	0,007	-0,012	0,013
R4 - S1	0,033	-0,280	0,094	0,014	-0,08	0,016
R4 - S2	0,028	-0,026	0,037	0,009	-0,017	0,02
R4 - S3	0,032	-0,027	0,029	0,007	-0,013	0,017
R4 - S4	0,025	-0,019	0,025	0,008	-0,012	0,013
R4 - S5	0,141	-1,115	0,267	0,185	-0,14	0,12
Média	0,038	-0,116	0,052	0,022	-0,027	0,024

B1.4 - Tela de aço expandida (T)

A Figura B10, Figura B11 e Figura B12 apresenta os resultados das medições por coordenadas e a Tabela B4 apresenta os resultados dos parâmetros calculados para a interface Tela (T).

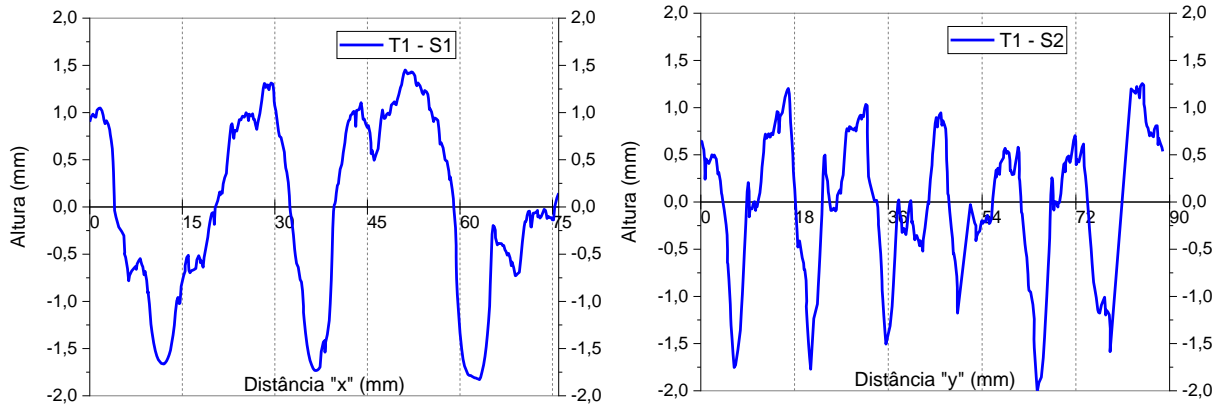


Figura B10 - Medição da rugosidade para a amostra T1

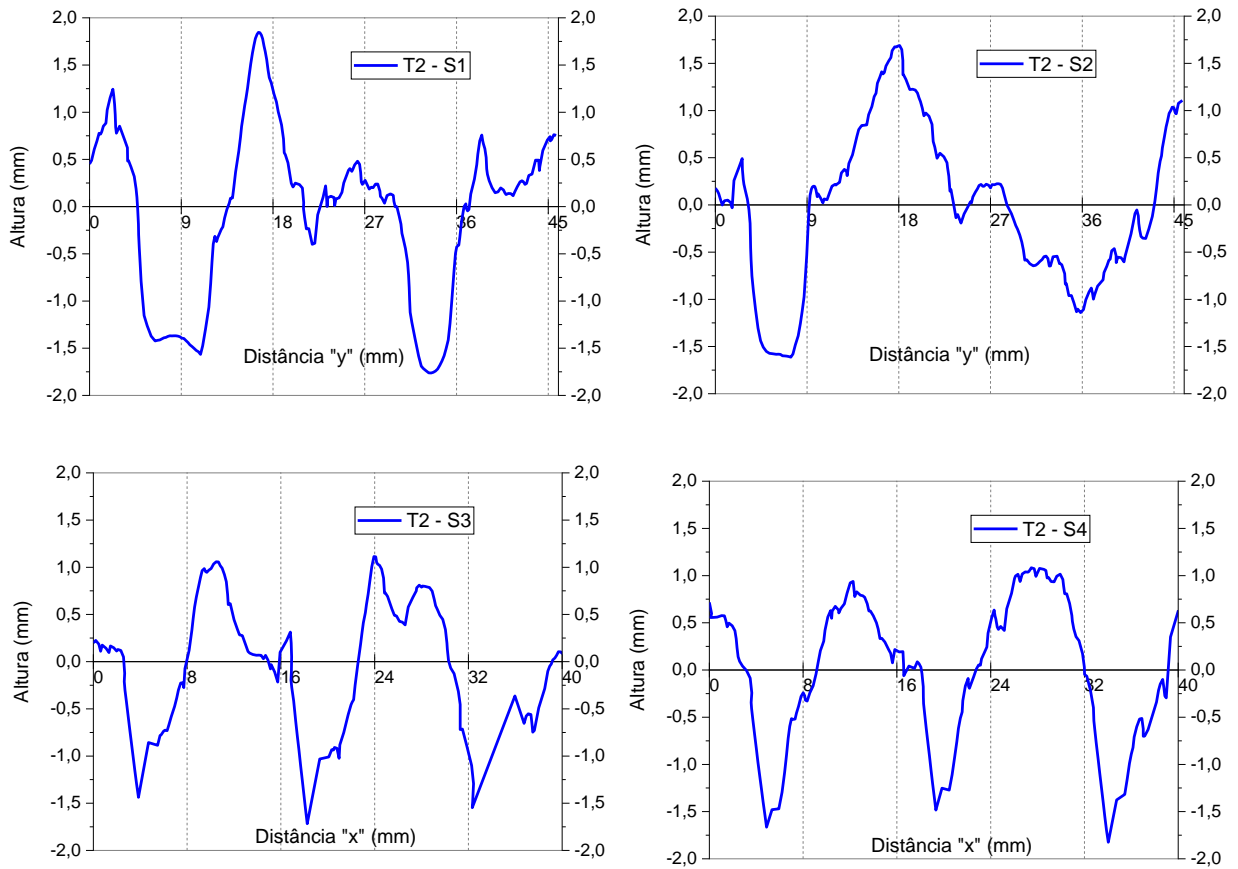


Figura B11 - Medição da rugosidade para a amostra T2

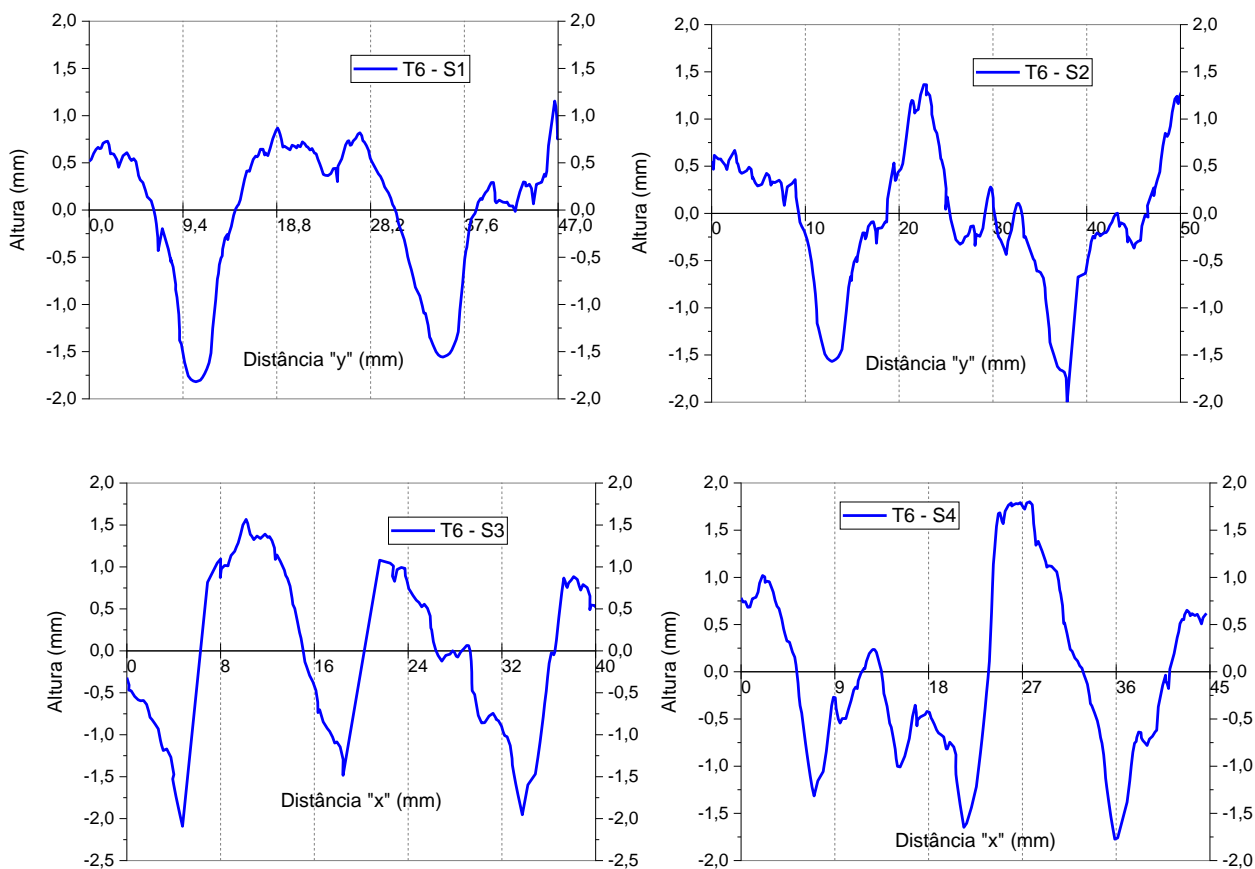


Figura B12 - Medição da rugosidade para a amostra T6

Tabela B4 - Parâmetros calculados da medição por contato para a interface Tela

Tela	R _{pi} (mm)	Máximo vale (mm)	R _{z(DIN)} (mm)	R _a (mm)	R _{vm} (mm)	R _{pm} (mm)
T2 - S1	1,846	-1,565	2,189	0,695	-1,12	1,07
T2 - S2	1,689	-1,613	1,902	0,652	-0,87	1,04
T2 - S3	1,114	-1,717	1,886	0,547	-1,16	0,73
T2 - S4	1,084	-1,825	1,798	0,596	-1,02	0,77
T6 - S1	1,154	-1,819	1,751	0,607	-0,94	0,81
T6 - S2	1,475	-1,998	1,764	0,556	-0,93	0,84
T6 - S3	1,567	-2,091	2,433	0,792	-1,36	1,07
T6 - S4	1,801	-1,774	2,525	0,734	-1,42	1,10
T1 - S1	1,451	-1,829	2,470	0,816	-1,45	1,01
T1 - S2	1,2037	-1,753	2,714	0,604	-1,69	1,03
Média	1,438	-1,798	2,143	0,660	-1,19	0,95

B2 – Método da mancha de areia

B2.1 - Agregado exposto (A)

A Tabela B5 apresenta os parâmetros calculados pelo método da mancha de areia para a superfície Agregado exposto.

Tabela B5 - Parâmetros calculados da medição pelo método da mancha de areia para a interface com Agregado exposto

Agregado	V (mm ³)	D (mm)	Hs (mm)
A2	13461,5385	105	1,585
		104	
		101	
		106	
A3		114	1,372
		109	
		115	
		109	
A4		107	1,600
		101	
		106	
		100	
A5		103	1,672
		104	
		98	
		100	
Média		105	1,557

B2.2 - Jato de areia

A Tabela B6 apresenta os parâmetros calculados pelo método da macha de areia para a superfície Jato de areia.

Tabela B6 - Parâmetros calculados da medição pelo método da mancha de areia para a interface com Jato de areia

Jato de areia	V (mm ³)	D (mm)	Hs (mm)
J1	4487,179	100	0,574
		95	
		105	
		99	
J2		92	0,698
		90	
		93	
		87	
J3		117	0,421
		118	
		117	
		114	
J5	95	0,546	
	104		
	102		
	108		
J6	118	0,438	
	116		
	113		
	110		
Média		104,650	0,535

B2.3 - Tela

A Tabela B7 apresenta os parâmetros calculados pelo método da mancha de areia para a superfície Tela (T).

Tabela B7 - Parâmetros calculados da medição pelo método da mancha de areia para a interface Tela

Tela	V (mm ³)	D (mm)	Hs (mm)
T1	14102,564	105	1,629
		111	
		100	
		104	
T2		115	1,504
		107	
		100	
		115	
T4		108	1,717
		97	
		101	
		103	
T6		98	1,841
		93	
		103	
		101	
Média		104	1,673

Apêndice C – Resultado da resistência à tração na flexão

A Figura C1 mostra o posicionamento dos transdutores de deslocamento e clip gage posicionados no corpo de prova para o ensaio de resistência à tração na flexão. Na Figura C2 é apresentada a curva força versus deslocamento da média dos transdutores de deslocamento, a Figura C3 mostra a curva força versus deformação do clip-gage e a Figura C4 - C9 a curva força versus deformação dos extensômetros, respectivamente.

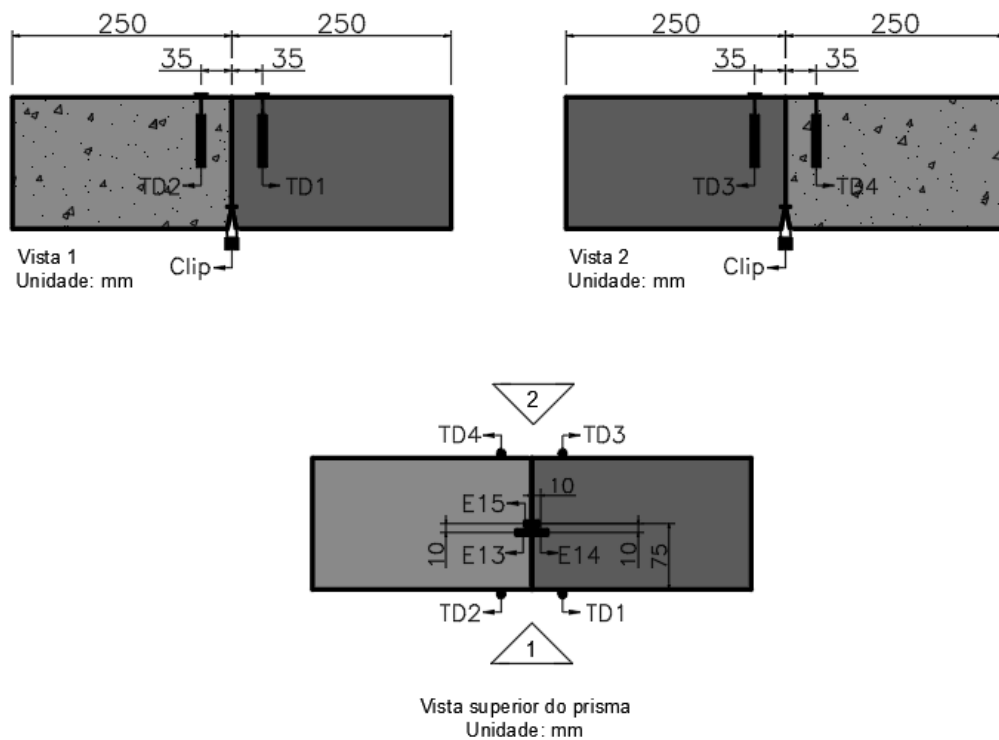


Figura C1 - Posicionamento e nomenclatura dos transdutores de deslocamento (TD), clip gage (Clip) e extensômetros usado no ensaio de resistência à tração na flexão – corpo de prova com interface

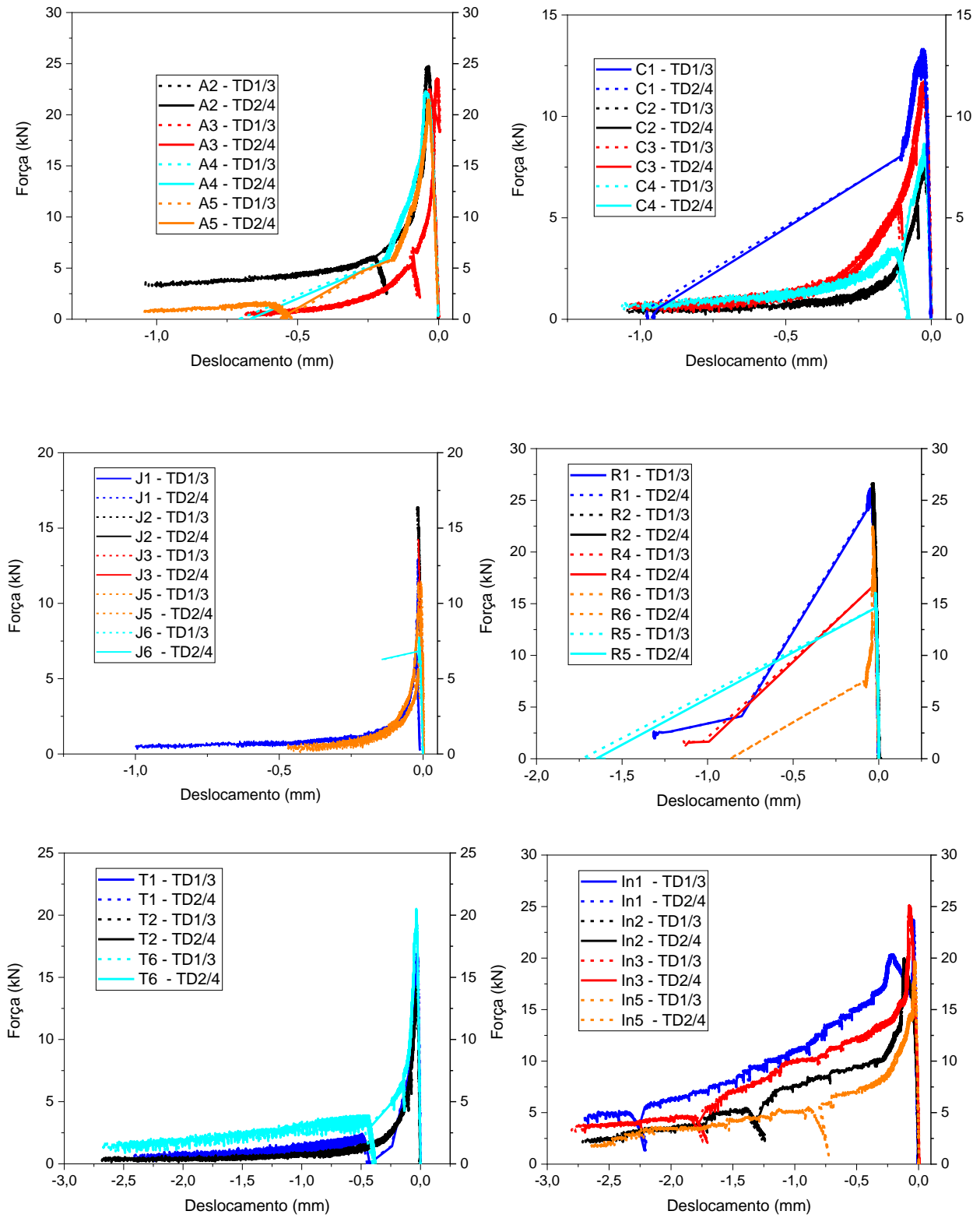


Figura C2 - Curva completa força versus deslocamento dos transdutores de deslocamento – Parte I

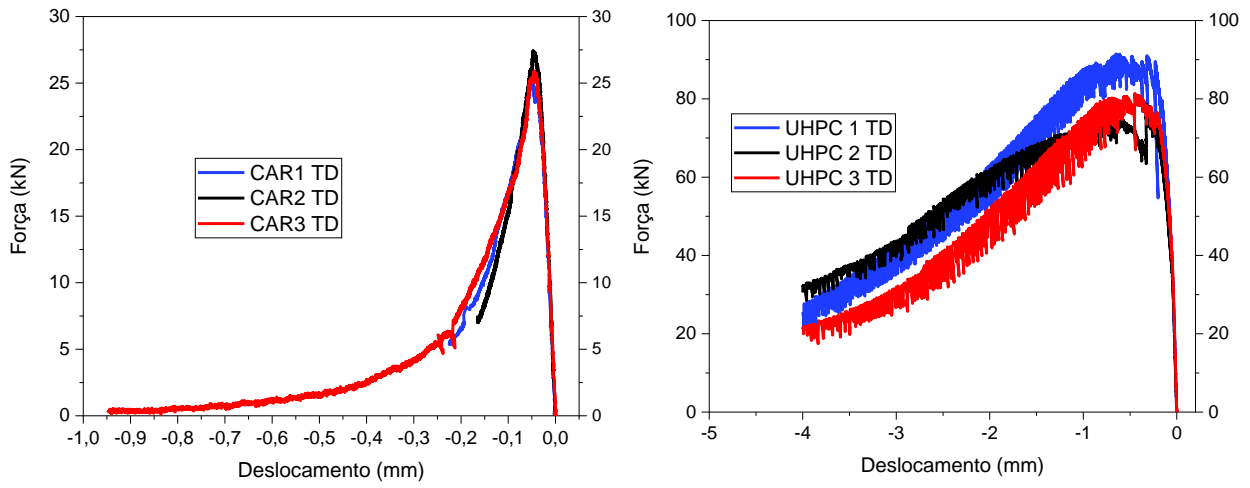


Figura C2 - Curva completa força versus deslocamento dos transdutores de deslocamento – Parte II

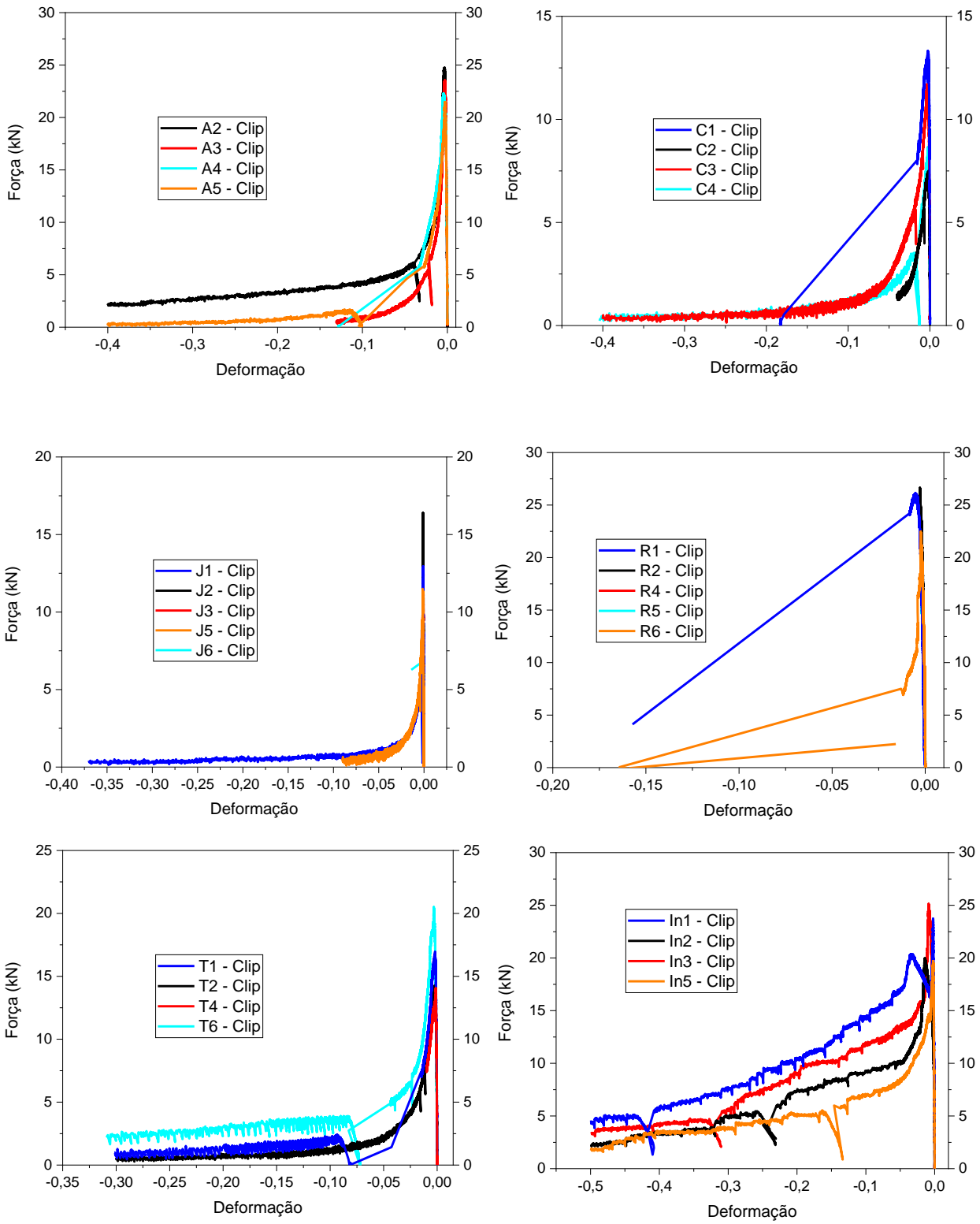


Figura C3 - Curva completa força versus deformação do clip gage – Parte I. Unidade: deformação (mm/mm)

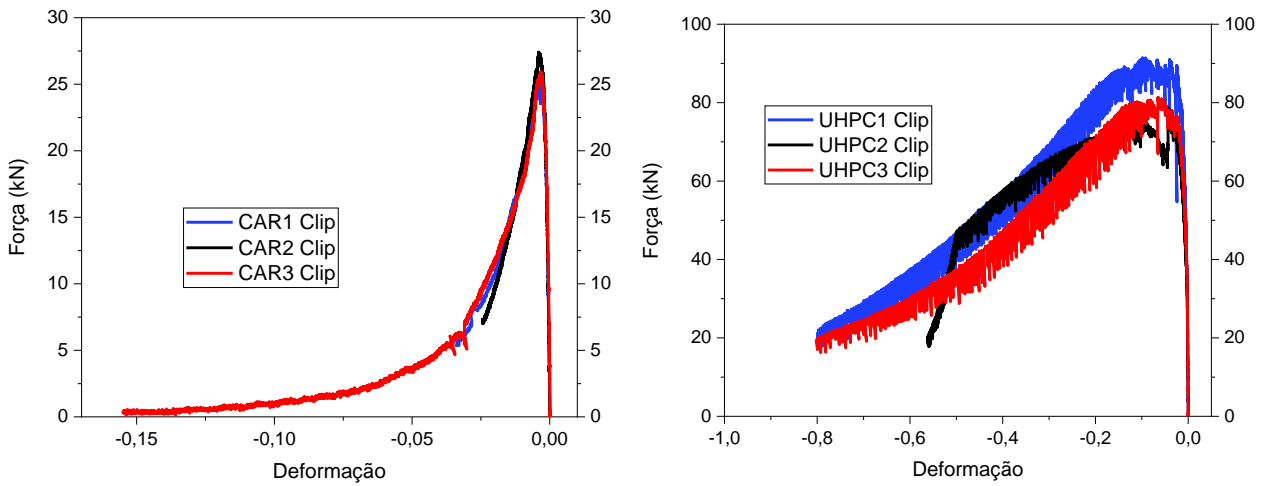


Figura C3 - Curva completa força versus deformação do clip gage – Parte II. Unidade: deformação (mm/mm)

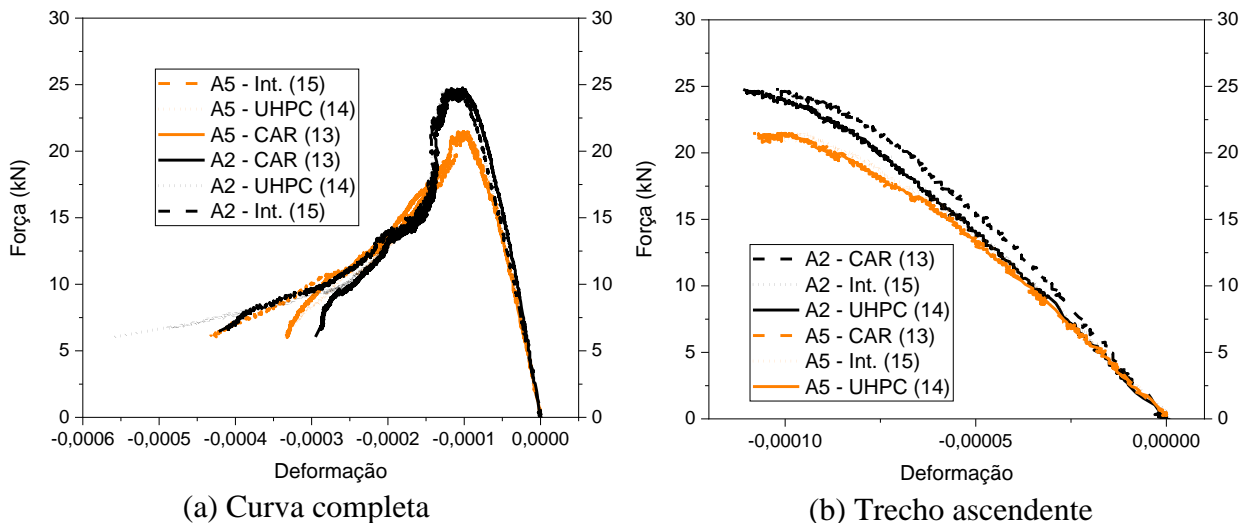


Figura C4 - Curva força versus deformação dos extensômetros – interface Agregado exposto (A). Unidade: deformação (mm/mm)

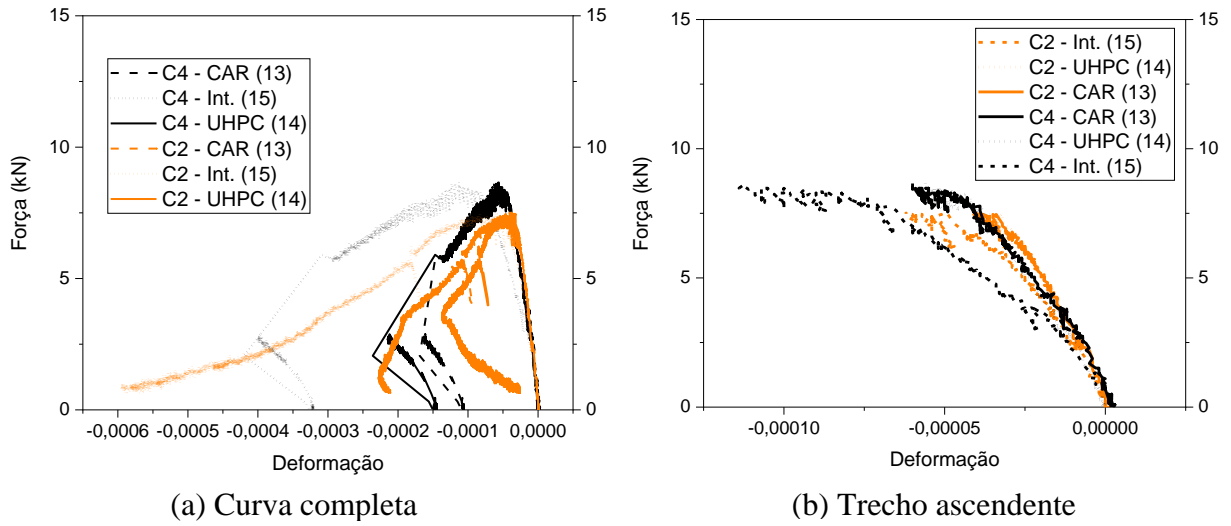


Figura C5 - Curva força versus deformação dos extensômetros – interface Chave de cisalhamento (C). Unidade: deformação (mm/mm)

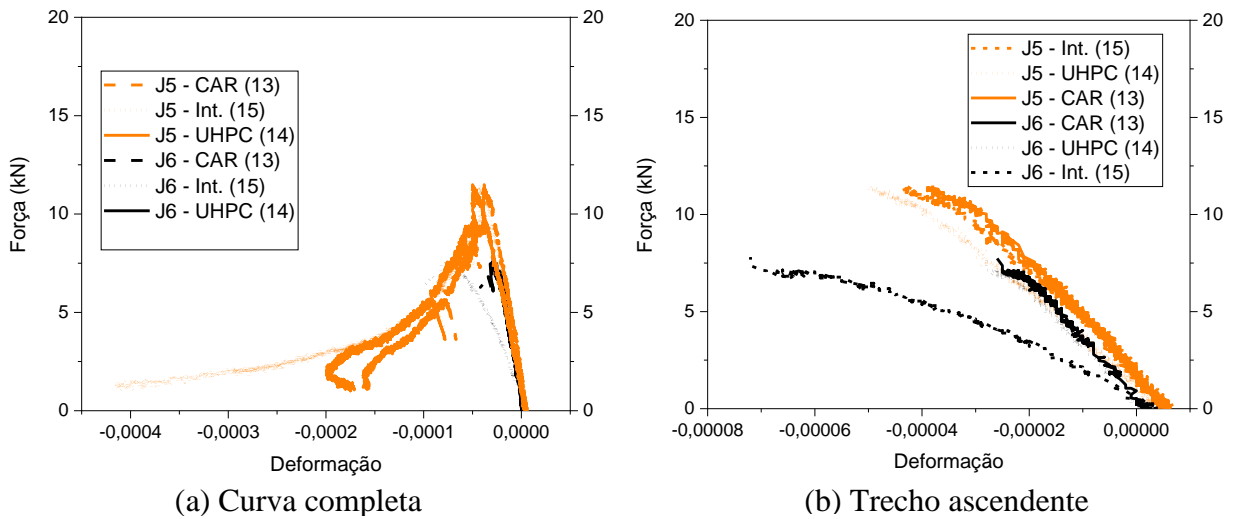


Figura C6 - Curva força versus deformação dos extensômetros – interface Jato de areia (J). Unidade: deformação (mm/mm)

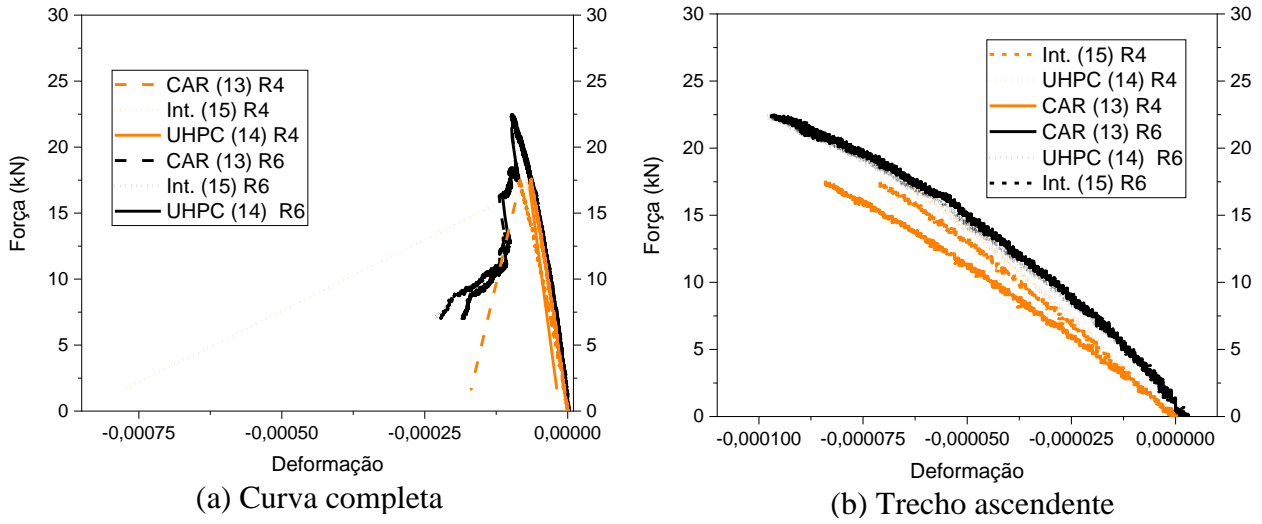


Figura C7 - Curva força versus deformação dos extensômetros – interface Referência (R). Unidade: deformação (mm/mm)

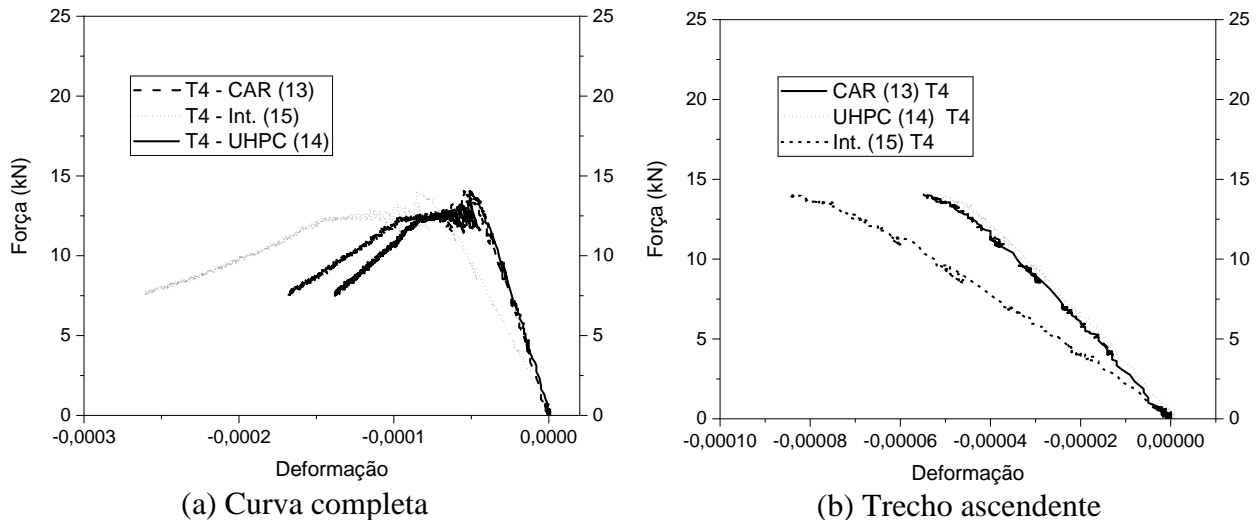


Figura C8 - Curva força versus deformação dos extensômetros – interface Tela (T). Unidade: deformação (mm/mm)

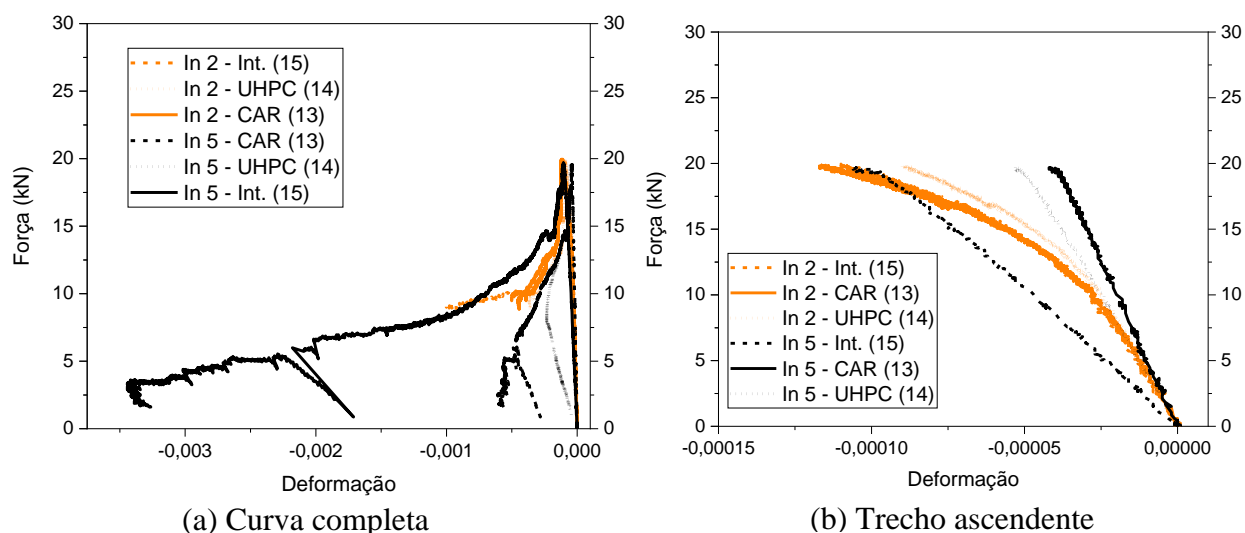


Figura C9 - Curva força versus deformação dos extensômetros – interface Intermediária - fibra (In).
Unidade: deformação (mm/mm)

A Tabela C1 à Tabela C8 apresenta os valores de força de ruptura e as suas correspondentes medidas dos transdutores de deslocamento, clip-gage e extensômetros. Os valores amostrais em vermelho foram excluídos da leitura pelo critério de Chauvenet, por apresentar discrepância em relação aos demais valores.

Tabela C1 - Força de ruptura e correspondentes medições da média dos transdutores de deslocamento, deformação do clip gage e extensômetros – interface Agregado exposto (A)

Agregado	$F_{ruptura}$ (kN)	$f_{ct,f}$ (MPa)	TD 1/3 (mm)	TD 2/4 (mm)	Clip (mm)	ϵ Clip (mm/mm)	ϵ_{13} (CAR) (mm/mm)	ϵ_{14} (UHPC) (mm/mm)	ϵ_{15} (mm/mm)
A2	24,77	4,76	-0,039	-0,035	- 0,026	-0,0031	-0,00010	-0,0001	-0,00011
A3	22,43	4,31	-0,035	-0,030	- 0,023	-0,0029			
A4	22,02	4,23	-0,038	-0,037	- 0,037	-0,0046			
A5	21,47	4,12	-0,035	-0,035	-0,02	-0,0026	-0,00010	-0,0001	- 0,000096
Média	22,67	4,35	-0,037	-0,034	- 0,026	-0,003	-0,00010	-0,00010	-0,00010
Coefficiente de variação (%)	6,39	6,39	-5,95	-7,941	- 27,05	-12,64			
Desvio padrão (S)	1,45	0,27	0,002	0,003	0,007	0,0004			

Tabela C2 - Força de ruptura e correspondentes medições da média dos transdutores de deslocamento, deformação do clip gage e extensômetros – interface Chave de cisalhamento (C)

Chave de cisalhamento (C)	$F_{ruptura}$ (kN)	$f_{ct,f}$ (MPa)	TD 1/3 (mm)	TD 2/4 (mm)	ϵ Clip (mm/mm)	ϵ_{13} (CAR) (mm/mm)	ϵ_{14} (UHPC) (mm/mm)	ϵ_{15} (mm/mm)	Clip (mm)
C1	13,32	2,56	-0,03	-0,03	-0,003				-0,021
C2	7,51	1,44	-0,02	-0,02	-0,002	-0,00004	-0,00004	-0,00006	-0,0138
C3	11,72	2,25	-0,03	-0,03	-0,003				0,027
C4	8,65	1,66	-0,02	-0,02		-0,00006	-0,00006	-0,00011	-0,019
Média	10,30	1,98	-0,03	-0,02	-0,002	-0,000050	-0,000047	-0,00009	-0,020
Coefficiente de variação (%)	26,09	26,09	-26,53	-19,23	-27,006				-27,00
Desvio padrão (S)	2,69	0,52	0,007	0,005	0,0007				0,005

Tabela C3 - Força de ruptura e correspondentes medições da média dos transdutores de deslocamento, deformação do clip gage e extensômetros – interface Jato de areia (J)

Jato de areia (J)	$F_{ruptura}$ (kN)	$f_{ct,f}$ (MPa)	TD 1/3 (mm)	TD 2/4 (mm)	ϵ Clip (mm/mm)	ϵ_{13} (CAR) (mm/mm)	ϵ_{14} (UHPC) (mm/mm)	ϵ_{15} (mm/mm)	Clip (mm)
J1	12,96	2,49	-0,017	-0,0180	-0,00088				-0,007
J2	16,39	3,15	-0,021	-0,016	-0,00113				-0,009
J3	14,24	2,73	-0,018	-0,017	-0,00075				-0,006
J5	11,49	2,21	-0,016	-0,007	-0,00143	-0,00004	-0,00005	-0,00004	-0,0114
J6	7,74	1,49	-0,015	-0,012	-0,00071	-0,00003	-0,00003	-0,00007	-0,0057
Média	12,56	2,41	-0,017	-0,014	-0,00098	-0,00003	-0,00004	-0,00006	-0,008
Coefficiente de variação (%)	25,81	25,81	-13,29	-31,93	-30,455				-30,46
Desvio padrão (S)	3,24	0,62	0,002	0,004	0,00030				0,002

Tabela C4 - Força de ruptura e correspondentes medições da média dos transdutores de deslocamento, deformação do clip gage e extensômetros – interface Referência (R)

Referência (R)	$F_{ruptura}$ (kN)	$f_{ct,f}$ (MPa)	TD 1/3 (mm)	TD 2/4 (mm)	ϵ Clip (mm/mm)	ϵ_{13} (CAR) (mm/mm)	ϵ_{14} (UHPC) (mm/mm)	ϵ_{15} (mm/mm)	Clip (mm)
R1	26,14	5,02	-0,045	-0,050	-0,0052				-0,041
R2	26,65	5,12	-0,039	-0,029	-0,0029				-0,023
R4	22,48	4,32	-0,035	-0,035	-0,0025	-0,00009	-0,00009	-0,00009	-0,020
R5	16,02	3,07	-0,018	-0,018	-0,0018				-0,014
R6	17,58	3,38	-0,023	-0,025	-0,0014	-0,00008	-0,00006	-0,00007	-0,011
Média	21,77	4,18	-0,032	-0,032	-0,0021	-0,00009	-0,00008	-0,00008	-0,017
Coefficiente de variação (%)	22,26	22,26	-35,10	-37,67	-31,257				-31,26
Desvio padrão (S)	4,85	0,93	0,011	0,012	0,0007				0,005

Tabela C5 - Força de ruptura e correspondentes medições da média dos transdutores de deslocamento, deformação do clip gage e extensômetros – interface Tela (T)

Tela (T)	$F_{ruptura}$ (kN)	$f_{ct,f}$ (MPa)	TD 1/3 (mm)	TD 2/4 (mm)	ϵ Clip (mm/mm)	ϵ_{13} (CAR) (mm/mm)	ϵ_{14} (UHPC) (mm/mm)	ϵ_{15} (mm/mm)	Clip (mm)
T1	16,94	3,252	-0,027	-0,025	-0,0020125				-0,016
T2	14,28	2,743	-0,031	-0,031	-0,0022125				-0,018
T4	14,05	2,699			-0,0013375	-0,000055	-0,000051	-0,000085	-0,011
T6	20,51	3,938	-0,034	-0,035	-0,0030625				-0,025
Média	16,45	3,158	-0,031	-0,030	-0,002	-0,000055	-0,000051	-0,000085	-0,0173
Coefficiente de variação (%)	18,29	18,292	-	-	-32,962				-32,962
Desvio padrão (S)	3,00	0,578	0,004	0,005	0,001				-31,257

Tabela C6 - Força de ruptura e correspondentes medições da média dos transdutores de deslocamento, deformação do clip gage e extensômetros – interface Intermediária - fibra (In)

Intermediária – fibra (In)	$F_{ruptura}$ (kN)	$f_{ct,f}$ (MPa)	TD 1/3 (mm)	TD 2/4 (mm)	ε Clip (mm/mm)	ε 13 (CAR) (mm/mm)	ε 14 (UHPC) (mm/mm)	ε 15 (mm/mm)	Clip (mm)
In1	23,72	4,55	-0,039	-0,036	-0,002				-0,018
In2	19,96	3,83	-0,110	-0,114	-0,013	-0,00012	-0,00009	-0,00011	-0,110
In3	25,13	4,82	-0,068	-0,075	-0,008				-0,070
In5	19,69	3,78	-0,026	-0,031	-0,002	-0,00004	-0,00005	-0,00010	-0,018
Média	22,12	4,24	-0,061	-0,064	-0,006	-0,00008	-0,00007	-0,00011	-0,054
Coefficiente de variação (%)	12,30	12,30	-61,33	-60,33	-83,07				-83,070
Desvio padrão (S)	2,72	0,52	0,037	0,039	0,0056				0,045

Tabela C7 - Força de ruptura e correspondentes medições da média dos transdutores de deslocamento e deformação do clip gage – monolítico CAR

Monolítico CAR	$F_{ruptura}$ (kN)	$f_{ct,f}$ (MPa)	TD CAR (mm)	ε Clip (mm/mm)
CAR 1	25,45	4,89	-0,061	-0,004
CAR 2	27,42	5,27	-0,047	-0,004
CAR 3	25,91	4,98	-0,044	-0,003
Média	26,26	5,04	-0,051	-0,004
Coefficiente de variação (%)	3,92	3,92	-17,02	-15,73
Desvio padrão (S)	1,03	0,18	0,009	0,0006

Tabela C8 - Força de ruptura e correspondentes medições da média dos transdutores de deslocamento e deformação do clip gage – monolítico UHPC

Monolítico UHPC	$F_{ruptura}$ (kN)	$f_{ct,f}$ (MPa)	TD UHPC (mm)	ε Clip (mm/mm)
UHPC1	91,47	17,56	-0,649	-0,098
UHPC2	78,61	15,09	-0,328	-0,043
UHPC3	81,31	15,61	-0,445	-0,064
Média	83,79	16,09	-0,474	-0,068
Coefficiente de variação (%)	8,09	8,09	-34,22	-40,639
Desvio padrão (S)	6,78	1,30	0,16	0,027

Apêndice D – Resultado da resistência ao cisalhamento direto

D1 – Detalhamento da armadura

O detalhamento da armadura usada na confecção dos corpos de prova para o ensaio de resistência ao cisalhamento direto está apresentado na Figura D1. Em todas as armaduras foram colocados espaçadores de 25 mm.

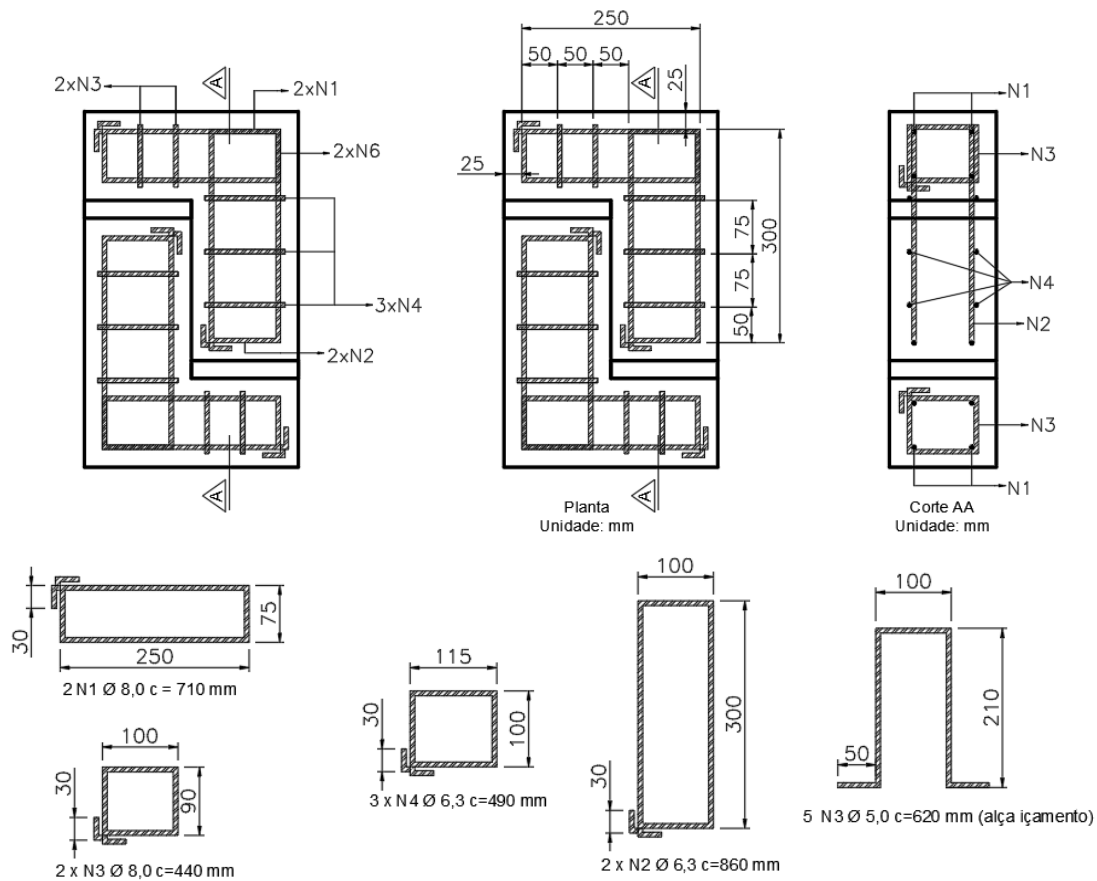


Figura D1 - Detalhamento da armadura usada nos corpos de prova

D2 – Resultados dos transdutores de deslocamento

A Figura D2 mostra o posicionamento dos transdutores de deslocamento posicionados no corpos de prova para o ensaio de resistência à cisalhamento direto e a Figura D3, Figura D4, Figura D5 e Figura D6 mostra as curvas força versus deslocamento dos transdutores de deslocamento.

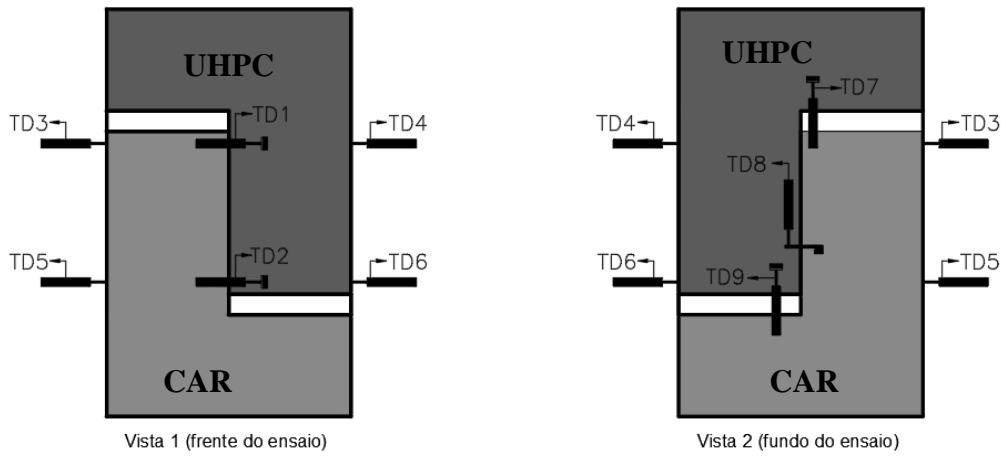


Figura D2 - Posicionamento e nomenclatura dos transdutores de deslocamento usados no ensaio de cisalhamento direto

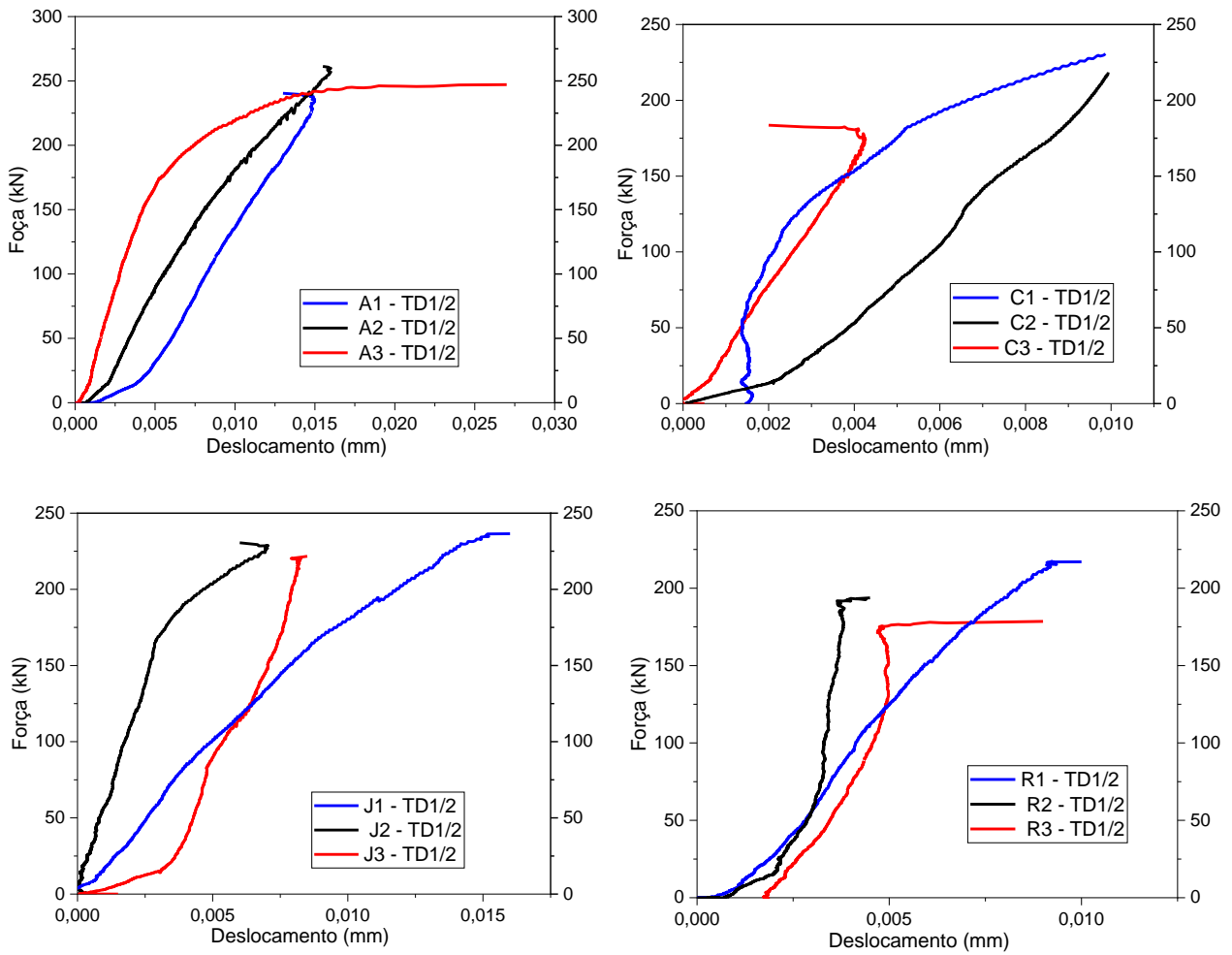
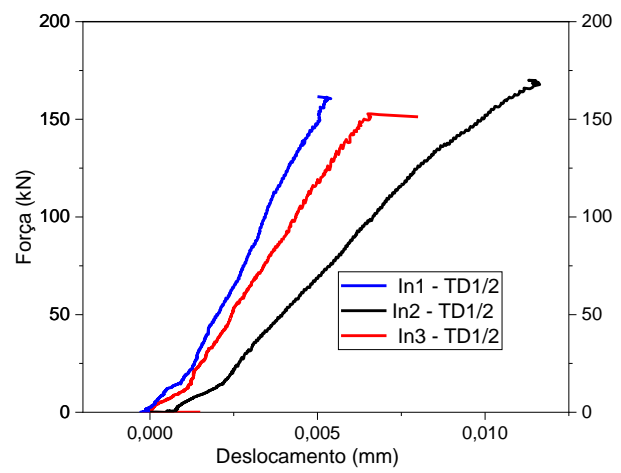
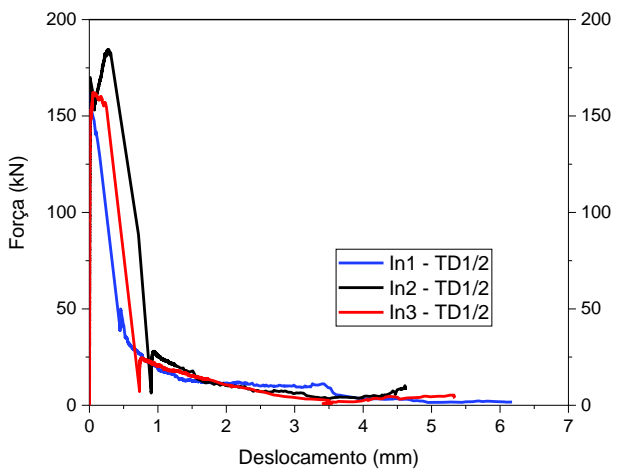
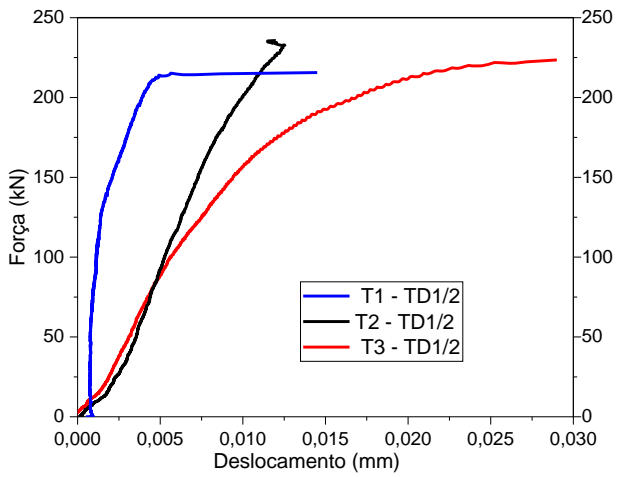


Figura D3 - Curva força versus deslocamento da média dos transdutores de deslocamento 1 e 2 - Parte I



(a) Curva completa

(b) Trecho ascendente

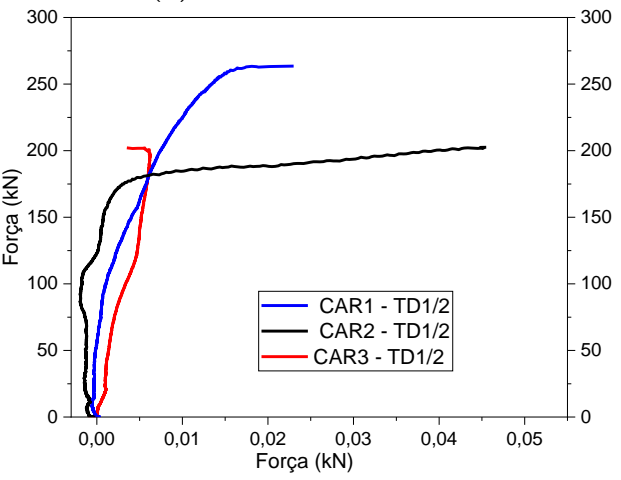
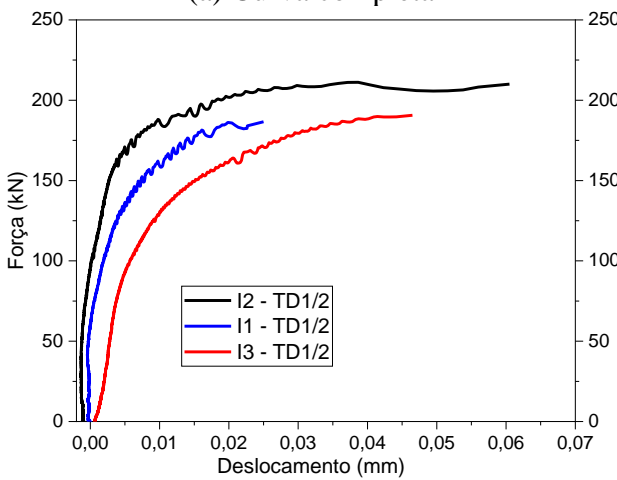


Figura D3 - Curva força versus deslocamento da média dos transdutores de deslocamento 1 e 2 - Parte II

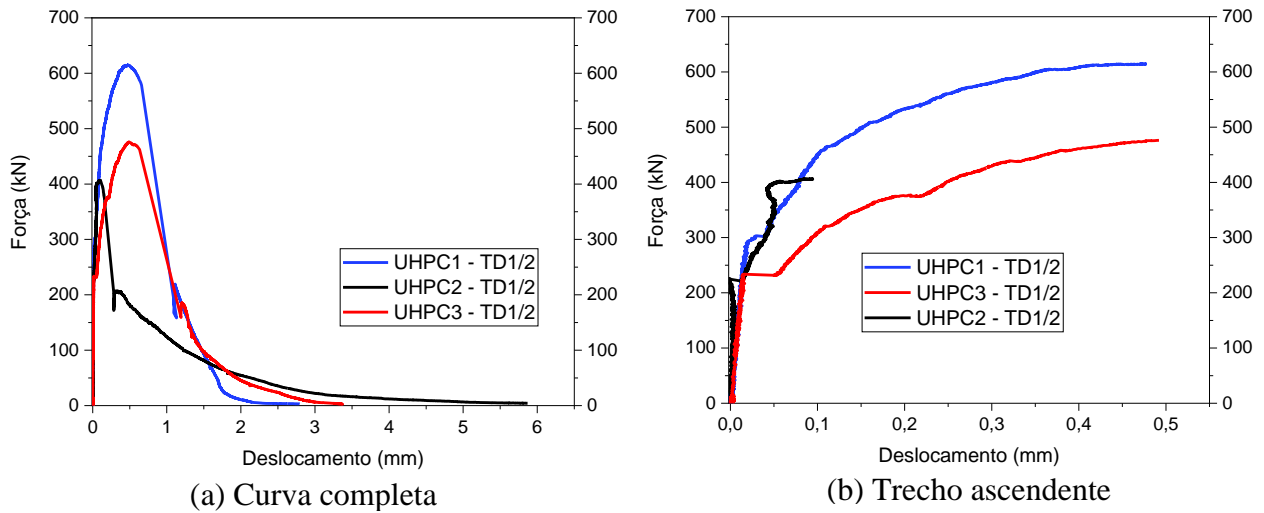


Figura D3 - Curva força versus deslocamento da média dos transdutores de deslocamento 1 e 2 - Parte III

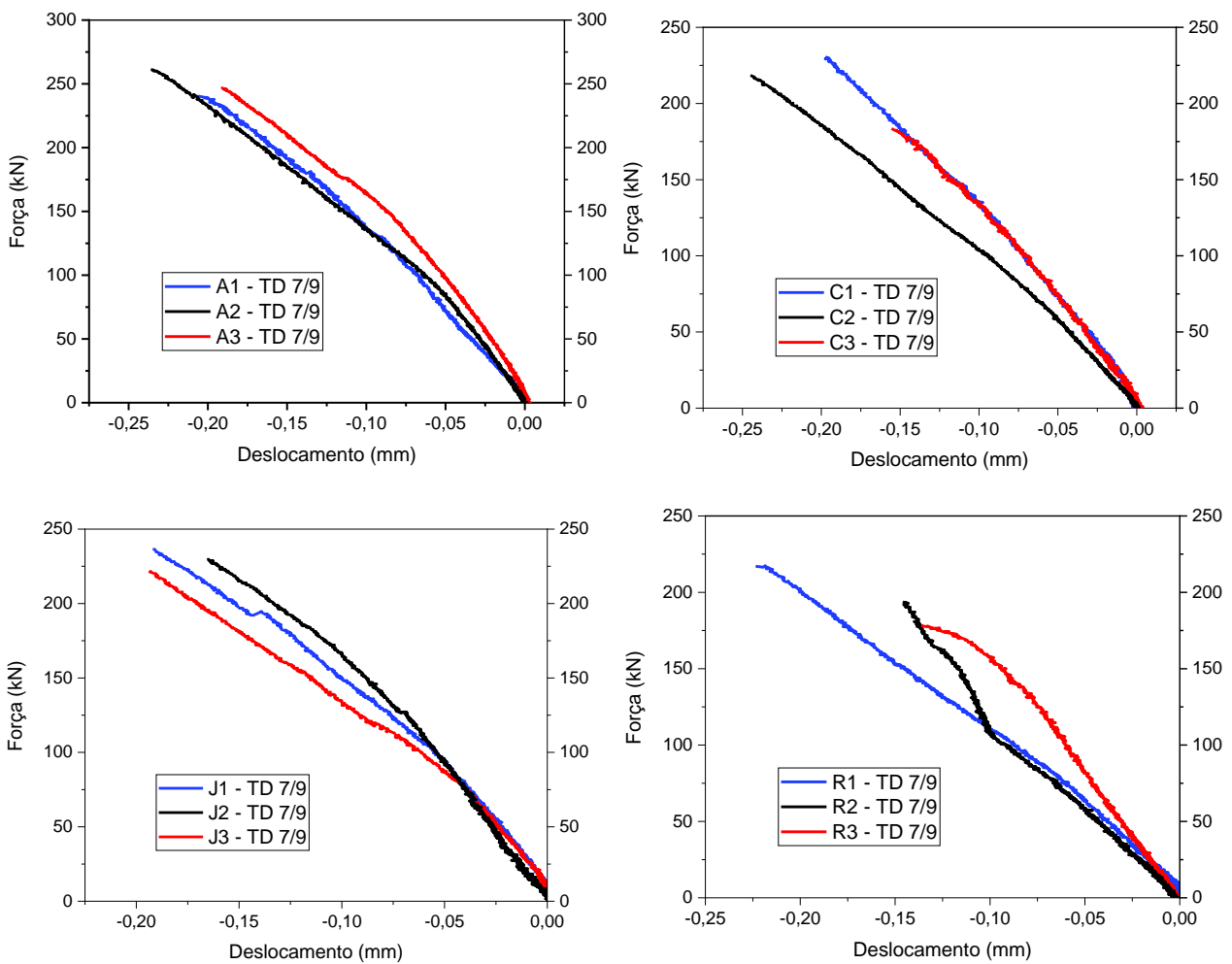
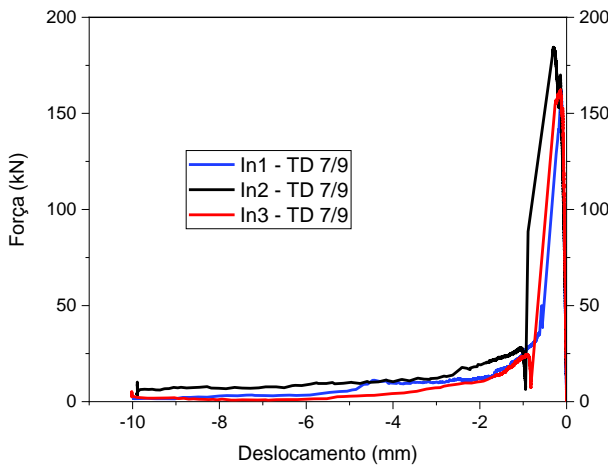
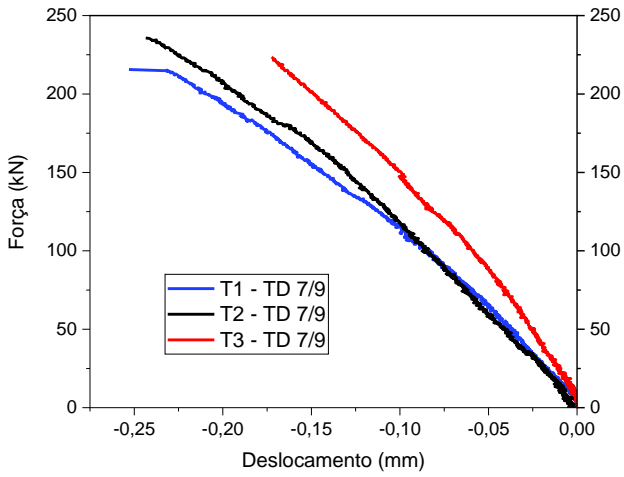
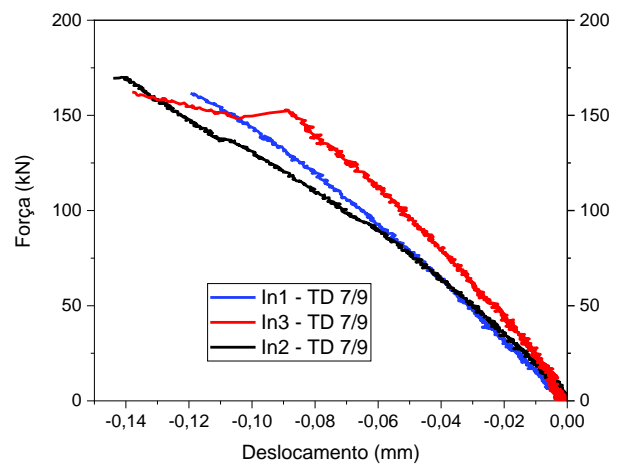


Figura D4 - Curva força versus deslocamento da média dos transdutores de deslocamento 7 e 9 - Parte I



(a) Curva completa



(b) Trecho ascendente

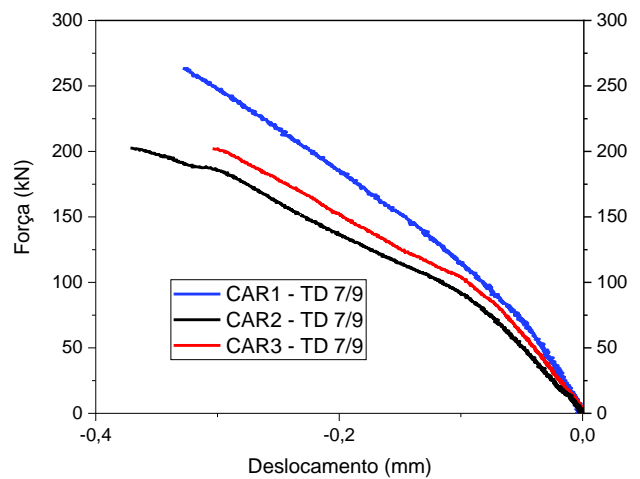
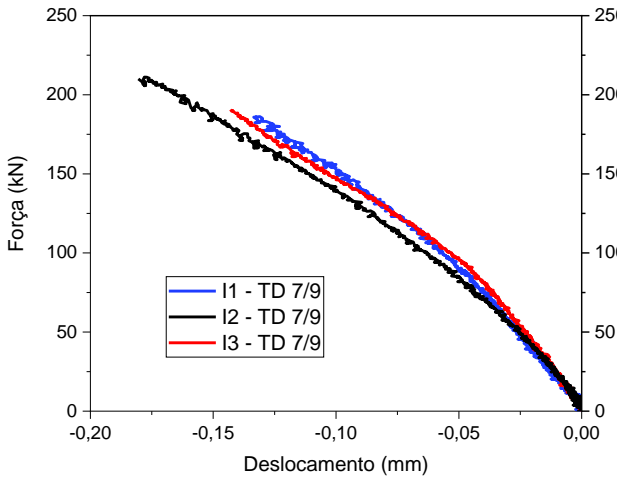


Figura D4 - Curva força versus deslocamento da média dos transdutores de deslocamento 7 e 9 - Parte II

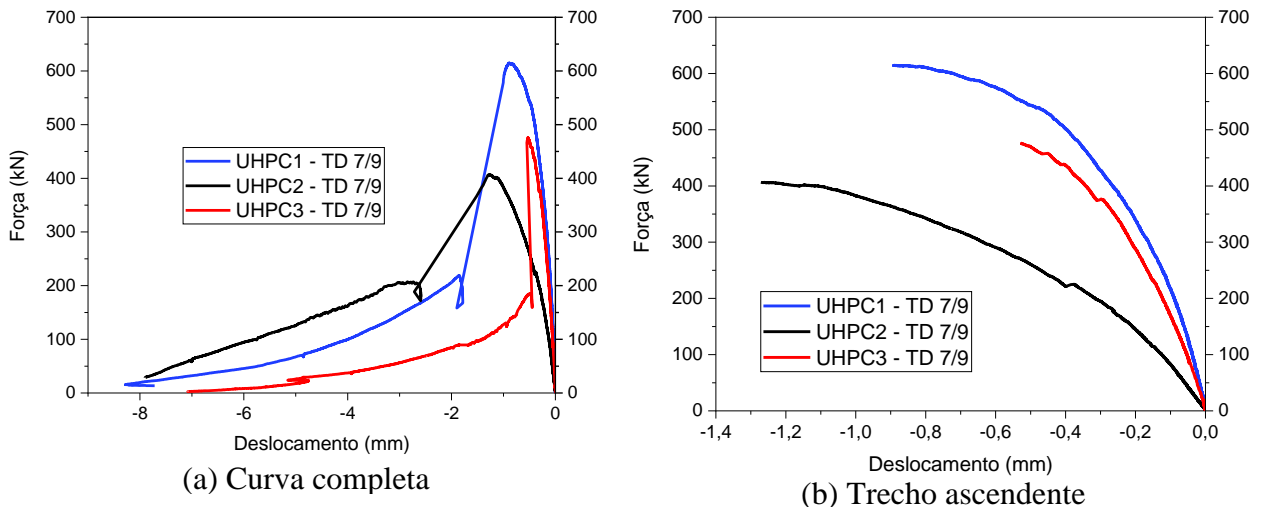


Figura D4 - Curva força versus deslocamento da média dos transdutores de deslocamento 7 e 9 - Parte III

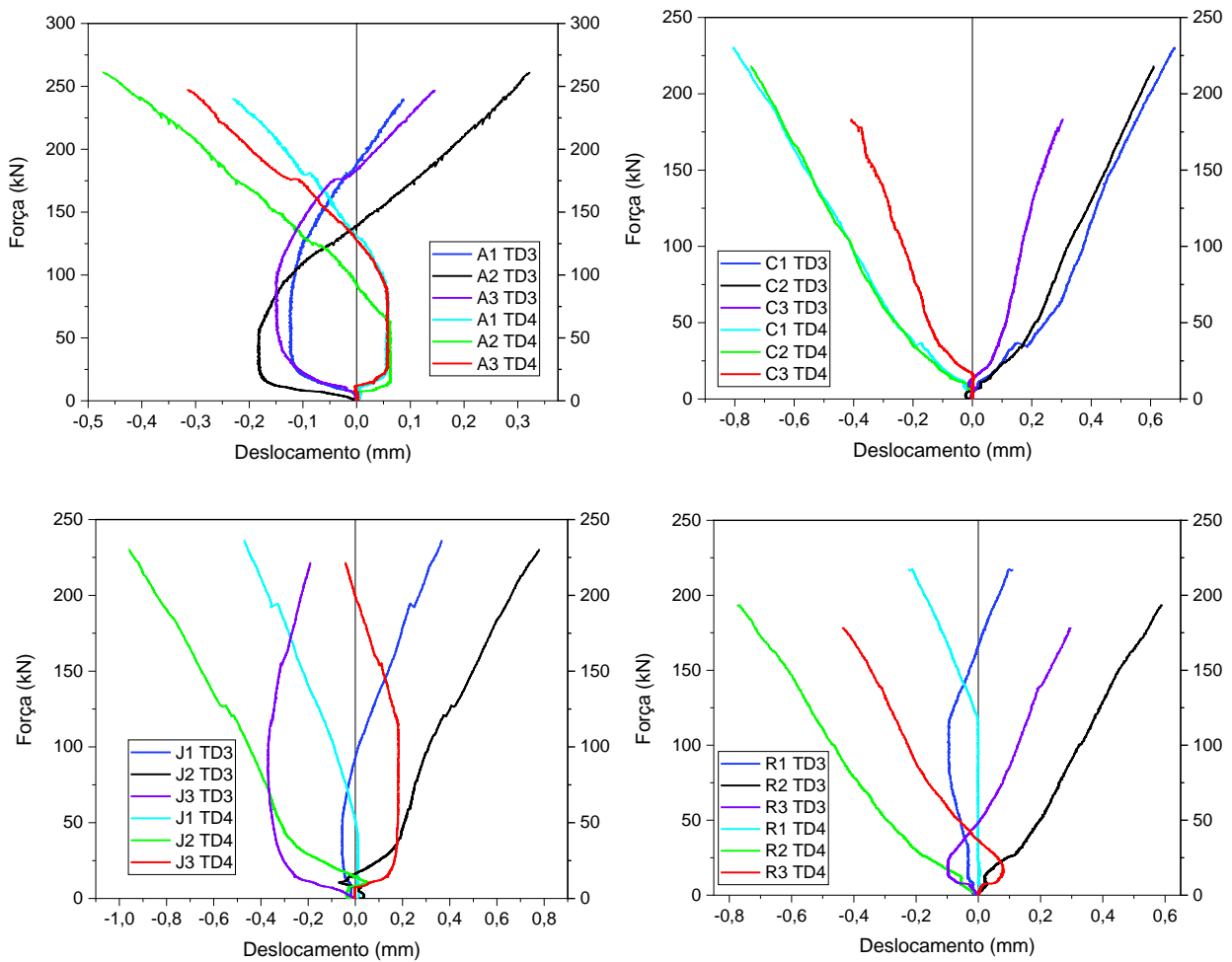


Figura D5 - Curva força versus deslocamento dos transdutores de deslocamento TD3 e TD4 - Parte I

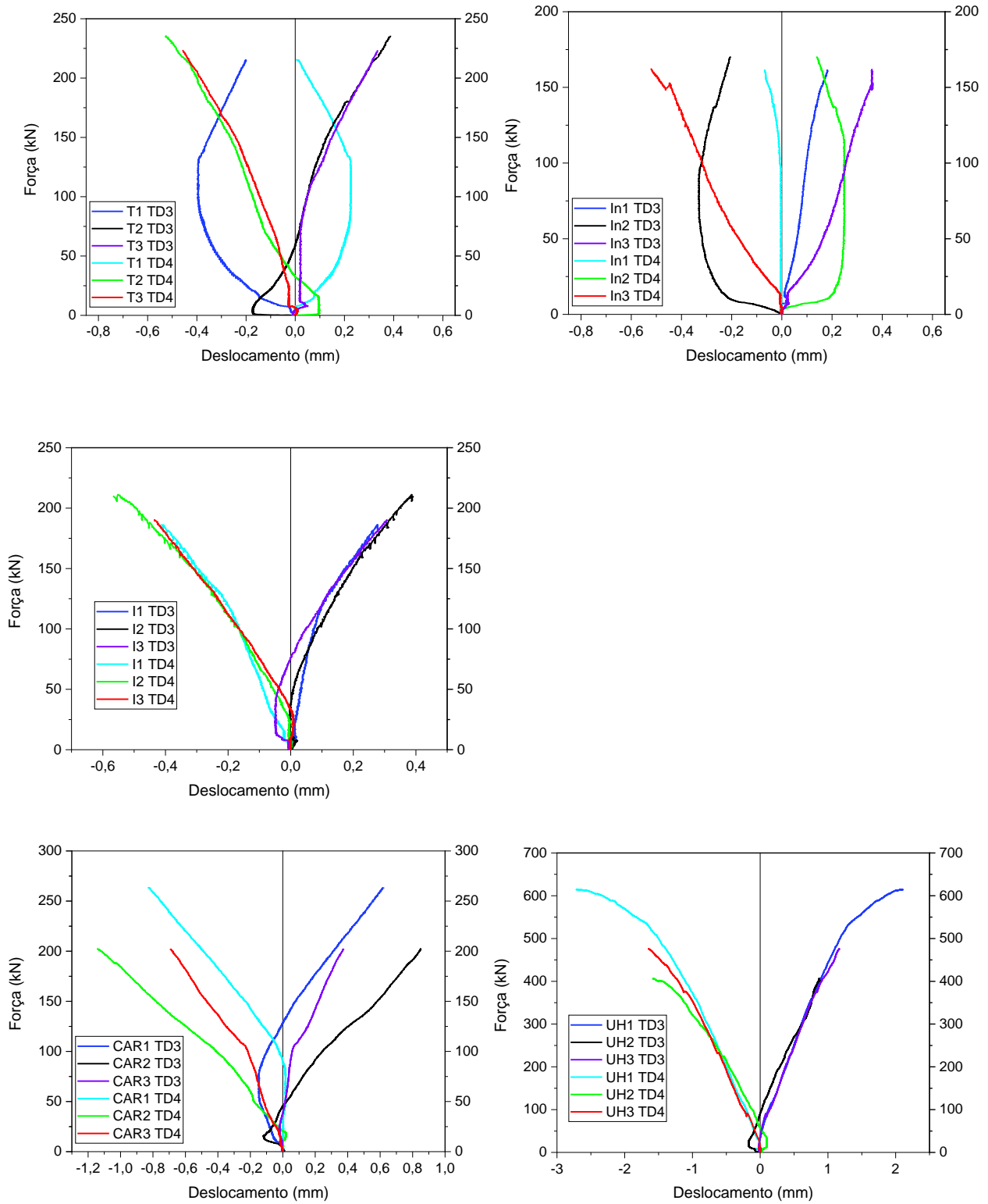


Figura D5 - Curva força versus deslocamento dos transdutores de deslocamento TD3 e TD4 - Parte II

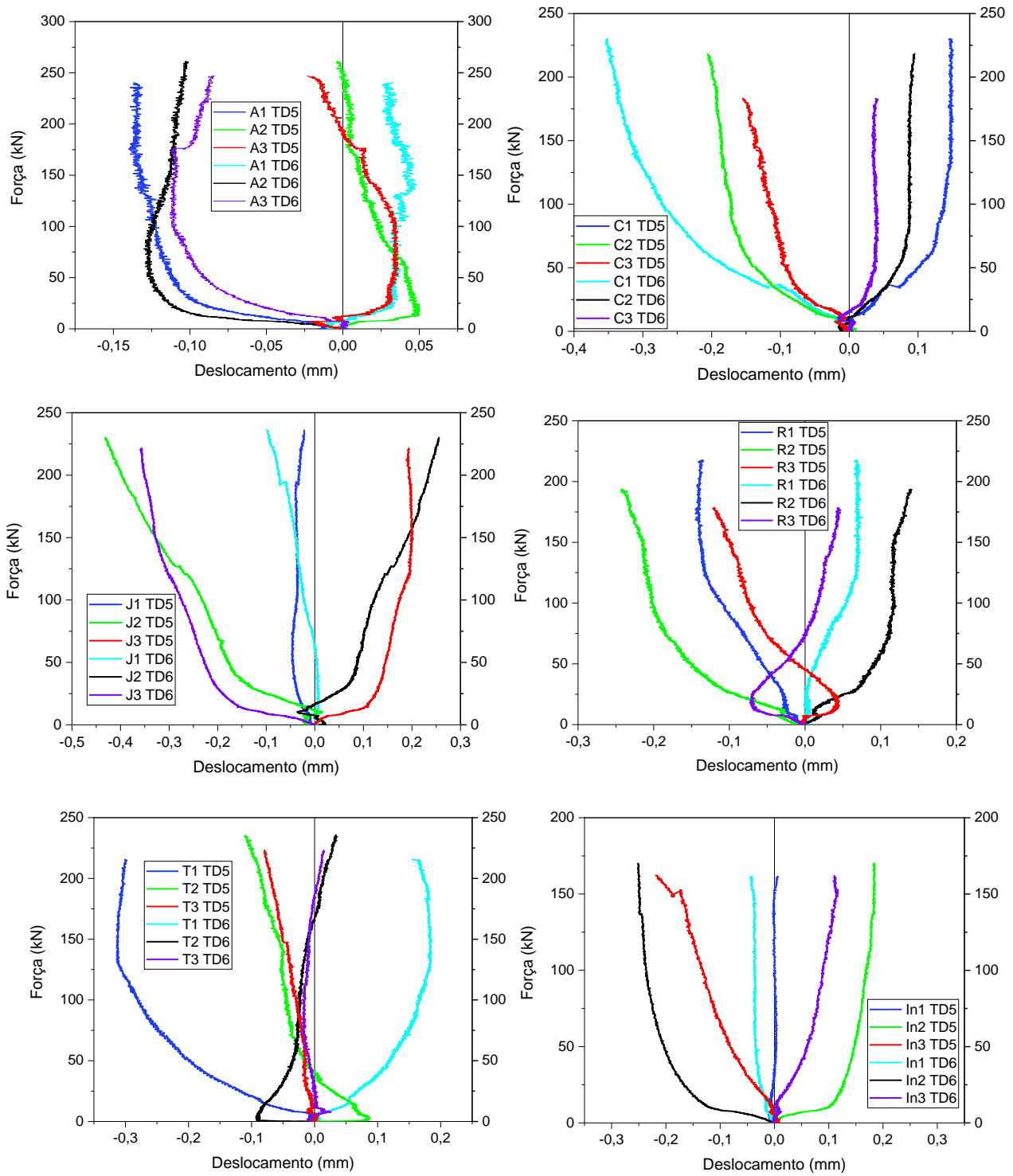


Figura D6 - Curva força versus deslocamento dos transdutores de deslocamento TD5 e TD6 – Parte I

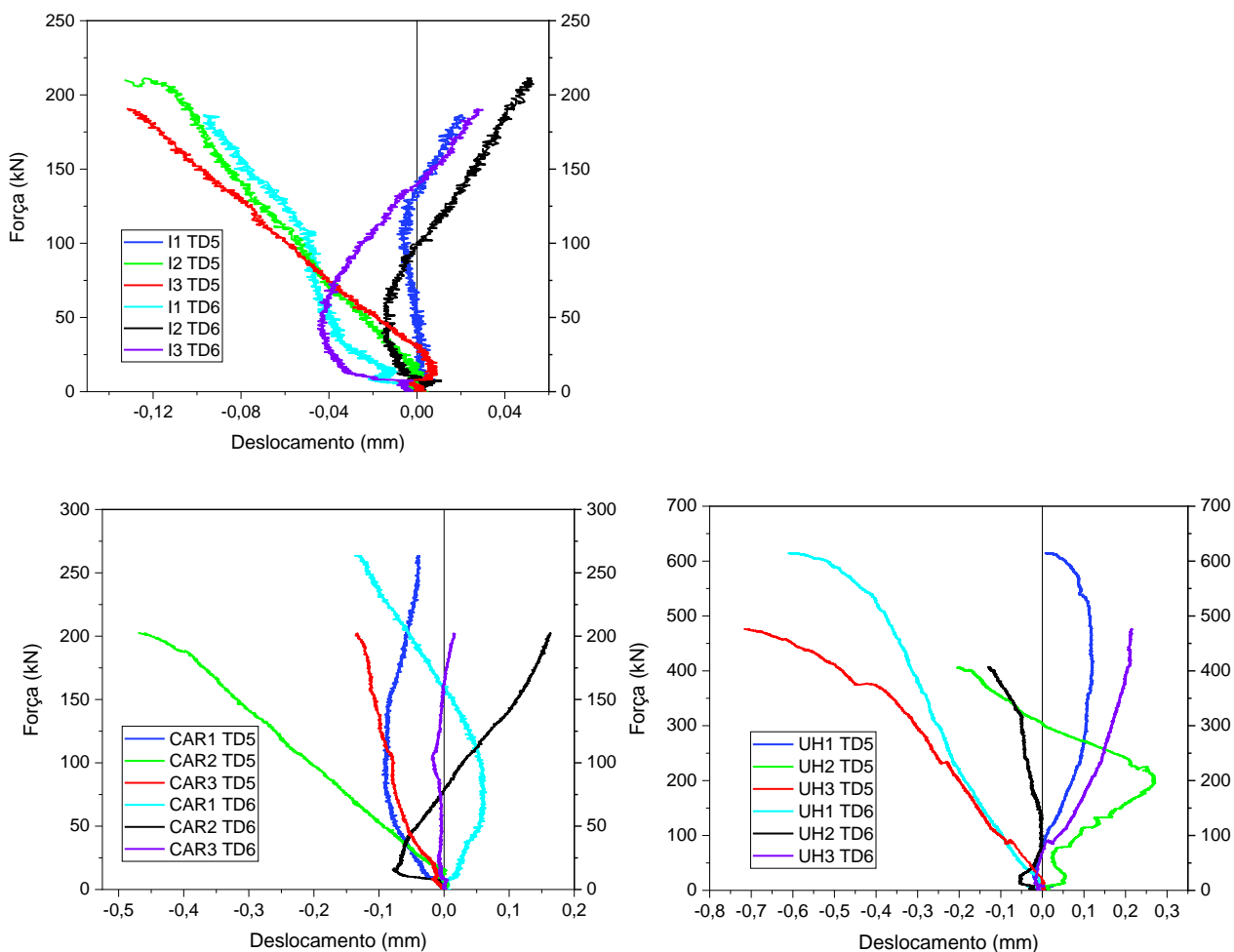


Figura D6 - Curva força versus deslocamento dos transdutores de deslocamento TD5 e TD6 – Parte II

A Tabela D1 à Tabela D9 apresenta os valores da força de ruptura e as suas correspondentes medidas dos transdutores de deslocamento para as amostras estudadas.

Tabela D1 - Força de ruptura e correspondentes medições da média dos transdutores de deslocamento – interface Agregado exposto (A)

Agregado exposto (A)	F _{ruptura} (kN)	τ_{ultima} (c) (MPa)	TD 1 / 2 (mm)	TD 7 / 9 (mm)	TD 8 (mm)
A1	240,44	8,02	0,013	-0,207	-0,053
A2	261,28	8,71	0,015	-0,236	-0,054
A3	247,09	8,24	0,027	-0,191	-0,058
Média	249,60	8,32	0,02	-0,211	-0,055
Coefficiente de variação (%)	4,26	4,263	42,31	-10,939	-4,810
Desvio padrão (S)	10,64	0,36	0,008	0,023	0,003

Tabela D2 - Força de ruptura e correspondentes medições da média dos transdutores de deslocamento – interface Chave de cisalhamento (C)

Chave de cisalhamento (C)	$F_{ruptura}$ (kN)	τ_{ultima} (c) (MPa)	TD 1/2 (mm)	TD 7/9 (mm)	TD 8 (mm)
C1	230,60	7,68	0,013	-0,196	-0,031
C2	218,42	7,28	0,010	-0,245	-0,050
C3	183,58	6,12	0,005	-0,156	-0,049
Média	210,87	7,02	0,009	-0,199	-0,043
Coefficiente de variação (%)	11,57	11,57	43,750	-22,567	-24,675
Desvio padrão (S)	24,4	0,81	0,004	0,045	0,011

Tabela D3 - Força de ruptura e correspondentes medições da média dos transdutores de deslocamento – interface Jato de areia (J)

Jato de areia (J)	$F_{ruptura}$ (kN)	τ_{ultima} (c) (MPa)	TD 1/2 (mm)	TD 7/9 (mm)	TD 8 (mm)
J1	236,51	7,88	0,016	-0,192	-0,016
J2	230,55	7,68	0,006	-0,165	-0,016
J3	221,72	7,39	0,009	-0,193	-0,026
Média	229,59	7,65	0,010	-0,183	-0,019
Coefficiente de variação (%)	3,24	3,24	51,189	-8,590	-29,863
Desvio padrão (S)	7,44	0,25	0,005	0,016	0,006

Tabela D4 - Força de ruptura e correspondentes medições da média dos transdutores de deslocamento – interface Referência (R)

Referência (R)	$F_{ruptura}$ (kN)	τ_{ultima} (c) (MPa)	TD 1/2 (mm)	TD 7/9 (mm)	TD 8 (mm)
R1	217,05	7,23	0,010	-0,224	-0,039
R2	193,79	6,46	0,005	-0,146	-0,043
R3	178,55	5,95	0,009	-0,137	-0,040
Média	196,46	6,54	0,008	-0,169	-0,041
Coefficiente de variação (%)	9,86	9,86	35,919	-28,295	-5,119
Desvio padrão (S)	19,39	0,65	0,003	0,048	0,002

Tabela D5 - Força de ruptura e correspondentes medições da média dos transdutores de deslocamento – interface Tela (T)

Tela (T)	$F_{ruptura}$ (kN)	τ_{ultima} (c) (MPa)	TD 1/2 (mm)	TD 7/9 (mm)	TD 8 (mm)
T1	215,633	7,188	0,015	-0,253	-0,047
T2	235,731	7,858	0,012	-0,244	-0,029
T3	223,508	7,450	0,029	-0,173	-0,024
Média	224,957	7,499	0,019	-0,223	-0,033
Coefficiente de variação (%)	4,502	4,502	49,615	-19,727	-36,290
Desvio padrão (S)	10,13	0,34	0,009	0,044	0,012

Tabela D6 - Força de ruptura e correspondentes medições da média dos transdutores de deslocamento – interface Intermediária - fibra (In)

Intermediária – fibra (In)	$F_{ruptura}$ (kN)	τ_{ultima} (MPa)	TD 1/2 (mm)	TD 7/9 (mm)	TD 8 (mm)
In1	161,61	5,38	0,004	-0,120	-0,013
In2	169,48	5,65	0,010	-0,144	-0,017
In3	151,26	5,04	0,008	-0,095	-0,006
Média	160,78	5,36	0,007	-0,119	-0,012
Coefficiente de variação (%)	5,68	5,68	46,453	-20,741	-46,398
Desvio padrão (S)	9,14	0,31	0,003	0,025	0,006

Tabela D7 - Força de ruptura e correspondentes medições da média dos transdutores de deslocamento – interface Intermediária monolítico (I)

Intermediária – monolítico (I)	$F_{ruptura}$ (kN)	τ_{ultima} (MPa)	TD 1/2 (mm)	TD 7/9 (mm)	TD 8 (mm)
I1	186,60	6,22	0,025	-0,133	-0,013
I2	210,04	7,00	0,060	-0,181	-0,017
I3	190,63	6,35	0,047	-0,143	-0,030
Média	195,76	6,52	0,044	-0,152	-0,020
Coefficiente de variação (%)	6,40	6,40	40,270	-16,457	-44,441
Desvio padrão (S)	12,53	0,42	0,018	0,025	0,009

Tabela D8 - Força de ruptura e correspondentes medições da média dos transdutores de deslocamento – monolítico CAR

Monolítico CAR	$F_{ruptura}$ (kN)	τ_{ultima} (MPa)	TD 1/2 (mm)	TD 7/9 (mm)	TD 8 (mm)
CAR 1	263,52	8,784	0,023	-0,329	-0,014
CAR 2	202,54	6,75	0,046	-0,372	-0,064
CAR 3	202,13	6,73	0,033	-0,338	-0,076
Média	222,73	7,42	0,034	-0,346	-0,051
Coefficiente de variação (%)	15,86	15,86	33,320	-6,558	-64,059
Desvio padrão (S)	35,33	1,18	0,011	0,023	0,033

Tabela D9 - Força de ruptura e correspondentes medições da média dos transdutores de deslocamento – monolítico UHPC

Monolítico UHPC	$F_{ruptura}$ (kN)	τ_{ultima} (MPa)	TD 1/2 (mm)	TD 7/9 (mm)	TD 8 (mm)
UHPC 1	614,89	20,49	0,478	-0,893	-0,200
UHPC 2	406,49	13,55	0,096	-1,272	-0,446
UHPC 3	476,27	15,87	0,492	-0,528	-0,189
Média	499,22	16,64	0,355	-0,897	-0,278
Coefficiente de variação (%)	21,25	21,25	63,347	-41,431	-52,206
Desvio padrão (S)	106,08	3,54	0,225	0,372	0,145

Apêndice E – Resultado da resistência ao cisalhamento inclinado

Para medição dos deslocamentos verticais e inclinado (paralelo a interface) foram utilizados transdutores de deslocamento (TD1 / TD2 / TD4) e, para medição do deslocamento perpendicular à interface, foi utilizado clip gage (TD3) (Figura E1).

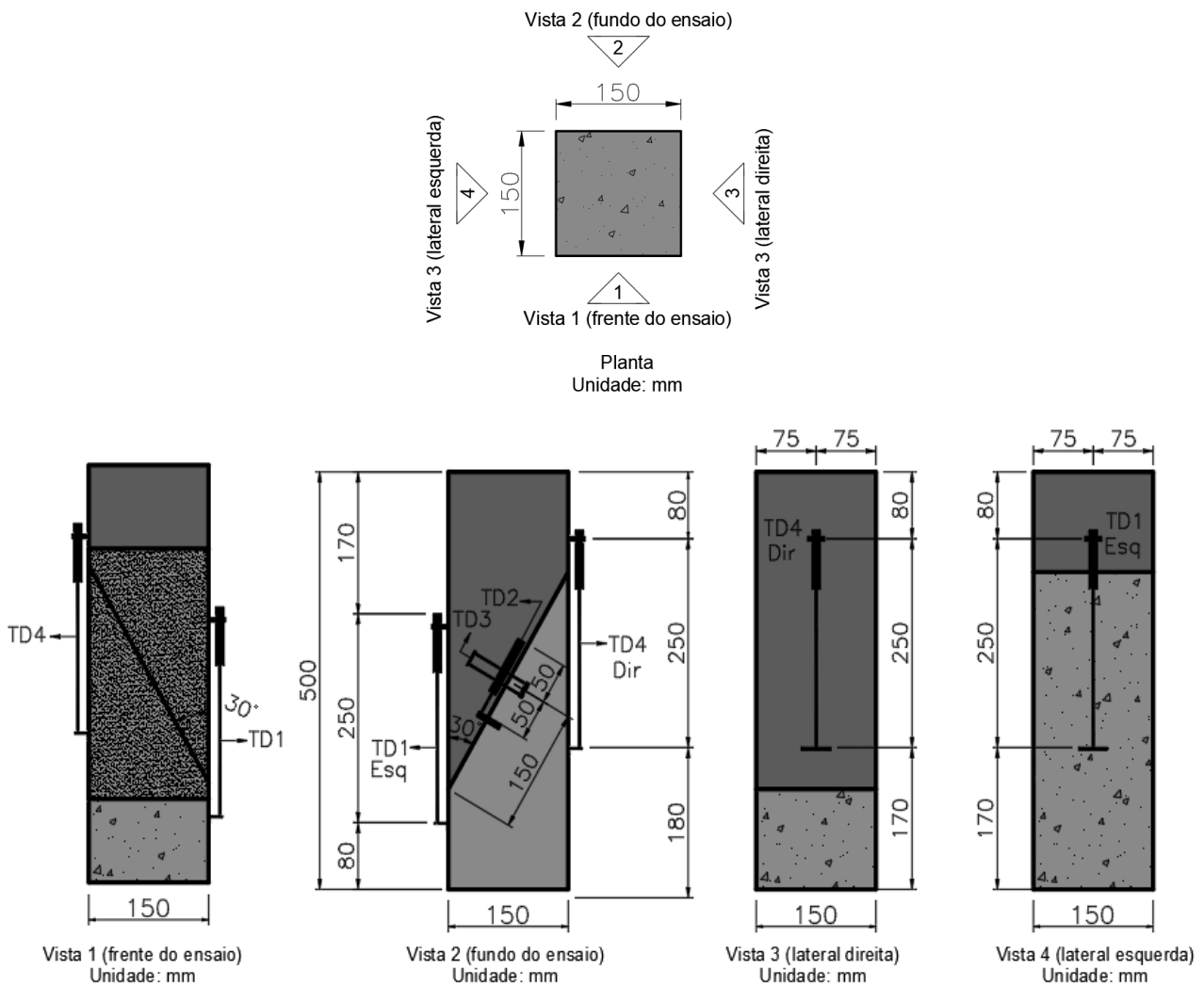


Figura E1 - Posicionamento e nomenclatura da instrumentação usada no ensaio de cisalhamento inclinado

E1.1 - Agregado exposto (A)

A Figura E2 e Figura E3 apresenta as curvas força versus deformação da análise de imagem e dos transdutores de deslocamento posicionados na vertical e, a Figura E4, as curvas força versus deslocamento dos transdutores de deslocamento posicionados na interface Agregado exposto (A).

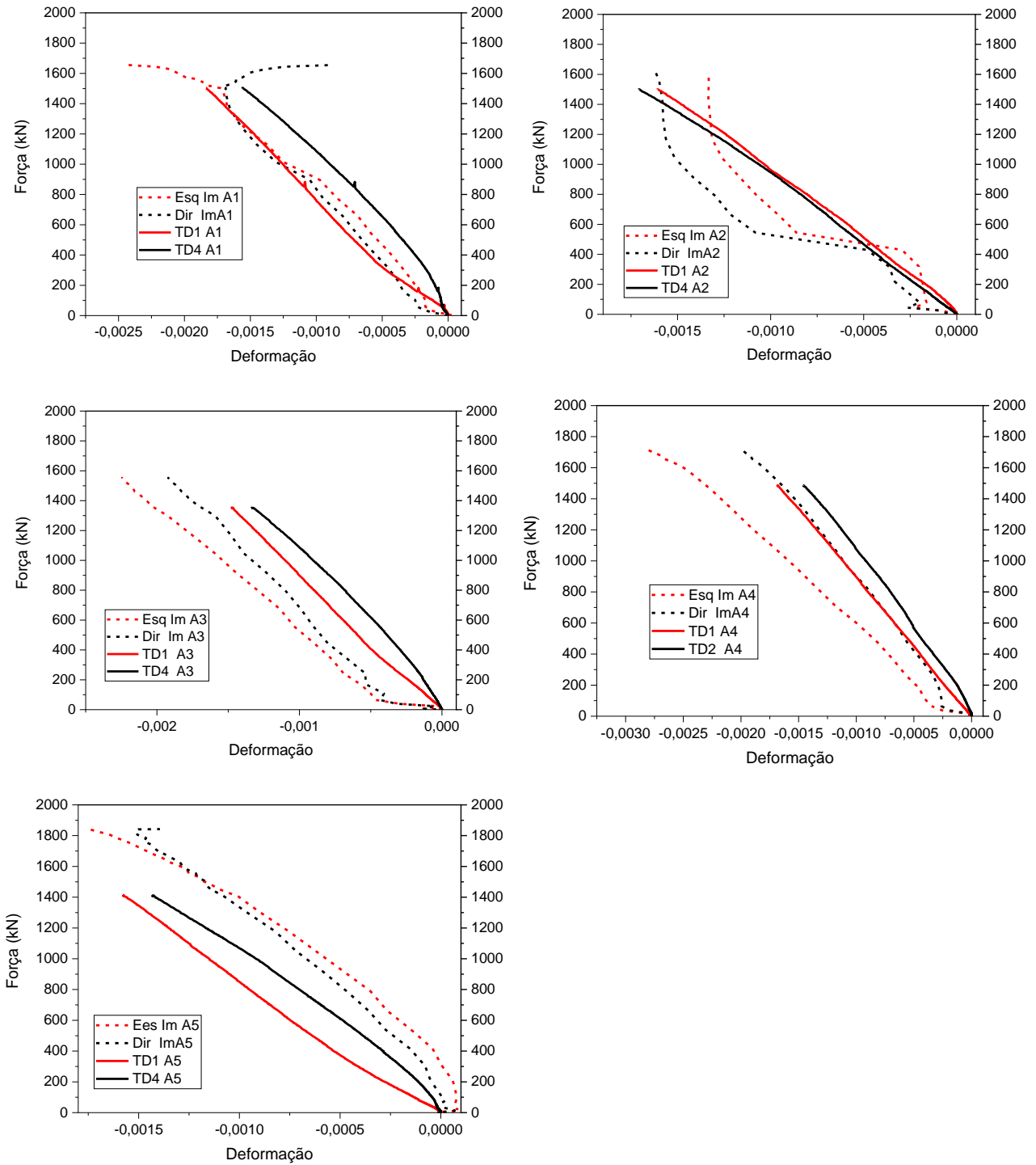


Figura E2- Curva força versus deformação dos transdutores de deslocamento verticais e análise de imagem.
 Unidade: deformação (mm/mm)

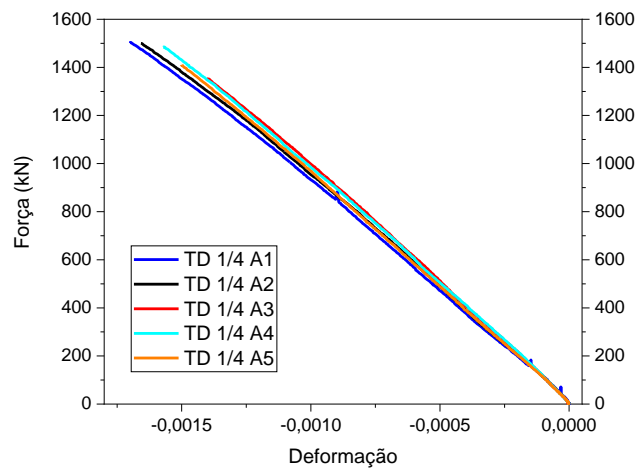


Figura E3 – Curva da força média versus deformação dos transdutores de deslocamento. Unidade: deformação (mm/mm)

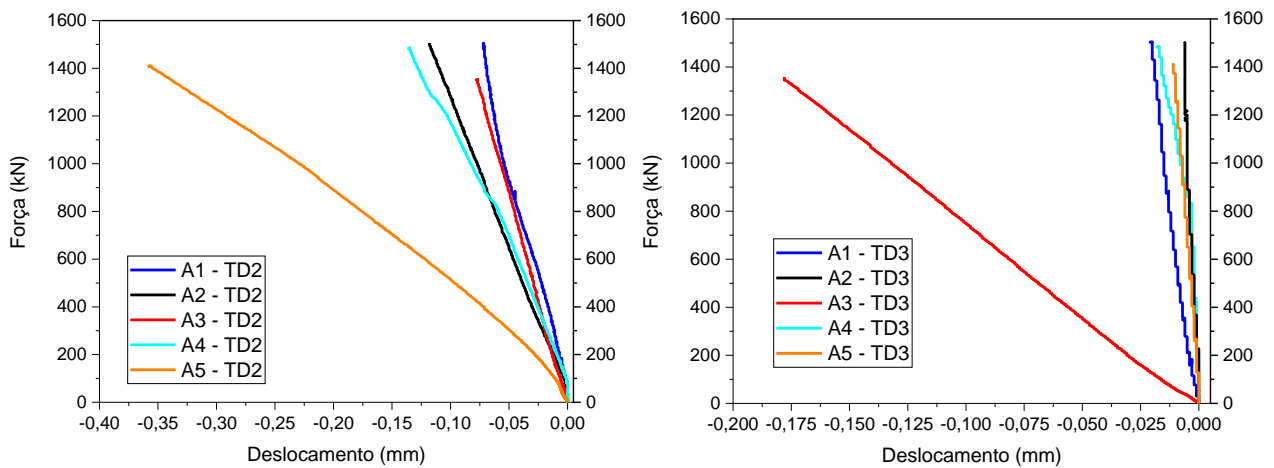


Figura E4 - Curva força versus deslocamento dos transdutores de deslocamento

A Tabela E1 apresenta o valor da força de ruptura e a tensão normal e tangencial na interface, bem como a sua correspondente deformação obtida da análise de imagem. Já a Tabela E2 mostra os deslocamentos e a deformação média obtida pelos transdutores de deslocamento e as suas correspondentes forças. Os valores amostrais em vermelho foram excluídos da leitura pelo critério de Chauvenet, por apresentar discrepancia em relação aos demais valores.

Tabela E1- Força de ruptura, tensão normal e de cisalhamento

Agregado	$F_{ruptura}$ (kN)	σ_0 (N / mm ²)	τ_n (N / mm ²)	σ_n (N / mm ²)	ε Correli (mm/mm)
A1	1644,9	73,109	31,657	18,277	0,00207
A2	1781,834	79,193	34,291	19,798	0,00148
A3	1869,582	83,093	35,980	20,773	0,00208
A4	1665,471	74,021	32,052	18,505	0,00239
A5	1845,165	82,007	35,510	20,502	0,00163
Média	1761,400	78,284	33,898	19,571	0,00193
Coefficiente de variação (%)	5,811	5,811	5,811	5,811	19,219
Desvio padrão (S)	102,35	4,55	1,97	1,14	0,0004

Tabela E2 - Medições dos transdutores de deslocamento e suas correspondentes forças

Agregado	F TD (kN)	TD 2 (mm)	TD 3 (mm)	ε TD 1/4 (mm/mm)
A1	1500,733	0,072	0,021	-0,00170
A2	1500,122	0,118	0,006	-0,00166
A3	1352,857	0,078	0,178	-0,00141
A4	1482,954	0,136	0,018	-0,00157
A5	1408,482	0,358	0,011	-0,00150
Média	1449,030	0,152	0,014	-0,00157
Coefficiente de variação (%)	4,542	20,345	48,445	-7,538
Desvio padrão (S)	65,818	0,031	0,007	0,00012

E1.2 - Chave de cisalhamento (C)

A Figura E5 e Figura E6 apresenta as curvas força versus deformação da análise de imagem e dos transdutores de deslocamento posicionados na vertical e, a Figura E7 as curvas força versus deslocamento dos transdutores de deslocamento posicionados na interface Chave de cisalhamento (C).

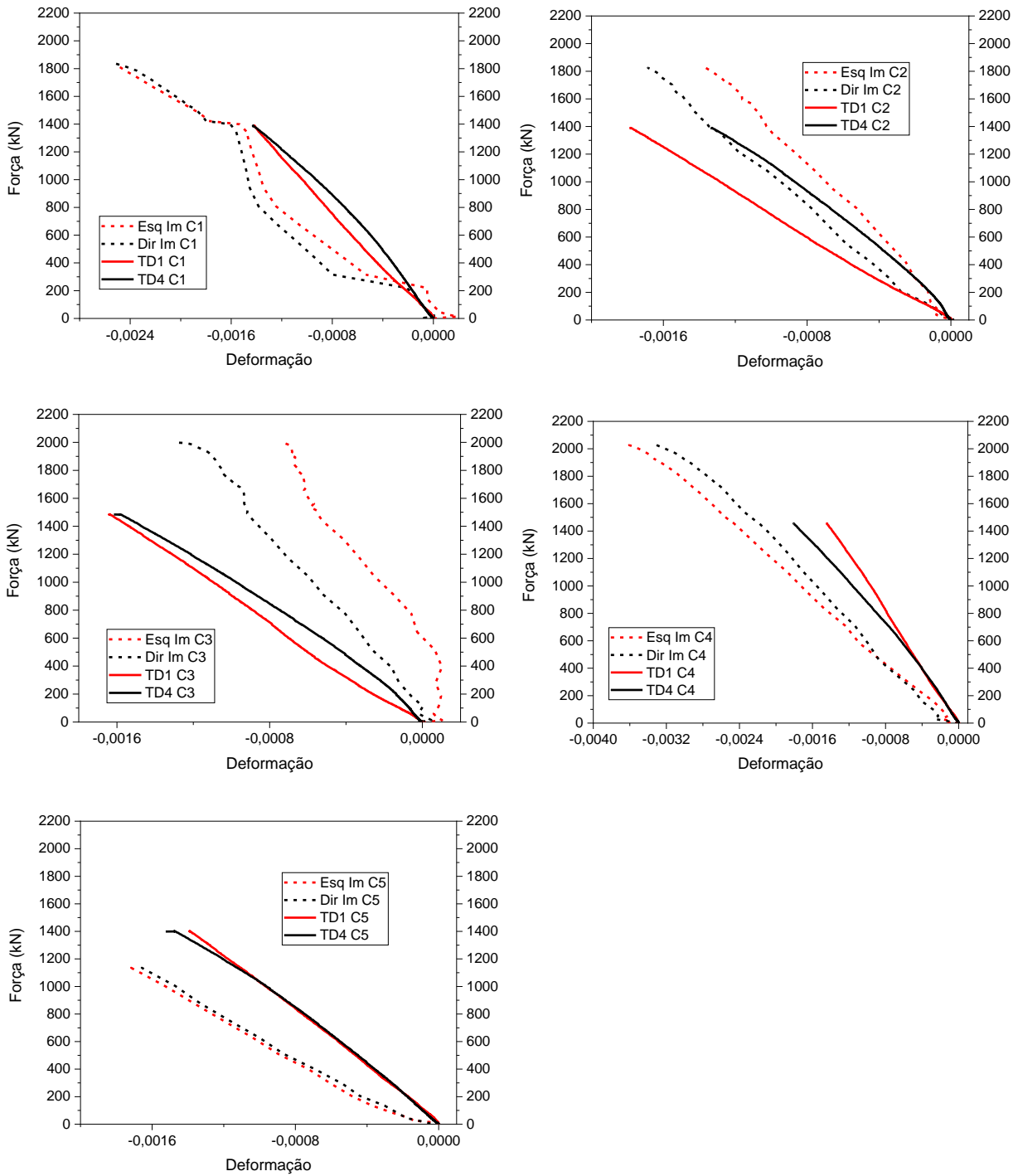


Figura E5 - Curva força versus deformação dos transdutores de deslocamento verticais e análise de imagem.
 Unidade: deformação (mm/mm)

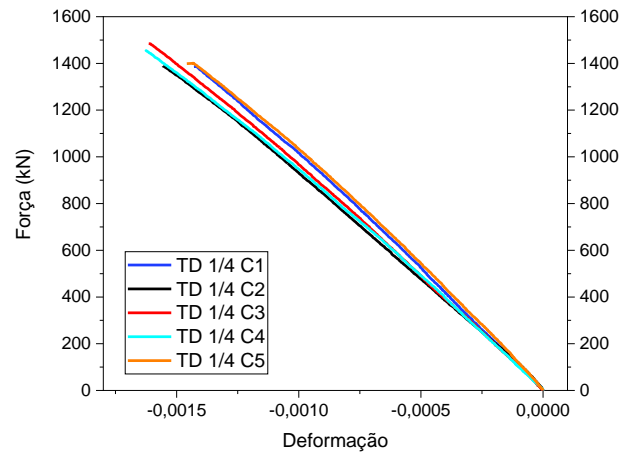


Figura E6 - Curva da força média versus deformação dos transdutores de deslocamento. Unidade: deformação (mm/mm)

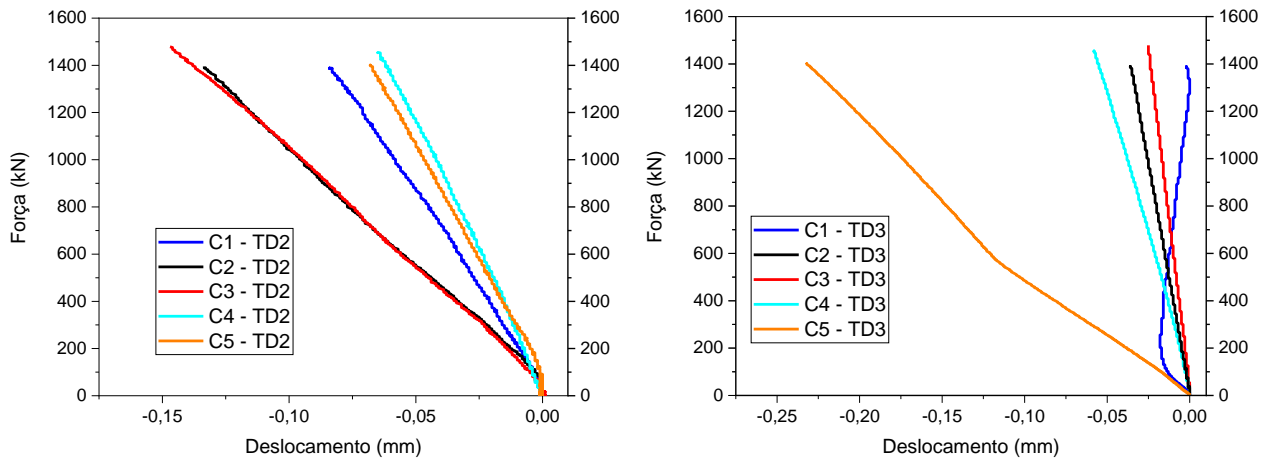


Figura E7 - Curva força versus deslocamento dos transdutores de deslocamento

A Tabela E3 apresenta o valor da força de ruptura e a tensão normal e tangencial na interface, bem como a sua correspondente deformação obtida da análise de imagem. Já a Tabela E4 mostra os deslocamentos e a deformação média obtida pelos transdutores de deslocamento e as suas correspondentes forças. Os valores amostrais em vermelho foram excluídos da leitura pelo critério de Chauvenet, por apresentar discrepância em relação aos demais valores.

Tabela E3 - Força de ruptura, tensão normal e de cisalhamento

Chave	$F_{ruptura}$ (kN)	σ_0 (N / mm ²)	τ_n (N / mm ²)	σ_n (N / mm ²)	ϵ Correli (mm/mm)
C1	2028,14	90,14	39,03	22,53	0,0025
C2	1827,69	81,23	35,17	20,30	0,0015
C3	1998,53	88,82	38,46	22,20	0,0010
C4	2038,13	90,58	39,22	22,64	0,0034
C5	2099,10	93,29	40,39	23,32	0,0030
Média	1998,32	88,81	38,45	22,20	0,0023
Coefficiente de variação (%)	5,11	5,11	5,11	5,11	0,0023
Desvio padrão (S)	102,15	4,54	1,96	1,13	0,0010

Tabela E4 - Medições dos transdutores de deslocamento e suas correspondentes forças

Chave	F TD (kN)	TD 2 (mm)	TD 3 (mm)	ϵ TD 1/4 (mm/mm)
C1	1387,88	0,084	0,020	-0,0014
C2	1389,48	0,134	0,036	-0,0015
C3	1478,45	0,147	0,025	-0,0016
C4	1454,41	0,065	0,058	-0,0016
C5	1399,70	0,068	0,232	-0,0014
Média	1421,98	0,100	0,035	-0,0015
Coefficiente de variação (%)	2,93	38,459	48,574	-6,127
Desvio padrão (S)	41,70	0,038	0,017	0,00009

E1.3 - Jato de areia (J)

A Figura E8 e Figura E9 apresenta as curvas força versus deformação da análise de imagem e dos transdutores de deslocamento posicionados na vertical e, a Figura E10 as curvas força versus deslocamento dos transdutores de deslocamento posicionados na interface Jato de areia (J).

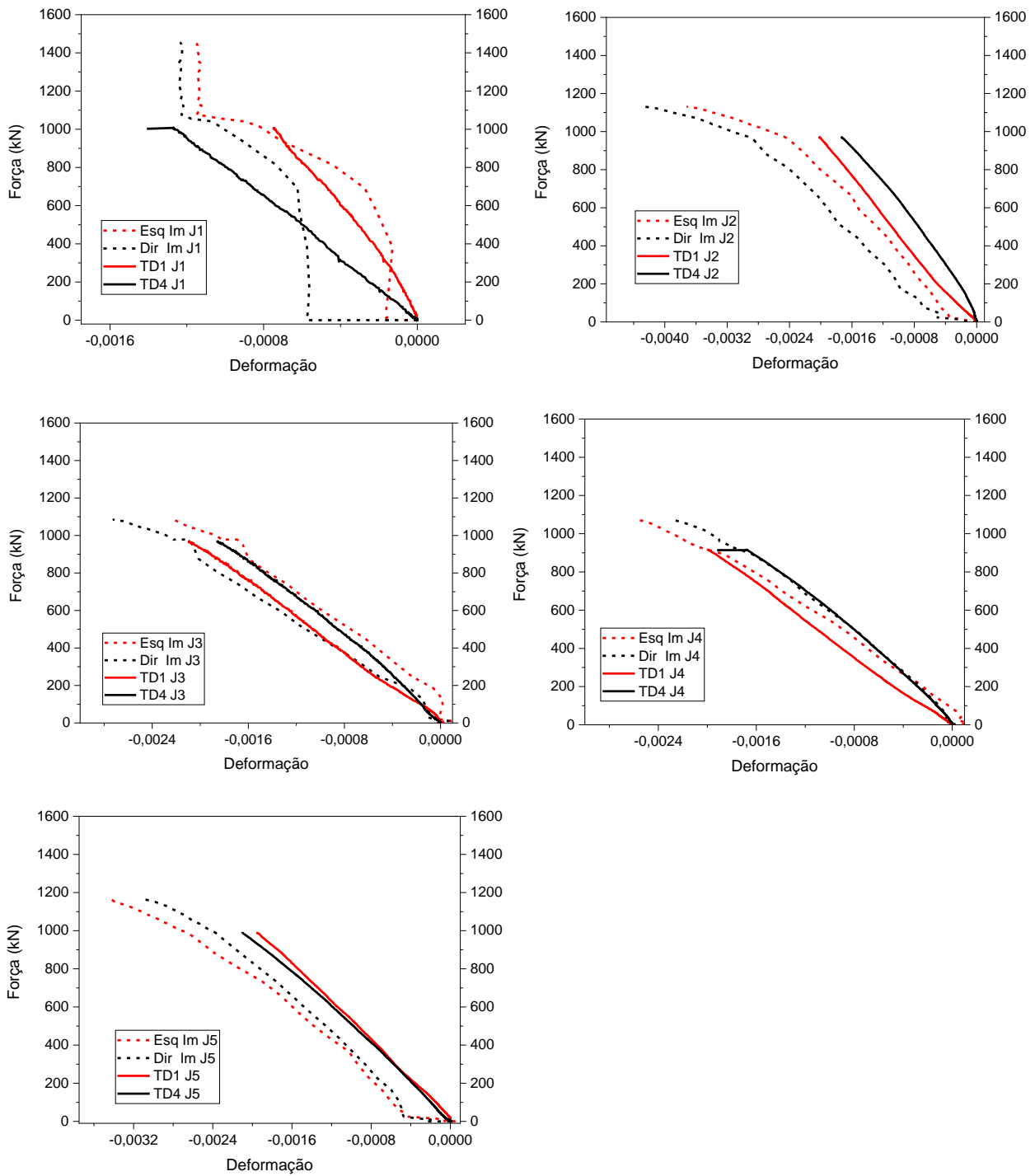


Figura E8 - Curva força versus deformação dos transdutores de deslocamento verticais e análise de imagem. Unidade: deformação (mm/mm)

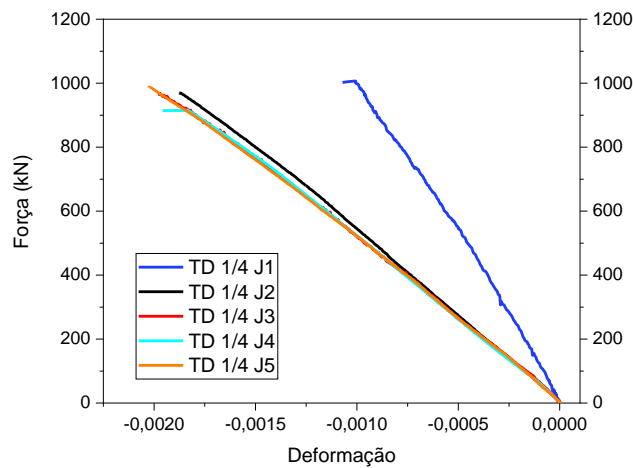


Figura E9 - Curva da força média versus deformação dos transdutores de deslocamento. Unidade: deformação (mm/mm)

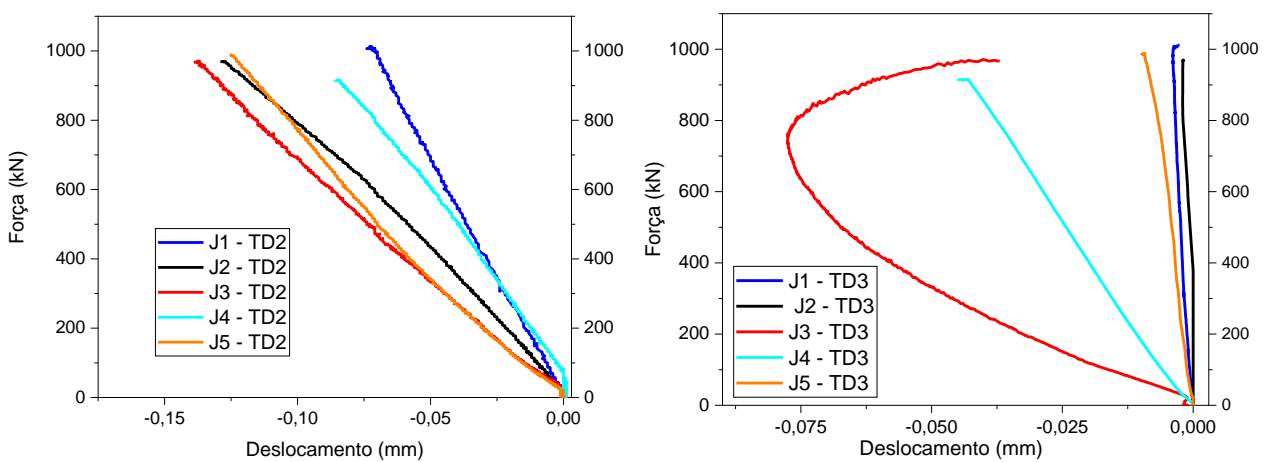


Figura E10 - Curva força versus deslocamento dos transdutores de deslocamento

A Tabela E5 apresenta o valor da força de ruptura e a tensão normal e tangencial na interface, bem como a sua correspondente deformação obtida da análise de imagem. Já a Tabela E6 mostra os deslocamentos e a deformação média obtida pelos transdutores de deslocamento e as suas correspondentes forças. Os valores amostrais em vermelho foram excluídos da leitura pelo critério de Chauvenet, por apresentar discrepância em relação aos demais valores.

Tabela E5 - Força de ruptura, tensão normal e de cisalhamento

Jato de areia	$F_{ruptura}$ (kN)	σ_0 (N / mm ²)	τ_n (N / mm ²)	σ_n (N / mm ²)	ε Correli (mm/mm)
J1	1902,62	84,56	36,61	21,14	0,0012
J2	1131,04	50,26	21,76	12,56	0,0039
J3	1116,24	49,61	21,48	12,40	0,0024
J4	1077,47	47,88	20,73	11,97	0,0024
J5	1166,21	51,83	22,44	12,95	0,0032
Média	1122,74	49,90	21,60	12,47	0,0026
Coefficiente de variação (%)	3,27	3,27	3,27	3,27	38,942
Desvio padrão (S)	36,74	1,63	0,70	0,40	0,0010

Tabela E6 - Medições dos transdutores de deslocamento e suas correspondentes forças – interface Jato de areia (J)

Jato de areia	F TD	TD 2 (mm)	TD 3 (mm)	ε TD 1/4 (mm/mm)
J1	1012,77	0,074	0,004	-0,0010
J2	969,96	0,061	0,001	-0,0018
J3	966,07	0,137	0,079	-0,0019
J4	915,63	0,086	0,045	-0,0019
J5	988,43	0,125	0,009	-0,0020
Média	970,57	0,097	0,028	-0,0017
Coefficiente de variação (%)	3,69	34,056	122,269	-22,3101
Desvio padrão (S)	35,84	0,033	0,034	0,0004

E1.4 - Referência (R)

A Figura E11 e Tabela E12 apresenta as curvas força versus deformação da análise de imagem e dos transdutores de deslocamento posicionados na vertical e, a Figura E13 as curvas força versus deslocamento dos transdutores de deslocamento posicionados na interface Referência (R).

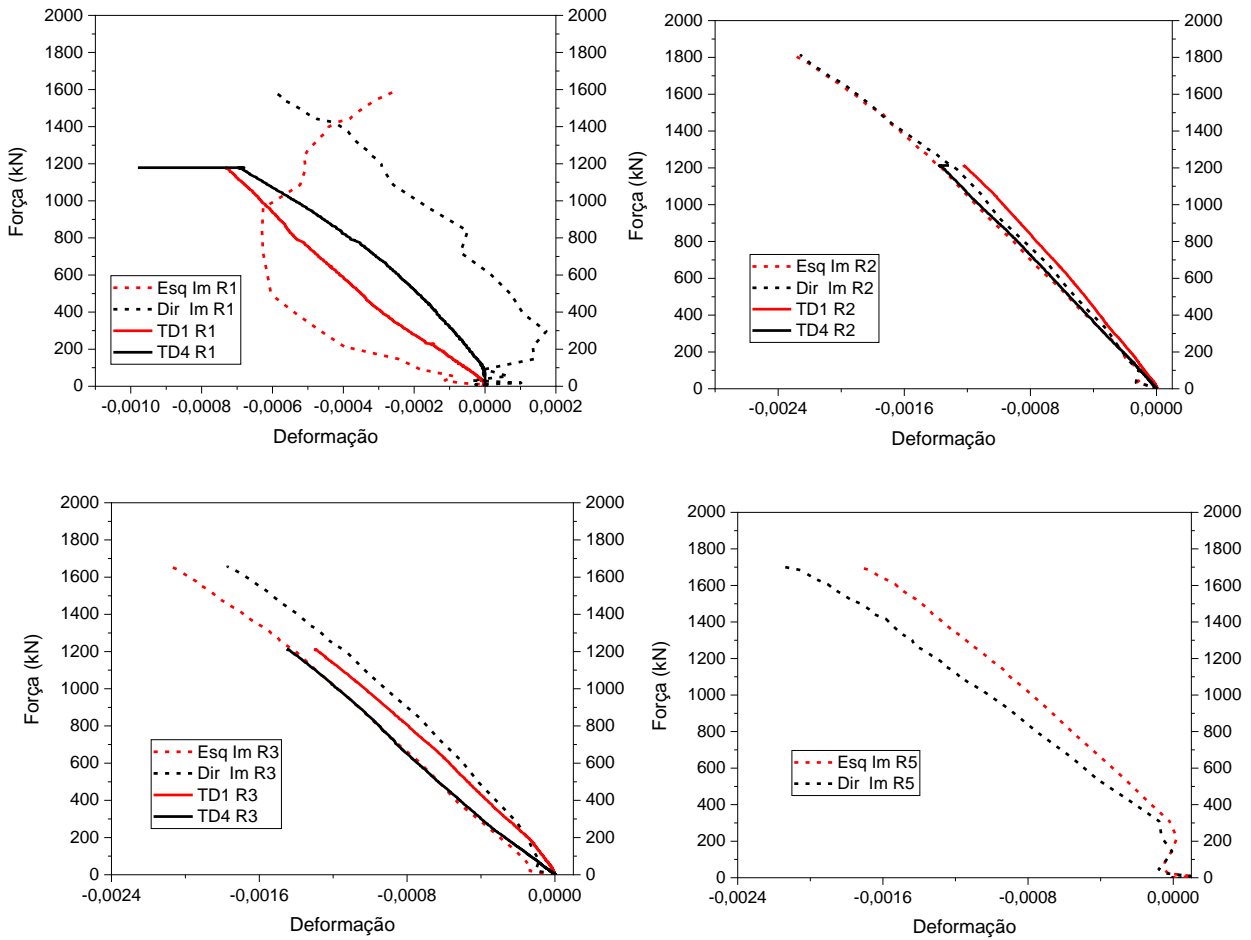


Figura E11 - Curva força versus deformação dos transdutores de deslocamento verticais e análise de imagem. Unidade: deformação (mm/mm)

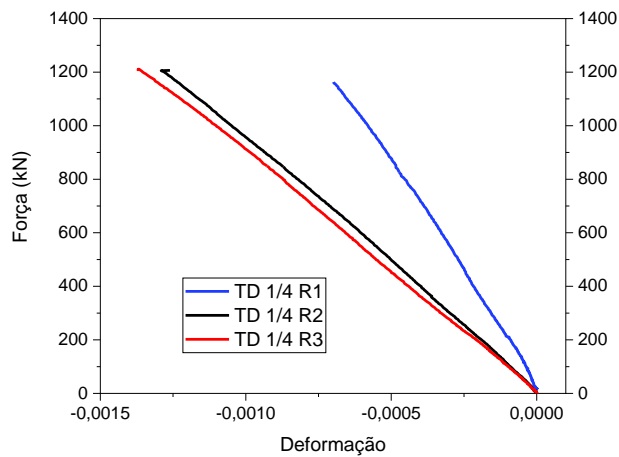


Figura E12 - Curva da força média versus deformação dos transdutores de deslocamento. Unidade: deformação (mm/mm)

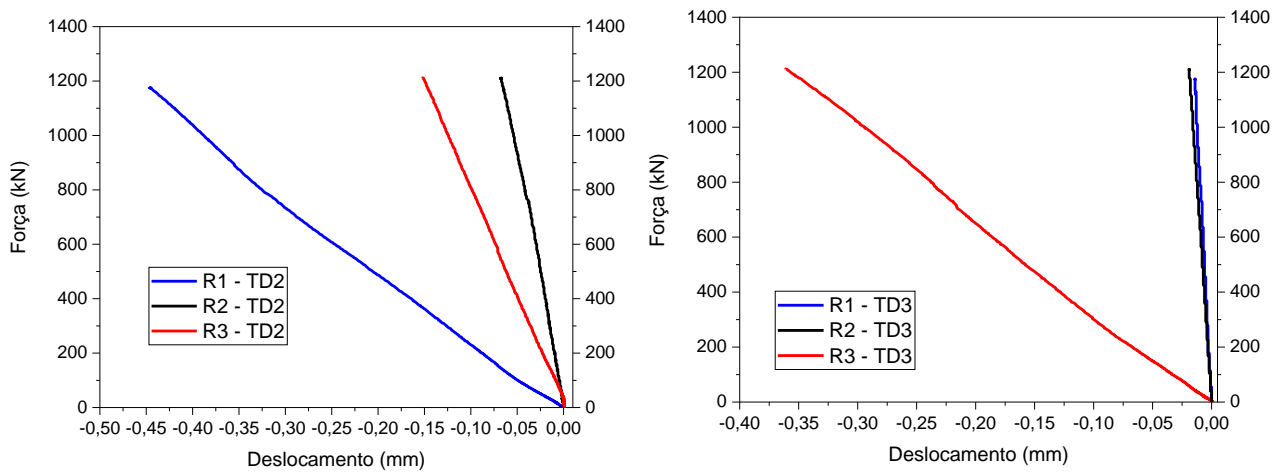


Figura E13 - Curva força versus deslocamento dos transdutores de deslocamento

A Tabela E7 apresenta o valor da força de ruptura e a tensão normal e tangencial na interface, bem como a sua correspondente deformação obtida da análise de imagem. Já a Tabela E8 mostra os deslocamentos e a deformação média obtida pelos transdutores de deslocamento e as suas correspondentes forças. Os valores amostrais em vermelho foram excluídos da leitura pelo critério de Chauvenet, por apresentar discrepância em relação aos demais valores.

Tabela E7 - Força de ruptura, tensão normal e de cisalhamento

Referência	$F_{ruptura}$ (kN)	σ_0 (N / mm ²)	τ_n (N / mm ²)	σ_n (N / mm ²)	ϵ Correlli (mm/mm)
R1	1611,22	71,61	31,00	17,90	0,0006
R2	1818,91	80,84	35,00	20,21	0,0022
R3	1673,02	74,35	32,19	18,58	0,0019
R5	1399,63	62,20	26,93	15,55	0,0019
Média	1625,69	72,25	31,28	18,06	0,0016
Coefficiente de variação (%)	10,70	10,70	10,70	10,70	43,42
Desvio padrão (S)	174,05	7,73	3,35	1,93	0,0007

Tabela E8 - Medições dos transdutores de deslocamento e suas correspondentes forças

Referência	F TD	TD 2 (mm)	TD 3 (mm)	ϵ TD 1/4 (mm/mm)
R1	1176,52	0,447	0,014	-0,0008
R2	1214,36	0,068	0,019	-0,0013
R3	1210,09	0,152	0,361	-0,0013
Média	1200,32	0,222	0,017	-0,0011
Coefficiente de variação (%)	1,72	89,527	21,427	-23,834
Desvio padrão (S)	20,72	0,199	0,004	0,0002

E1.5 - Tela (T)

A Figura E14 e Figura E15 apresenta as curvas força versus deformação da análise de imagem e dos transdutores de deslocamento posicionados na vertical e, a Figura E16 as curvas força versus deslocamento dos transdutores de deslocamento posicionados na interface Tela (T).

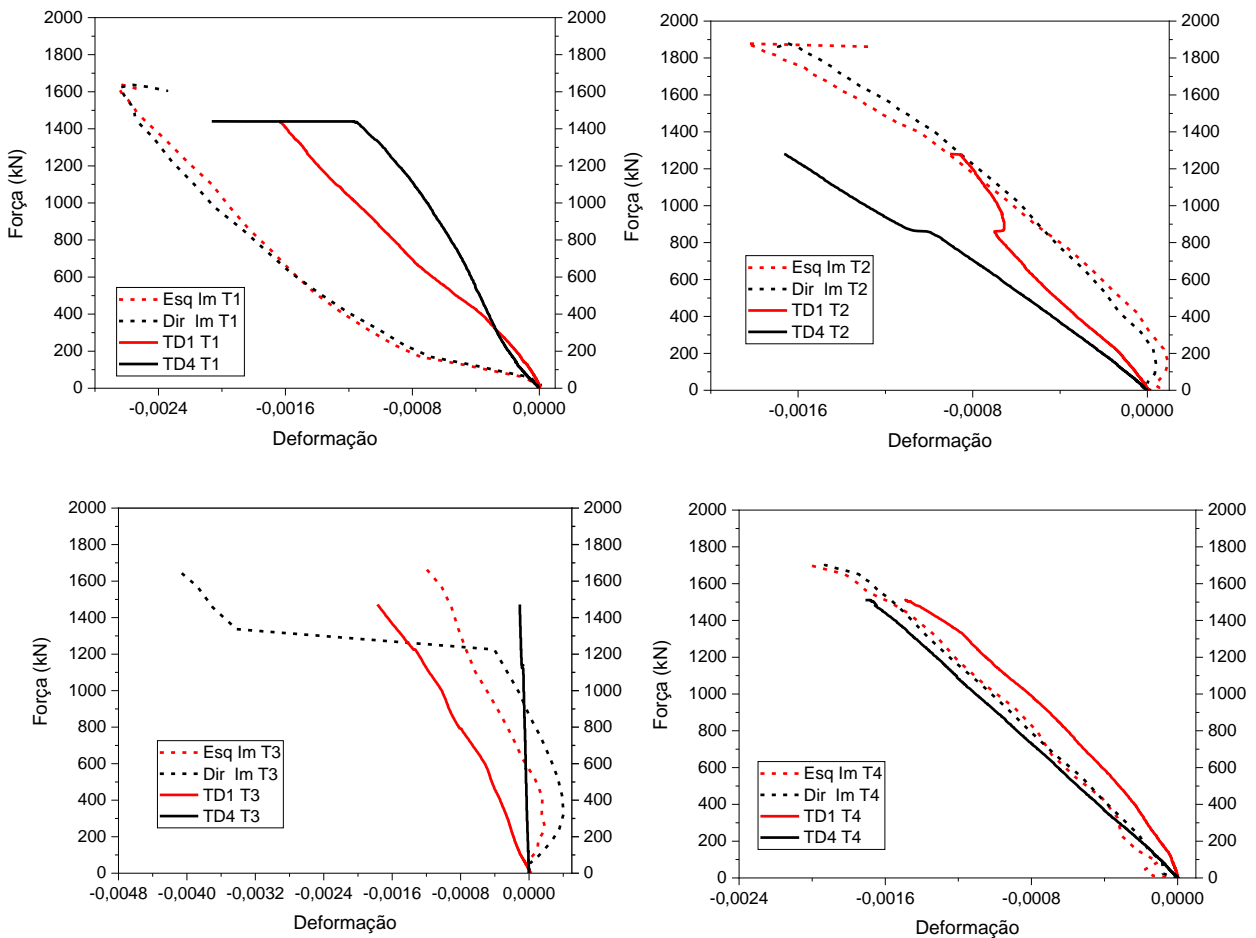


Figura E14 - Curva força versus deformação dos transdutores de deslocamento verticais e análise de imagem. Unidade: deformação (mm/mm)

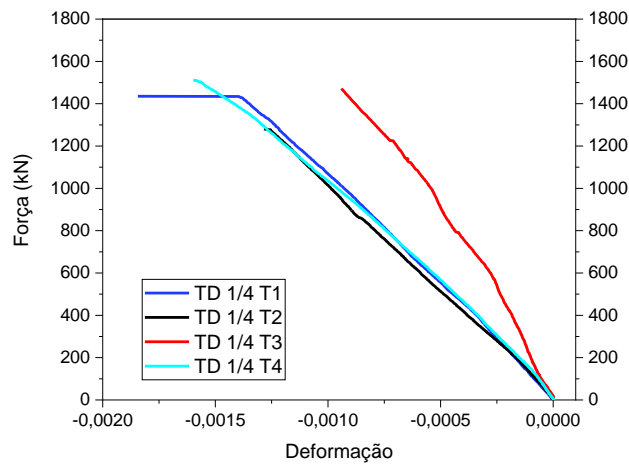


Figura E15 - Curva da força média versus deformação dos transdutores de deslocamento. Unidade: deformação (mm/mm)

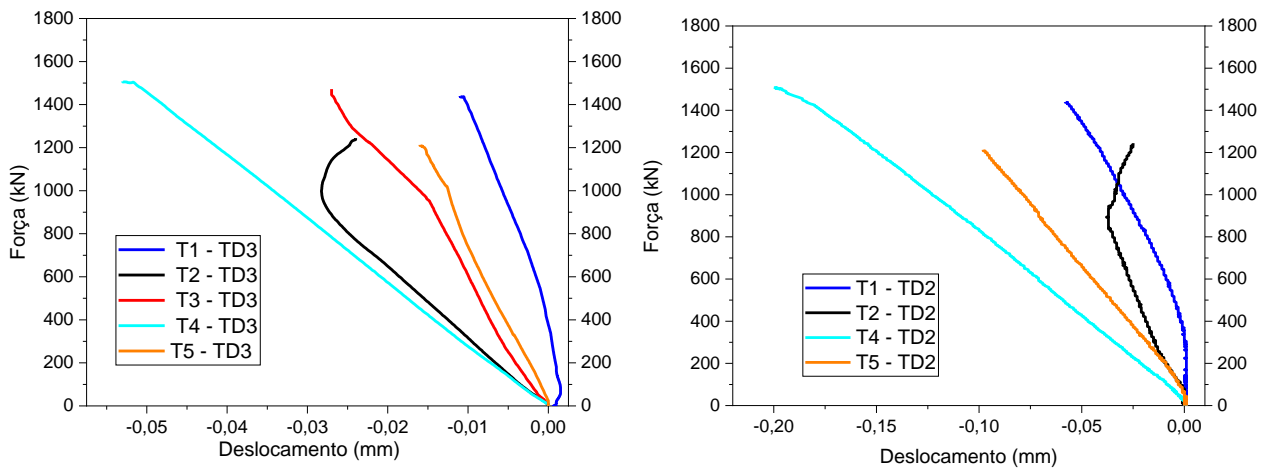


Figura E16 - Curva força versus deslocamento dos transdutores de deslocamento

A Tabela E9 apresenta o valor da força de ruptura e a tensão normal e tangencial na interface, bem como a sua correspondente deformação obtida da análise de imagem. Já a Tabela E10 mostra os deslocamentos e a deformação média obtida pelos transdutores de deslocamento e as suas correspondentes forças. Os valores amostrais em vermelho foram excluídos da leitura pelo critério de Chauvenet, por apresentar discrepância em relação aos demais valores.

Tabela E9 - Força de ruptura, tensão normal e de cisalhamento – interface Tela (T)

Tela	$F_{ruptura}$ (kN)	σ_0 (N / mm ²)	τ_n (N / mm ²)	σ_n (N / mm ²)	ε Correli (mm/mm)
T1	1640,36	72,90	31,56	18,22	0,0026
T2	1883,08	83,69	36,24	20,92	0,0017
T3	1689,27	75,07	32,51	18,77	0,0025
T4	1703,47	75,71	32,78	18,92	0,0019
T5	1923,91	85,50	37,02	21,37	
Média	1768,02	78,57	34,02	19,64	0,0022
Coeficiente de variação (%)	7,16	7,16	7,16	7,16	19,28
Desvio padrão (S)	126,69	5,63	2,43	1,40	0,0004

Tabela E10 - Medições dos transdutores de deslocamento e suas correspondentes forças – interface Tela (T)

Tela	F TD	TD 2 (mm)	TD 3 (mm)	ε TD 1/4 (mm/mm)
T1	1439,00	0,058	0,011	-0,0018
T2	1244,35	0,025	0,024	-0,0012
T3	1471,81		0,027	-0,0009
T4	1507,90	0,200	0,0530	-0,0015
T5	1212,76	0,098	0,016	
Média	1375,16	0,09	0,020	-0,0014
Coeficiente de variação (%)	9,92	79,732	37,568	-27,73
Desvio padrão (S)	136,49	0,076	0,007	0,0003

E1.6 - Intermediária -fibra exposta (In)

A Figura E17 e Figura E18 apresenta as curvas força versus deformação da análise de imagem e dos transdutores de deslocamento posicionados na vertical e, a Figura E19 as curvas força versus deslocamento dos transdutores de deslocamento posicionados na interface Intermediária - fibra (In).

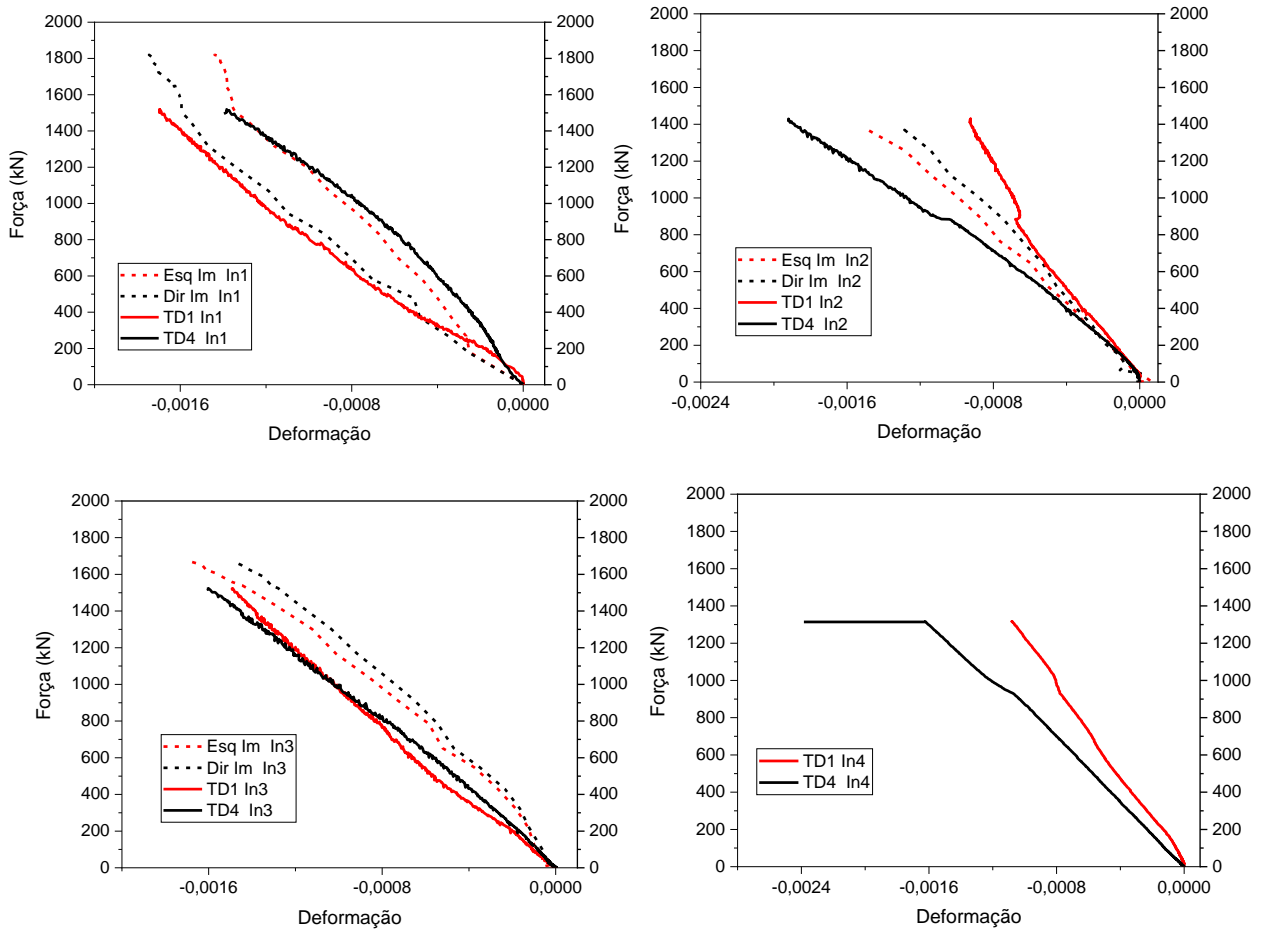


Figura E17 - Curva força versus deformação dos transdutores de deslocamento verticais e análise de imagem. Unidade: deformação (mm/mm)

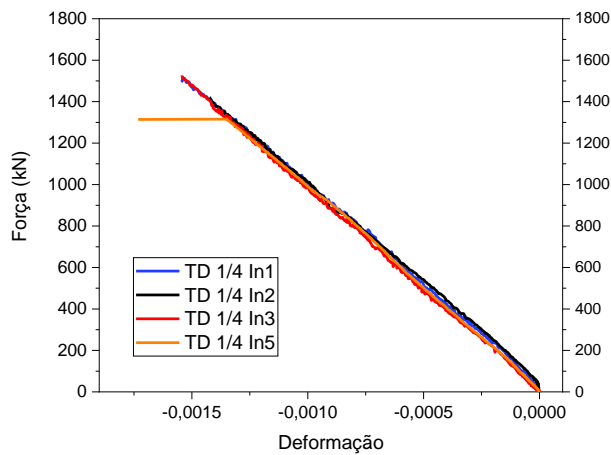


Figura E18 - Curva da força média versus deformação dos transdutores de deslocamento. Unidade: deformação (mm/mm)

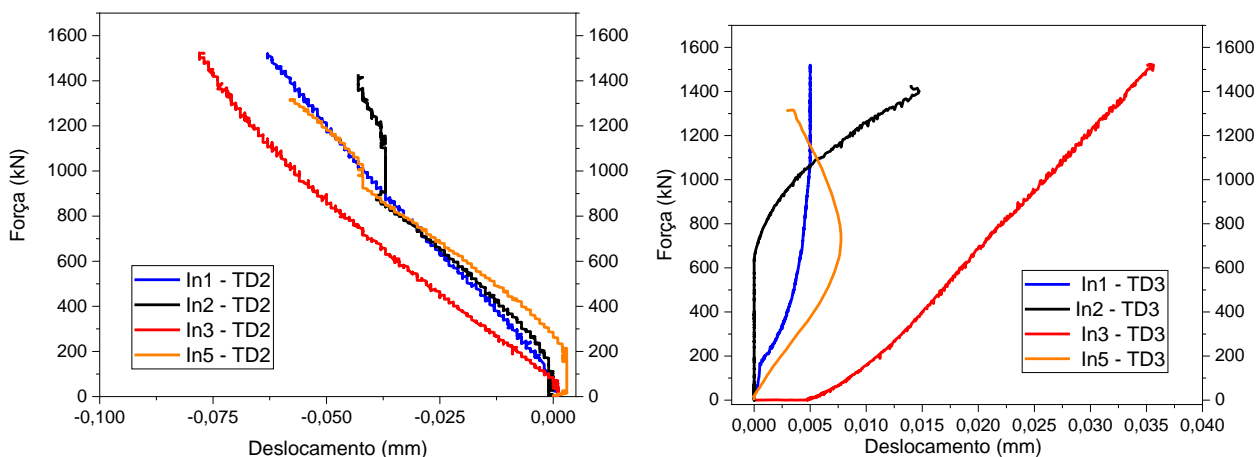


Figura E19 - Curva força versus deslocamento dos transdutores de deslocamento

A Tabela E11 apresenta o valor da força de ruptura e a tensão normal e tangencial na interface, bem como a sua correspondente deformação obtida da análise de imagem. Já a Tabela E12 mostra os deslocamentos e a deformação média obtida pelos transdutores de deslocamento e as suas correspondentes forças. Os valores amostrais em vermelho foram excluídos da leitura pelo critério de Chauvenet, por apresentar discrepancia em relação aos demais valores.

Tabela E11 - Força de ruptura, tensão normal e de cisalhamento – interface Intermediária - fibra (In)

Intermediário	$F_{ruptura}$ (kN)	σ_0 (N / mm ²)	τ_n (N / mm ²)	σ_n (N / mm ²)	ϵ Correlli (mm/mm)
In1	1840,74	81,81	35,425	61,358	0,00159
In2	1429,38	63,528	27,509	15,882	0,00138
In3	1681,19	74,720	32,355	18,680	0,00158
In5	1376,81	61,192	26,497	15,298	
Média	1582,03	70,313	30,446	27,804	0,00152
Coefficiente de variação (%)	13,76	13,761	13,761	80,626	7,667
Desvio padrão (S)	217,69	9,675	4,190	22,418	0,00012

Tabela E12 - Medições dos transdutores de deslocamento e suas correspondentes forças – interface Intermediária-fibra (In)

Intermediário	F TD	TD 2 (mm)	TD 3 (mm)	ε TD 1/4 (mm/mm)
In1	1494,93	0,063	0,005	-0,0015
In2	1407,10	0,043	0,015	-0,0014
In3	1516,90	0,078	0,036	-0,0015
In5	1316,15	0,056	0,008	-0,0017
Média	1433,77	0,060	0,016	-0,0016
Coeficiente de variação (%)	6,39	24,305	87,351	-8,121
Desvio padrão (S)	91,64	0,015	0,014	0,0001

Apêndice F – Resultado da resistência a tração por compressão diametral

Para medição dos deslocamentos horizontais foram utilizados transdutores de deslocamento (TD) (Figura F1).

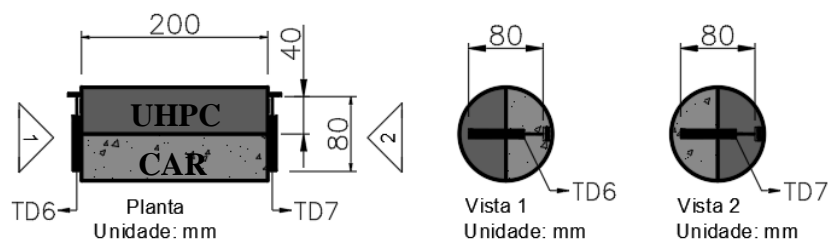


Figura F1 - Posicionamento e nomenclatura dos transdutores de deslocamento usado no ensaio de tração por compressão diametral

A Figura F2 apresenta as curvas força versus deslocamento da média dos transdutores de deslocamento.

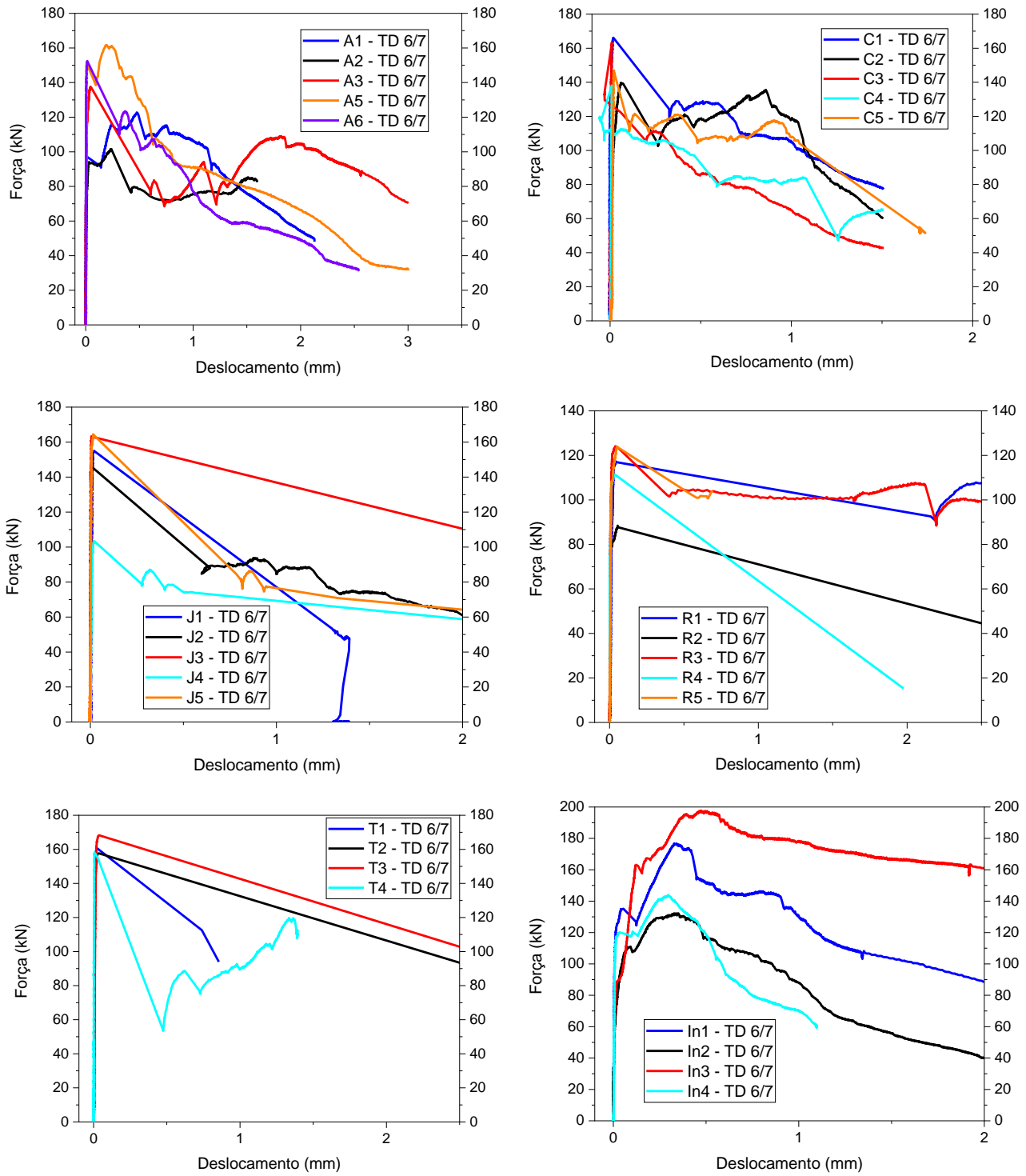


Figura F2 - Curva completa força versus deslocamento da média dos transdutores de deslocamento – Parte I

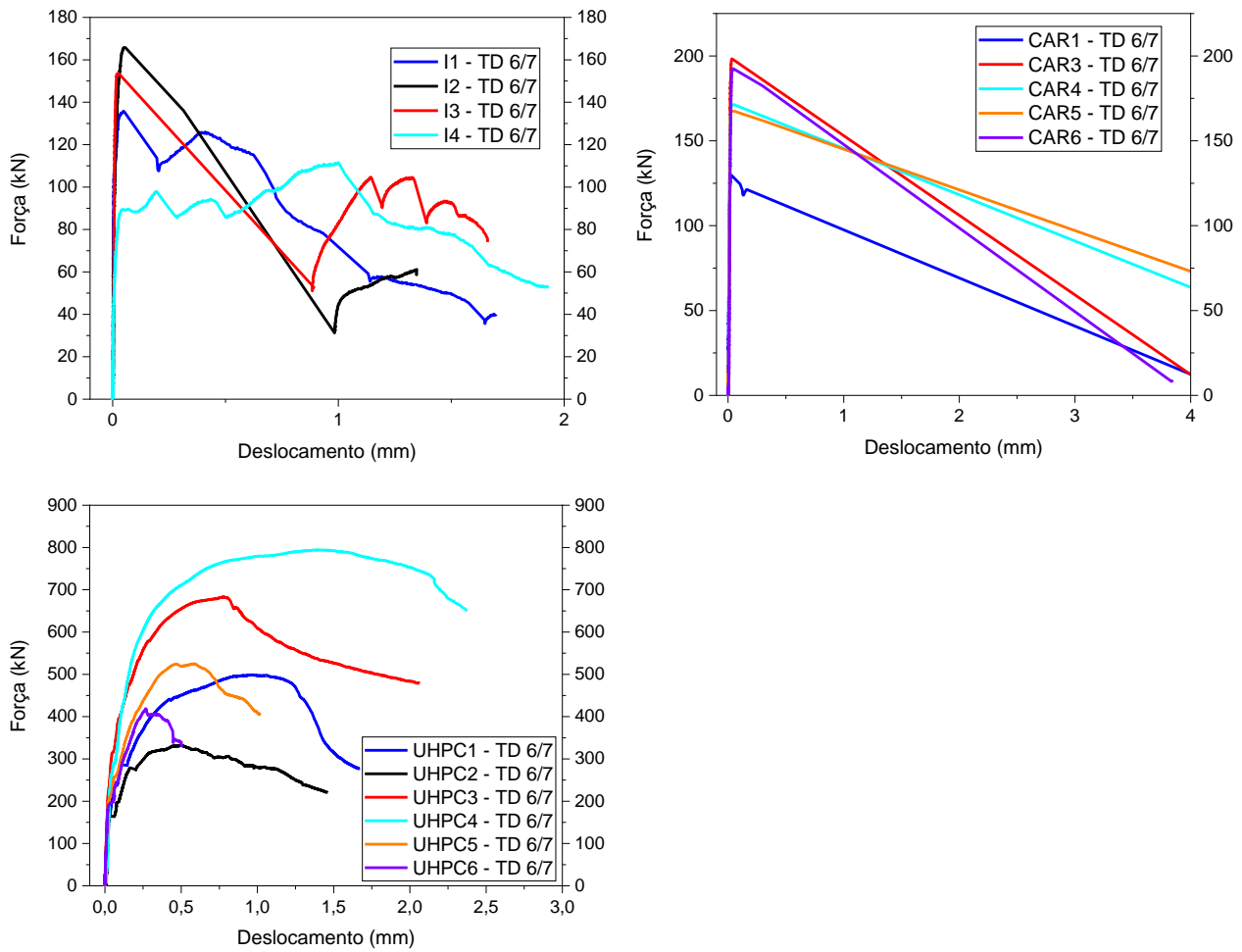


Figura F2 - Curva completa força versus deslocamento da média dos transdutores de deslocamento – Parte II

A Tabela F1 à Tabela F9 apresentam os valores da força de ruptura e as suas correspondentes medidas dos transdutores de deslocamento para as interfaces estudadas, na qual os valores em vermelho na Tabela foram excluídos pelo critério de Chaveunet.

Tabela F1 - Força de ruptura e correspondentes medições da média dos transdutores de deslocamento – interface Agregado exposto (A)

Agregado (A)	F _{primeira fissura} (kN)	f _{ct} (MPa)	TD 6/7 (mm)	F _{ruptura} (kN)	f _{ct} (MPa)	TD 6/7 (mm)
A1	97,05	3,08	0,013	122,74	3,90	0,475
A2	93,62	2,98	0,058	101,59	3,23	0,232
A3	137,62	4,38	0,044	137,62	4,38	0,044
A5	151,03	4,80	0,009	161,65	5,14	0,196
A6	152,50	4,85	0,014	152,50	4,85	0,014
Média	126,36	4,02	0,027	135,22	4,30	0,192
Coefficiente de variação (%)	22,89	22,89	78,486	17,69	17,69	95,6516
Desvio padrão (S)	28,93	0,92	0,021	23,92	0,762	0,184

Tabela F2 - Força de ruptura e correspondentes medições da média dos transdutores de deslocamento – interface Chave de cisalhamento (C)

Chave de cisalhamento (C)	F _{ruptura} (kN)	f _{ct} (MPa)	TD 6/7 (mm)
C1	166,19	5,29	0,018
C2	139,59	4,44	0,058
C3	163,30	5,19	0,008
C4	138,12	4,39	0,009
C5	147,00	4,67	0,019
Média	150,842	4,80	0,0139
Coefficiente de variação (%)	8,73	8,73	40,916
Desvio padrão (S)	13,17	0,41	0,006

Tabela F3 - Força de ruptura e correspondentes medições da média dos transdutores de deslocamento – interface Jato de areia (J)

Jato de areia	F _{ruptura} (kN)	f _{ct} (MPa)	TD 6/7 (mm)
J1	155,01	4,93	0,019
J2	147,05	4,68	0,002
J3	163,39	5,20	0,005
J4	103,42	3,29	0,020
J5	164,63	5,24	0,014
Média	157,52	5,01	0,012
Coefficiente de variação (%)	5,19	5,19	65,238
Desvio padrão (S)	8,18	0,80	0,008

Tabela F4 - Força de ruptura e correspondentes medições da média dos transdutores de deslocamento – interface Referência (R)

Referência (R)	F _{ruptura} (kN)	f _{ct} (MPa)	TD 6/7 (mm)
R1	117,24	3,73	0,043
R2	87,67	2,79	0,059
R3	124,11	3,95	0,038
R4	111,43	3,54	0,032
R5	123,93	3,94	0,048
Média	119,18	3,79	0,041
Coefficiente de variação (%)	5,09	5,09	17,547
Desvio padrão (S)	6,07	0,19	0,007

Tabela F5 - Força de ruptura e correspondentes medições da média dos transdutores de deslocamento – interface Tela (T)

Tela (T)	F _{ruptura} (kN)	f _{ct} (MPa)	TD 6/7 (mm)
T1	160,832	5,119	0,0210
T2	157,673	5,019	0,0350
T3	168,249	5,356	0,0385
T4	158,085	5,032	0,0045
T5	166,738	5,307	-
Média	162,3154	5,167	0,025
Coefficiente de variação (%)	3,025	3,025	62,518
Desvio padrão (S)	4,910	0,156	0,015

Tabela F6 - Força de ruptura e correspondentes medições da média dos transdutores de deslocamento – interface Intermediária - fibra (In)

Intermediária – fibra (In)	F _{primeira fissura} (kN)	f _{ct} (MPa)	TD 6/7 (mm)	F _{ruptura} (kN)	f _{ct} (MPa)	TD 6/7 (mm)
In1	135,14	4,30	0,054	176,71	5,62	0,341
In2	111,02	3,53	0,093	132,26	4,21	0,326
In3	162,43	5,17	0,133	197,64	6,29	0,469
In4	120,31	3,83	0,104	143,89	4,58	0,294
Média	132,23	4,20	0,096	162,62	5,17	0,358
Coefficiente de variação (%)	16,98	16,98	33,937	18,43	18,43	21,486
Desvio padrão (S)	22,45	0,71	0,033	29,98	0,95	0,077

Tabela F7 - Força de ruptura e correspondentes medições da média dos transdutores de deslocamento – interface Intermediária monolítico (I)

Intermediária – monolítico (I)	$F_{ruptura}$ (kN)	f_{ct} (MPa)	TD 6/7 (mm)
I1	135,78	4,32	0,047
I2	165,77	5,27	0,051
I3	153,64	4,89	0,026
I4	89,68	2,85	0,069
Média	136,22	4,336	0,048
Coefficiente de variação (%)	24,50	24,50	36,547
Desvio padrão (S)	33,38	1,06	0,018

Tabela F8 - Força de ruptura e correspondentes medições da média dos transdutores de deslocamento – monolítico CAR

Monolítico CAR	$F_{ruptura}$ (kN)	f_{ct} (MPa)	TD 6/7 (mm)
CAR1	129,60	4,12	0,029
CAR3	198,32	6,31	0,034
CAR4	171,45	5,45	0,047
CAR5	167,56	5,33	0,048
CAR6	192,51	6,12	0,045
Média	171,89	5,471	0,040
Coefficiente de variação (%)	15,747	15,74	20,555
Desvio padrão (S)	27,069	0,86	0,008

Tabela F9 - Força de ruptura e correspondentes medições da média dos transdutores de deslocamento – monolítico UHPC

UHPC	$F_{primeira\ fissura}$ (kN)	f_{ct} (MPa)	TD 6/7 (mm)	$F_{ruptura}$ (kN)	f_{ct} (MPa)	TD 6/7 (mm)
UHPC 1	237,79	7,56	0,0545	498,97	15,88	0,960
UHPC 2	164,95	5,25	0,0275	331,59	10,55	0,493
UHPC 3	320,93	10,21	0,06	683,15	21,74	0,772
UHPC 4	291,03	9,26	0,067	794,45	25,28	1,394
UHPC 5	258,02	8,21	0,059	525,07	16,71	0,579
UHPC 6	200,02	6,36	0,0545	418,44	13,32	0,265
Média	261,56	8,32	0,059	541,95	17,25	0,744
Coefficiente de variação (%)	17,890	17,890	8,705	31,45	31,45	53,408
Desvio padrão (S)	46,793	1,489	0,005	170,48	5,42	0,397

Apêndice G – Correlação de resultados

A Tabela G1 à Tabela G9 apresenta os valores de resistência à tração na flexão e as suas correspondentes medidas dos deslocamentos obtidas pelo Clip Gage para as interfaces estudadas. O coeficiente de rigidez na direção normal (K_{nn}) foi obtido da relação resistência à tração na flexão e deslocamento. Os valores em vermelho na Tabela foram excluídos pelo critério de Chaveunet.

Tabela G1 – Resistência à tração na flexão e correspondentes medições dos deslocamentos para o cálculo do K_{nn} – interface Referência (R)

Referência (R)	$f_{ct,f}$ (MPa)	CLIP (mm)	K_{nn} ($f_{ct,f}$) (N/mm ³)
R1	5,02	0,041	121,53
R2	5,12	0,023	224,38
R4	4,32	0,020	219,08
R5	3,08	0,014	215,14
R6	3,38	0,011	306,86
Média	4,18	0,017	241,37
Desvio padrão (S)	0,93	0,01	43,82

Tabela G2 – Resistência à tração na flexão e correspondentes medições dos deslocamentos para o cálculo do K_{nn} – interface Agregado exposto (A)

Tela (T)	$f_{ct,f}$ (MPa)	CLIP (mm)	K_{nn} ($f_{ct,f}$) (N/mm ³)
A2	4,76	0,026	186,49
A3	4,31	0,023	187,27
A4	4,28	0,023	186,12
A5	4,12	0,021	201,10
Média	4,37	0,023	190,24
Desvio padrão (S)	0,27	0,002	7,25

Tabela G3 – Resistência à tração na flexão e correspondentes medições dos deslocamentos para o cálculo do K_{nn} – interface Chave de cisalhamento (C)

Chave (C)	$f_{ct,f}$ (MPa)	CLIP (mm)	K_{nn} ($f_{ct,f}$) (N/mm ³)
C1	2,56	0,021	121,81
C2	1,44	0,014	104,46
C3	2,25	0,027	83,34
C4	1,66	0,019	87,44
Média	1,98	0,020	99,26
Desvio padrão (S)	0,52	0,005	17,59

Tabela G4 – Resistência à tração na flexão e correspondentes medições dos deslocamentos para o cálculo do K_{nn} – interface Jato de areia (J)

Jato (J)	$f_{ct,f}$ (MPa)	CLIP (mm)	K_{nn} ($f_{ct,f}$) (N/mm ³)
J1	2,49	0,007	355,36
J2	3,15	0,009	349,65
J3	2,73	0,006	455,62
J5	2,21	0,011	193,54
J6	1,49	0,006	260,62
Média	2,41	0,008	322,96
Desvio padrão (S)	0,62	0,00	100,00

Tabela G5 – Resistência à tração na flexão e correspondentes medições dos deslocamentos para o cálculo do K_{nn} – interface Tela (T)

Tela (T)	$f_{ct,f}$ (MPa)	CLIP (mm)	K_{nn} ($f_{ct,f}$) (N/mm ³)
T1	3,25	0,016	202,01
T2	2,74	0,018	154,95
T4	2,70	0,011	252,20
T6	3,94	0,025	160,73
Média	3,16	0,02	192,47
Desvio padrão (S)	0,58	0,01	45,00

Tabela G6 – Resistência à tração na flexão e correspondentes medições dos deslocamentos para o cálculo do K_{nn} – interface Intermediária - fibra (In)

Intermediária – fibra (In)	$f_{ct,f}$ (MPa)	CLIP (mm)	$K_{nn} (f_{ct,f})$ (N/mm ³)
In1	4,55	0,018	255,80
In2	3,83	0,110	34,87
In3	4,83	0,070	69,24
In5	3,78	0,018	212,35
Média	4,25	0,05	143,06
Desvio padrão (S)	0,52	0,04	107,50

A Tabela G7 à Tabela G12 apresenta os valores de resistência à tração por compressão diametral e as suas correspondentes medidas dos deslocamentos obtidas pelo transdutor de deslocamento para as interfaces estudadas. O coeficiente de rigidez na direção normal (K_{nn}) foi obtido da relação resistência à tração por compressão diametral e deslocamento. Os valores em vermelho na Tabela foram excluídos pelo critério de Chaveunet.

Tabela G7 – Resistência à tração por compressão diametral e correspondentes medições dos deslocamentos para o cálculo do K_{nn} – interface Referência (R)

Referência (R)	f_{ct} (MPa)	TD 6/7 (mm)	$K_{nn} (f_{ct})$ (N/mm ³)
R1	3,73	0,044	85,80
R2	2,79	0,060	46,90
R3	3,95	0,038	103,97
R4	3,55	0,032	110,84
R5	3,94	0,049	81,34
Média	3,79	0,04	95,49
Desvio padrão (S)	0,19	0,01	14,16

Tabela G8 – Resistência à tração por compressão diametral e correspondentes medições dos deslocamentos para o cálculo do K_{nn} – interface Agregado exposto (A)

Agregado (A)	f_{ct} fissuração (MPa)	TD 6/7 (mm)	K_{nn} (f_{ct}) (N/mm ³)
A1	3,09	0,014	228,85
A2	2,98	0,058	51,38
A3	4,38	0,044	99,56
A5	4,81	0,010	506,06
A6	4,85	0,014	346,73
Média	4,02	0,028	246,52
Desvio padrão (S)	0,92	0,022	185,33

Tabela G9 – Resistência à tração por compressão diametral e correspondentes medições dos deslocamentos para o cálculo do K_{nn} – interface Chave de cisalhamento (C)

Chave (C)	f_{ct} (MPa)	TD 6/7 (mm)	K_{nn} (f_{ct}) (N/mm ³)
C1	5,29	0,018	293,88
C2	4,44	0,059	75,95
C3	5,20	0,009	611,54
C4	4,40	0,010	462,80
C5	4,68	0,020	239,97
Média	4,80	0,023	336,83
Desvio padrão (S)	0,42	0,021	206,53

Tabela G10 – Resistência à tração por compressão diametral e correspondentes medições dos deslocamentos para o cálculo do K_{nn} – interface Jato de areia (J)

Jato de areia (J)	f_{ct} (MPa)	TD 6/7 (mm)	K_{nn} (f_{ct}) (N/mm ³)
J1	4,93	0,020	253,04
J2	4,68	0,003	1872,32
J3	5,20	0,006	945,65
J4	3,29	0,021	160,59
J5	5,24	0,015	361,41
Média	5,01	0,013	430,17
Desvio padrão (S)	0,80	0,008	353,31

Tabela G11 – Resistência à tração por compressão diametral e correspondentes medições dos deslocamentos para o cálculo do K_{nn} – interface Tela (T)

Tela (T)	f_{ct} (MPa)	TD 6/7 (mm)	$K_{nn} (f_{ct})$ (N/mm ³)
T1	5,12	0,021	243,78
T2	5,02	0,035	143,40
T3	5,36	0,039	139,10
T4	5,03	0,005	1118,22
Média	5,14	0,025	175,43
Desvio padrão (S)	0,16	0,009	59,24

Tabela G12 – Resistência à tração por compressão diametral e correspondentes medições dos deslocamentos para o cálculo do K_{nn} – interface Intermediária - fibra (In)

Intermediária – fibra (In)	f_{ct} fissuração (MPa)	TD 6/7 (mm)	$K_{nn} (f_{ct})$ (N/mm ³)
In1	4,30	0,055	78,93
In2	3,53	0,093	38,00
In3	5,17	0,134	38,73
In4	3,83	0,105	36,65
Média	4,21	0,096	48,08
Desvio padrão (S)	0,71	0,033	20,59

A Tabela G13 à Tabela G18 apresenta os valores de resistência à tração por compressão diametral e as suas correspondentes medidas dos deslocamentos obtidas pelo transdutor de deslocamento para as interfaces estudadas. O coeficiente de rigidez na direção normal (K_{nn}) foi obtido da relação resistência à tração por compressão diametral e deslocamento.

Tabela G13 – Resistência ao cisalhamento direto e correspondentes medições dos deslocamentos para o cálculo do K_{ss} e K_{tt} – interface Referência (R)

Referência (R)	τ_{ultima} (MPa)	LVDT 8 (mm)	$K_{ss} = K_{tt}$ (N / mm ³)
R1	7,24	0,039	185,51
R2	6,46	0,043	150,23
R3	5,95	0,040	148,79
Média	6,55	0,041	161,51
Desvio padrão (S)	0,65	0,002	20,80

Tabela G14 – Resistência ao cisalhamento direto e correspondentes medições dos deslocamentos para o cálculo do K_{ss} e K_{tt} – interface Agregado exposto (A)

Agregado (A)	τ_{ultima} (MPa)	LVDT 8 (mm)	$K_{ss} = K_{tt}$ (N / mm ³)
A1	8,01	0,053	151,22
A2	8,71	0,054	161,28
A3	8,24	0,058	142,00
Média	8,32	0,055	151,50
Desvio padrão (S)	0,35	0,003	9,64

Tabela G15 – Resistência ao cisalhamento direto e correspondentes medições dos deslocamentos para o cálculo do K_{ss} e K_{tt} – interface Chave de cisalhamento (C)

Chave (C)	τ_{ultima} (MPa)	LVDT 8 (mm)	$K_{ss} = K_{tt}$ (N / mm ³)
C1	7,69	0,031	247,96
C2	7,28	0,050	145,62
C3	6,12	0,049	124,89
Média	7,03	0,043	172,82
Desvio padrão (S)	0,81	0,011	65,89

Tabela G16 – Resistência ao cisalhamento direto e correspondentes medições dos deslocamentos para o cálculo do K_{ss} e K_{tt} – interface Jato de areia (J)

Jato de areia (J)	τ_{ultima} (MPa)	LVDT 8 (mm)	$K_{ss} = K_{tt}$ (N / mm ³)
J1	7,88	0,016	492,73
J2	7,69	0,016	480,33
J3	7,39	0,026	284,26
Média	7,65	0,019	419,11
Desvio padrão (S)	0,25	0,006	116,95

Tabela G17 – Resistência ao cisalhamento direto e correspondentes medições dos deslocamentos para o cálculo do K_{ss} e K_{tt} – interface Tela (T)

Tela (T)	τ_{ultima} (MPa)	LVDT 8 (mm)	$K_{ss} = K_{tt}$ (N / mm ³)
T1	7,19	0,047	152,93
T2	7,86	0,029	270,96
T3	7,45	0,024	310,43
Média	7,50	0,033	244,77
Desvio padrão (S)	0,34	0,012	81,95

Tabela G18 – Resistência ao cisalhamento direto e correspondentes medições dos deslocamentos para o cálculo do K_{ss} e K_{tt} – interface Intermediária (In)

Intermediária – fibra (In)	τ_{ultima} (MPa)	LVDT 8 (mm)	$K_{ss} = K_{tt}$ (N / mm ³)
In1	5,39	0,013	414,38
In2	5,65	0,017	332,32
In3	5,04	0,006	840,36
Média	5,36	0,012	529,02
Desvio padrão (S)	0,30	0,006	272,73