

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**Comportamento de ligações aço-concreto reciclado por meio de
adesivos**

Paulo Eduardo Soares Andrade Filho

São Carlos, 2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**Comportamento de ligações aço-concreto reciclado por meio de
adesivos**

Paulo Eduardo Soares Andrade Filho

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

Área de Concentração: Estruturas e Geotecnia
Orientadora: Profa Dra Silvana De Nardin

São Carlos, 2021



Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Paulo Eduardo Soares Andrade Filho, realizada em 27/08/2021.

Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Silvana de Nardin (UFSCar)

Profa. Dra. Ana Elisabete Paganelli Guimarães de Avila Jacintho (PUCCAMP)

Profa. Dra. Margot Fabiana Pereira (UFSCar)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a **Deus** por sempre estar comigo em todos os momentos, pelo Seu cuidado e sustento nas horas boas e más, e por Seu guiar em todos os meus passos.

Aos **meus pais, Paulo Eduardo e Elda Brito**, que sempre me apoiaram em tudo que eu já realizei em minha vida e carreira, sempre cuidando de mim em todos os sentidos, apesar da distância que nos separava. Aos **meus irmãos** pelo companheirismo, brincadeiras, conversas e compreensão. À **minha família**, pois sei que sempre estive e sempre estará ao meu lado.

À **minha noiva, Vívian Cordeiro**, pelo amor, paciência, companheirismo e cuidado. Pessoa que eu sempre pude contar nos momentos difíceis, em meio a preocupações, ansiedades e angústias. Obrigado por ouvir minhas queixas, preocupações, reclamações, e por sempre me apoiar e incentivar.

Em especial, à **minha orientadora, Professora Dra. Silvana De Nardin**, por seu trabalho, ensinamentos e dedicação. Sua orientação e competência foram essenciais para a realização deste trabalho. Sou extremamente grato pela paciência e confiança.

Aos **professores e funcionários** do Departamento de Engenharia Civil (DECiv/UFSCar), em especial ao **técnico José Roberto** pelo trabalho, grande esforço e companheirismo, sem o qual este trabalho não teria se realizado.

Ao **Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian** que disponibilizou o laboratório de Sistemas estruturais para realização dos ensaios referentes ao concreto endurecido e ao cisalhamento direto. Ao **técnico Ricardo Luiz Canato** pelo auxílio nos ensaios de cisalhamento direto.

Ao meu **colega** de casa, de pós-graduação e **amigo João Paulo Boff** pelo cuidado, apoio, amizade e companheirismo. Sua amizade e exemplo certamente foram uma das melhores coisas que eu obtive durante todo esse período. Agradeço também à **Camilla** por todo carinho, amizade, e por terem sido uma família para mim.

Aos **irmãos da Igreja em São Carlos** por todo cuidado, suporte, amizade, carinho e amor. Somos um em Cristo, cada um de vocês tem um lugar especial em meu coração.

Aos meus **colegas de pós-graduação** pela força e companheirismo.

À **empresa Lafarge Holcim S.A.** pela doação do cimento utilizado na confecção do concreto.

Às **empresas Construção Construção Civil e Metálica São Carlos Ltda e SEC2 – Estruturas metálicas Ribeirão Preto** que gentilmente doaram as chapas de aço utilizadas neste trabalho.

À **empresa Hard Comércio de Fixadores e Resinas Ltda** pela doação do adesivo epóxi estrutural usado neste estudo.

RESUMO

Em um elemento misto de aço e concreto, é indispensável que haja uma ligação entre os materiais a fim de que exista comportamento conjunto que os torne capazes de resistir conjuntamente aos esforços solicitantes. Para isso, geralmente eles são conectados por dispositivos mecânicos como conectores de cisalhamento do tipo pinos com cabeça. Entretanto, esse tipo de ligação possui alguns problemas como a concentração de tensões de cisalhamento na interface e a necessidade de soldagem que introduz tensões residuais e degradam o aço. Diante disso, nas duas últimas décadas, estudos avaliaram a ligação adesivada como possível alternativa de ligação para elementos mistos de aço e concreto, principalmente em vigas mistas. Concomitantemente, pesquisas sobre o uso de concretos com agregados de resíduos de concreto vêm sendo realizadas com o intuito de amenizar o impacto da construção civil sobre o meio ambiente. Há a necessidade de reduzir a extração de recursos naturais e minimizar o volume de resíduos sólidos provenientes desse setor e que são descartados. Desse modo, o objetivo do presente trabalho foi analisar o comportamento da ligação adesivada aço-concreto confeccionada com adesivo epóxi, cujo concreto contém agregado reciclado de concreto (ARC). Por meio de ensaios de cisalhamento direto, foi avaliada a influência da espessura do adesivo na ligação e do tipo de concreto (agregados naturais ou ARC). Exemplares com ligações aço-epóxi-aço e aço-epóxi-concreto foram avaliados por meio de ensaios de cisalhamento direto tendo como variáveis: as espessuras adesivadas de 1 mm e 3 mm e os teores de substituição de 30% e 100% do agregado graúdo natural por ARC. Os resultados mostraram relação direta entre o aumento da espessura do adesivo e a capacidade resistente da ligação ao cisalhamento para ambas as ligações: aço-epóxi-aço e aço-epóxi-concreto. Em relação ao uso de ARC no concreto, não foi observada diferença significativa nos resultados da análise de variância ANOVA, entretanto, houve uma tendência de redução na resistência da ligação com o uso de ARC. Por fim, a ligação adesivada aço-concreto demonstrou possuir comportamento adequado para uso em elementos mistos de aço e concreto, principalmente por reduzir consideravelmente os deslocamentos relativos entre os materiais.

Palavras-chave: ligação adesivada aço-concreto; adesivo epóxi; concreto com agregado de resíduo de concreto (ARC); resistência ao cisalhamento; ensaio de cisalhamento direto.

ABSTRACT

In a steel-concrete composite members, it's essential that there is a connection between the materials so that there is a joint behavior that makes them capable of jointly resisting the solicitant efforts. To do this, they are usually connected by mechanical devices such as stud bolts connectors. However, this type of connection has some problems such as the concentration of shear stresses at the interface, and the need for welding that introduces residual stresses and degrades the steel. Therefore, in the last two decades, studies have evaluated adhesive bonding as a possible bonding alternative for composite steel-concrete elements, especially in composite beams. Simultaneously, research about the use of concrete with aggregates of concrete waste has been carried out to alleviate the impact of civil construction on the environment. There is a need to reduce the extraction of natural resources and minimize the volume of solid waste from this sector that is discarded. Thus, the objective of the present work was to analyze the behavior of the steel-concrete adhesive bond made with epoxy adhesive and whose concrete contains recycled concrete aggregate (RAC). Through push-out tests, the influence of the thickness of the adhesive on the bond and the type of concrete (natural aggregates or RAC) was evaluated. Specimens with steel-epoxy-steel and steel-epoxy-concrete connections were evaluated by means of push-out tests using the following variables: adhesive thicknesses of 1 mm and 3 mm and replacement contents of 30% and 100% of the coarse aggregate natural by ARC. The results showed a direct relationship between the increase in adhesive thickness and the shear bond strength for both bonds: steel-epoxy-steel and steel-epoxy-concrete. Regarding the use of RCA in concrete, no significant difference was observed in the results of the ANOVA analysis of variance, however there was a trend towards a reduction in the bond strength with the use of RCA. Finally, the steel-concrete adhesive bonding showed to have an adequate behavior for use in composite steel-concrete elements, mainly because it considerably reduces the relative displacements between the materials.

Keywords: steel-concrete bonded connection; epoxy adhesive; recycled aggregates concrete; shear strength; push out test

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	VIGAS MISTAS E LIGAÇÃO ADESIVADA	1
1.2	PROBLEMATICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	3
1.3	OBJETIVOS.....	4
1.4	JUSTIFICATIVA	5
1.5	METODOLOGIA.....	6
1.6	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO E DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS	7
2	CONCRETO COM RESÍDUOS DE CONCRETO	8
2.1	PROPRIEDADES DO CONCRETO COM ARC.....	8
2.1.1	<i>Absorção de água e trabalhabilidade do concreto com ARC</i>	<i>11</i>
2.1.2	<i>Resistência à compressão e módulo de elasticidade.....</i>	<i>13</i>
2.2	COMENTÁRIOS FINAIS	17
3	TRANSFERÊNCIA DE FORÇAS NA INTERFACE AÇO-CONCRETO	18
3.1	MECANISMOS DE ADERÊNCIA E COMPORTAMENTO CONJUNTO	18
3.2	TENSÃO DE ADERÊNCIA ENTRE BARRA DE AÇO E CONCRETO COM ARC	21
3.3	COMENTÁRIOS FINAIS	25
4	ADESIVOS E LIGAÇÕES ESTRUTURAIS ADESIVADAS.....	26
4.1	ADESÃO MECÂNICA E FALHAS EM JUNTAS ADESIVADAS	26
4.2	LIGAÇÕES AÇO-CONCRETO VIA ADESIVOS	29
4.3	PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM O COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO ADESIVADA A BASE DE EPÓXI	32
4.3.1	<i>Espessura da camada adesivada.....</i>	<i>36</i>
4.3.2	<i>Resistência à compressão do concreto.....</i>	<i>40</i>
4.3.3	<i>Módulo de elasticidade do adesivo</i>	<i>43</i>
4.3.4	<i>Área da ligação adesivada</i>	<i>45</i>
4.4	TRATAMENTO SUPERFICIAL.....	47
4.5	COMENTÁRIOS FINAIS	50
5	PROGRAMA EXPERIMENTAL	51
5.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	51
5.2	OBTENÇÃO DOS AGREGADOS DE RESÍDUOS DE CONCRETO	52
5.3	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	53
5.3.1	<i>Agregados do concreto</i>	<i>53</i>
5.3.2	<i>Aço e adesivo epóxi.....</i>	<i>55</i>

5.3.3	<i>Produção e caracterização do concreto</i>	55
5.4	ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO	59
5.4.1	<i>Produção dos Modelos do Grupo 1: aço-epóxi-aço</i>	59
5.4.2	<i>Produção dos modelos do grupo II - aço-epóxi-concreto</i>	62
5.4.3	<i>Ensaio da ligação aço-epóxi-aço (grupo I)</i>	64
5.4.4	<i>Ensaio da ligação aço-epóxi-concreto (grupo II)</i>	64
6	ANÁLISE DE RESULTADOS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL	66
6.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E COMPONENTES	66
6.2	CISALHAMENTO DIRETO AÇO-EPÓXI-AÇO: GRUPO I	70
6.3	CISALHAMENTO DIRETO AÇO-EPÓXI-CONCRETO: GRUPO II	72
6.3.1	<i>Influência da espessura da camada adesivada na ligação aço-epóxi-concreto</i>	73
6.3.2	<i>Influência do tipo de concreto na ligação aço-epóxi-concreto</i>	74
6.3.3	<i>Análise dos deslocamentos relativos</i>	76
6.3.4	<i>Análise do modo de falha e da tensão resistente ao cisalhamento</i>	78
6.4	COMENTÁRIOS FINAIS	84
7	CONCLUSÕES	85
7.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	86
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
	APÊNDICE A	95
	APÊNDICE B	97
	MODELOS DE LIGAÇÃO AÇO-EPÓXI-AÇO	97
	MODELOS DE LIGAÇÃO AÇO-EPÓXI-CONCRETO	98
	APÊNDICE C	101
	ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO: AÇO-EPÓXI-CONCRETO	101
	APÊNDICE D	105

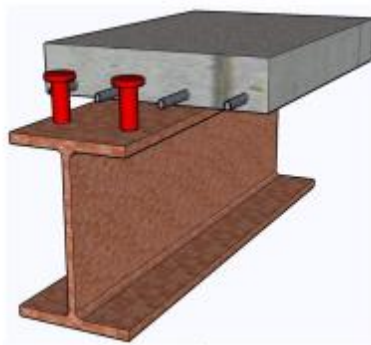
1 Introdução

1.1 VIGAS MISTAS E LIGAÇÃO ADESIVADA

Elementos mistos de aço e concreto são uma alternativa interessante quando o elemento estrutural está sujeito a esforços de grande magnitude, pois as características estruturais desses materiais são complementares. Enquanto o concreto tem elevada resistência à compressão e baixíssima resistência à tração, o aço apresenta elevada resistência à tração, suprimindo essa deficiência do concreto.

Existem diversos tipos de elementos mistos de aço e concreto, dentre os quais os mais comuns são as lajes, vigas e pilares. Para cada um deles, diferentes configurações são possíveis e são exploradas pela construção civil. Entretanto, para todos eles, a conexão entre os dois materiais é indispensável, pois possibilita a transferência de esforços e o comportamento conjunto aço-concreto. No caso das vigas mistas de aço e concreto, a seção transversal mais usual é formada por um perfil de aço conectado a uma laje de concreto (Figura 1-1a).

Figura 1-1: Viga mista de aço e concreto, e conector pino com cabeça



a) Viga mista

Fonte: DE NARDIN *et al.* (2008)



b) Conector pino com cabeça

Fonte¹: HARD

Há diversas aplicações das vigas mistas em edifícios de múltiplos pavimentos, edifícios-garagem, *shopping centers*, pontes, etc. Para que haja o comportamento conjunto aço-concreto em vigas mistas é necessário reduzir ao máximo os deslocamentos relativos entre os materiais. Para isso, a aderência natural entre o aço e o concreto não é suficiente,

¹ <https://hard.com.br/produto/stud-welding>. Acesso em 13/06/2021

sendo necessário o uso de dispositivos mecânicos que auxiliam e aumentam a transferência de forças entre os materiais. Os conectores tipo pino com cabeça (Figura 1-1b) são os dispositivos mais comumente utilizados em vigas mistas.

Contudo, desde a década de 1960, pesquisadores vêm investigando a substituição dos conectores tipo pino com cabeça por ligações adesivadas. Tal substituição é investigada, pois os conectores promovem ligações pontuais, além de demandar equipamentos de alta potência elétrica para a soldagem e apresentar baixa resistência à fadiga. Porém, ainda há poucas pesquisas sobre o comportamento desse tipo de ligação.

A principal função dos adesivos é a união de partes e, para isso, o adesivo deve ser capaz de transmitir tensões de um substrato para o outro. As ligações adesivadas transmitem as tensões de uma forma mais uniforme que qualquer tipo de conector mecânico, pois fornecem uma área de transferência muito maior, evitando a concentração de tensões típica dos pinos com cabeça. Usualmente, a ligação adesivada fornece estruturas mecanicamente equivalentes ou até mais resistentes, com redução de custo e peso, além de possibilitar o uso de elementos pré-fabricados, o que aumenta a produtividade.

As variações de temperatura ao longo da vida útil da estrutura evidenciam outra característica importante dos adesivos; por serem flexíveis, são capazes de acomodar as expansões térmicas entre materiais de diferentes coeficientes de dilatação térmica, evitando danos que ocorreriam em peças ligadas por conectores mecânicos. Além disso, os adesivos executam a função de vedação, pois a ligação contínua sela líquidos ou gases, protegendo partes dos substratos ligados. Adesivos específicos podem ser usados para transmitir amortecimentos mecânicos e melhorar a resistência à fadiga de peças submetidas a carregamento cíclico e a cargas de impacto, como é o caso das pontes.

A partir dos aspectos positivos e negativos apresentados por EBNESAJJAD (2014), são listados aqueles que se aplicam ao uso em estruturas (Tabela 1-1).

Tabela 1-1: Aspectos de destaque do uso de adesivos

Aspectos positivos	Aspectos negativos
Distribuição mais uniforme de tensões em uma área maior, resultando em boa relação resistência/peso.	A ligação não permite inspeção visual da região ligada.
Capacidade de unir materiais de espessuras diversas.	Necessidade de tratamento superficial para garantia de qualidade.
Capacidade de unir materiais similares ou diferentes.	Podem necessitar de longos períodos de cura, principalmente quando requerem altas temperaturas de cura.
Minimiza ou evita a corrosão eletroquímica (galvânica) entre materiais diferentes e protege o substrato de agentes químicos.	Dispositivos elétricos, fornos, prensas e autoclaves podem ser necessários para fixação por adesivos.

Resistência à fadiga e a carregamentos cíclicos.	Controle rígido do processo, incluindo ênfase na limpeza superficial.
Evita tensões residuais produzidas pelo processo de soldagem.	Vida útil da ligação depende da resistência do adesivo à exposição ambiental. Além disso, o adesivo trabalha adequadamente em uma faixa de temperatura específica.

Fonte: adaptado de EBNESAJJAD (2014)

1.2 PROBLEMÁTICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

A construção civil é uma das atividades mais antigas praticadas pela humanidade. Com o passar dos anos, a população mundial expandiu-se juntamente com as evoluções das técnicas de construção oriundas de revoluções tecnológicas e industriais. Desde o surgimento do cimento Portland e do concreto armado, esse material de construção tem ganhado espaço em todo planeta, sendo o concreto o segundo material mais utilizado pelo homem. Atrás dele, apenas a água. Pesquisas estimam que anualmente são consumidas aproximadamente 11 bilhões de toneladas de concreto no mundo (PEDROSO, 2009), evidenciando a crescente problemática do uso de matérias-primas naturais e da geração de resíduos. Estudos apontam que 40 a 70% dos resíduos sólidos urbanos das cidades brasileiras de médio e grande porte são gerados pela construção civil (PINTO, 1999). Porém, o impacto ambiental da construção civil vai além disso, envolvendo um alto consumo energético e emissão de CO². Segundo a UNEP (2009), as edificações consomem mais de 40% da energia global e são responsáveis por até um terço das emissões de gases de efeito estufa com milhões de toneladas de CO² por ano. A extração, produção e manuseio dos agregados degradam ecossistemas, contaminam água, solo e ar (AKHTAR e SARMAH, 2018) bem como levam ao esgotamento dos recursos naturais. Em 2017, estimou-se que a demanda mundial por agregados teria chegado a 45 bilhões de toneladas, podendo chegar a 66 bilhões de toneladas até 2025 (SILVA *et al.*, 2019), evidenciando assim a crescente problemática do uso de matérias-primas naturais.

Além disso, a construção civil é um dos setores que mais geram resíduos, e cerca de 35% do resíduo sólido mundial é proveniente desse setor (MAUÉS *et al.*, 2020). Estima-se que são gerados, anualmente, cerca de 10 bilhões de toneladas de resíduos (WANG *et al.*, 2018); a China, maior produtor mundial, produz cerca de 2 bilhões de toneladas (ZHENG *et al.*, 2017). A parcela de resíduos gerados pela construção civil é bastante mutável, variando entre 13% e 20% em países como Finlândia, Alemanha e Japão; 20% a 35% na Austrália, Inglaterra, Estados Unidos, Hong Kong e Holanda; e cerca de 60% em Israel (LUANGCHAROENRAT *et al.*, 2019; YONETANI 2017; SHARMAN, 2017; EPDHK, 2016; ALLWOOD *et al.*, 2011). No Brasil, cerca de 50% dos resíduos depositados em aterros são

provenientes da construção civil, sendo que a geração de resíduos por habitante chega a 500 kg/ano (CONTRERAS *et al.*, 2016).

A reciclagem de resíduos de construção é um caminho utilizado para minimizar a problemática do impacto ambiental gerado pela grande extração e uso contínuo dos recursos naturais. Essa alternativa começou a ser explorada de forma contundente na Europa após a Segunda Guerra Mundial, quando a demanda por recursos naturais passou a ser muito grande devido à necessidade de reconstrução das cidades, além da problemática da destinação dos escombros de guerra (LEVY, 2001). Em 1992, a Holanda criou o Plano de Implementação dos resíduos de construção e demolição (RCDs) que pretendia reaproveitar cerca de 90% de todo resíduo até o ano 2000. Pesquisas voltadas para era essa questão estão sendo realizadas atualmente ao redor do mundo.

Tratando-se de resíduos de construção e demolição, existe uma grande variedade de materiais diferentes na sua composição, sendo essa variabilidade e heterogeneidade prejudiciais à produção de um concreto adequado e de características mecânicas previsíveis. A ABNT NBR 15116 (2021) classifica os resíduos da construção civil nas classes A, B, C e D, respeitando a Resolução nº 307 do CONAMA (2002). O agregado graúdo de resíduo de concreto é definido pela ABNT NBR 15116 (2021) como sendo “o agregado reciclado obtido do beneficiamento de resíduo pertencente à classe A, composto na sua fração graúda de, no mínimo, 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas”. Em 2012, no Brasil, a Resolução 448 do CONAMA determinou que os geradores de resíduos devem arcar com suas responsabilidades no que diz respeito à redução na geração, ampliação da reutilização, reciclagem, tratamento e disposição dos rejeitos finais (CONAMA, 2012).

Diante desse contexto, o uso de concreto com resíduos de construção e demolição (RCD) é uma alternativa que minimiza os impactos ambientais dos resíduos e da extração de matéria-prima da natureza. O uso de vigas mistas de aço e concreto, com concreto com agregado graúdo reciclado (ARC), pode ser um aliado importante, pois, com tratamento adequado, os resíduos de construção podem ser utilizados na composição do concreto de vigas mistas pré-fabricadas e, graças à ligação adesivada aço-concreto, o processo pode ser utilizado em escala industrial ou em loco com facilidade e agilidade. Portanto, o presente trabalho visa a avaliar a ligação aço-concreto adesivada para uso em elementos mistos, levando-se em conta a substituição total e parcial do agregado graúdo natural por agregado graúdo de resíduo de concreto (ARC).

1.3 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar o comportamento da ligação aço-concreto com o uso de adesivo, considerando concreto convencional e com agregados de resíduos de

concreto (ARC). Além do objetivo principal, é relevante destacar os seguintes objetivos específicos:

- Investigar os mecanismos de transferência de forças entre aço e concreto por meio de ligação adesivada;
- Analisar a resistência ao cisalhamento e a rigidez da ligação aço-concreto com adesivo epóxi;
- Avaliar a influência do tipo de concreto (convencional e com ARC) e da espessura do adesivo nos mecanismos de transferência e na resistência ao cisalhamento da ligação aço-concreto adesivada.

1.4 JUSTIFICATIVA

A composição de um elemento misto de aço e concreto depende essencialmente da ligação entre os componentes. Comumente, são utilizados conectores tipo pino com cabeça para promover o comportamento conjunto aço-concreto. Porém, o uso desses dispositivos traz algumas características indesejáveis, dentre as quais destacam-se: a concentração de tensões próximo aos conectores, as tensões residuais devidas ao processo de soldagem e a redução da capacidade resistente máxima do elemento e de sua vida útil, quando submetida a carregamento cíclicos e dinâmicos (HANSWILLE *et al*, 2007; BOUZAOU *et al*, 2008). Portanto, é interessante a substituição dos conectores pinos com cabeça por algum tipo de ligação que elimine ou reduza esses problemas. Em síntese, a ligação adesivada diminui a concentração de tensões de cisalhamento (ligação contínua), é de fácil aplicação dispensando o uso de solda, além de acelerar a produtividade por possibilitar a utilização de elementos pré-fabricados.

Partindo desse cenário, justificam-se estudos que avaliem a substituição dos conectores pino com cabeça por adesivos, pois esses últimos eliminam ou minimizam grande parte dos problemas encontrados nas ligações com pinos com cabeça. Assim sendo, o uso de adesivos em elementos mistos de aço e concreto é interessante e tem sido estudado em países como França, Índia e China, porém pouco explorado no Brasil.

Do ponto de vista ambiental, o uso do agregado de resíduo de concreto (ARC) é uma realidade na construção civil. No meio acadêmico, essa alternativa vem sendo explorada devido à crescente preocupação com o meio ambiente e à necessidade de reaproveitar os resíduos de construção. Dessa forma, reduz-se a extração de matérias-primas naturais, promovendo um novo uso dos resíduos e diminuição do volume descartado.

Este trabalho é centrado na análise da ligação adesivada aço-concreto com a utilização de concreto com resíduo de concreto (ARC) e adesivo epóxi já utilizado na

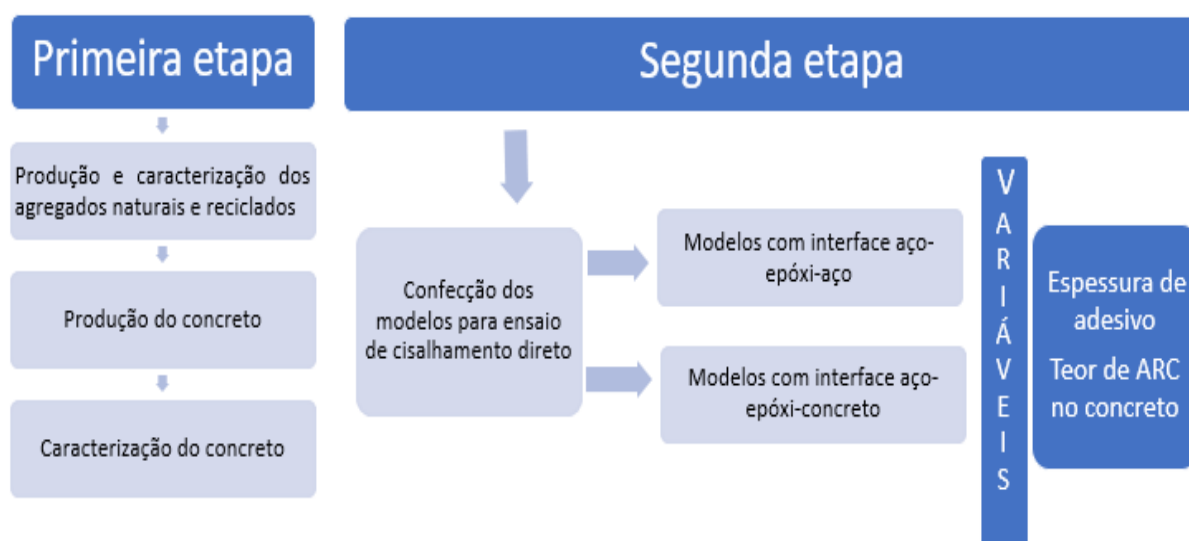
construção civil como chumbador químico. Assim sendo, este é um estudo pioneiro nessa área, e visa a futura utilização desse tipo de ligação em elementos mistos de aço e concreto como alternativa aos conectores tipo pino com cabeça.

1.5 METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos propostos no item 1.3, além de uma extensa revisão bibliográfica sobre os temas apresentados, adotou-se a seguinte metodologia:

- **Programa experimental:** ensaios com modelos físicos foram utilizados para avaliar a ligação aço-concreto via adesivo epóxi. O programa experimental foi dividido em duas etapas principais: 1) produção do concreto com agregado natural e com ARC com a devida caracterização dos materiais que os compõem; 2) confecção dos modelos e ensaios de cisalhamento direto. Na primeira etapa, foi produzido o agregado graúdo de resíduo de concreto, realizada a caracterização dos agregados naturais e reciclados, bem como a produção e caracterização do concreto. Na segunda etapa, foram produzidos modelos para ensaios de cisalhamento direto considerando: ligação aço-epóxi-aço para avaliar o desempenho do adesivo epóxi, e ligações aço-epóxi-concreto nas quais foi avaliada a influência da espessura do adesivo e do uso de concreto com ARC. Um total de 24 modelos de cisalhamento direto foram produzidos e ensaiados sendo 6 para a ligação aço-epóxi-aço e 18 para a ligação aço-epóxi-concreto. A Figura 1-2 resume as etapas realizadas nesse trabalho.

Figura 1-2: Resumo da metodologia



1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO E DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

Esta dissertação foi dividida em oito capítulos, sendo que neste primeiro são apresentados os objetivos, justificativa e metodologia do trabalho, além do uso de ligação adesivada em vigas mistas e uma breve apresentação da problemática de gestão de resíduos sólidos na construção civil.

O capítulo 2 traz aspectos do uso de concretos com resíduos de concreto e das principais características físicas e mecânicas dos agregados de resíduos, bem como dos concretos estruturais produzidos com tais agregados. O capítulo 3 aborda a transferência de forças na interface aço-concreto com foco no mecanismo de aderência entre esses materiais. Já o capítulo 4 traz estudos que avaliaram o uso de adesivos estruturais em ligações adesivadas aço-concreto com destaque para as vigas mistas com ligações adesivadas.

O programa experimental é apresentado no capítulo 5. Nele constam informações sobre a produção do agregado graúdo de resíduo de concreto (ARC), bem como do concreto e suas principais propriedades. Também são abordados os modelos de cisalhamento direto, o procedimento de ensaio e a instrumentação utilizada para avaliar a transferência de forças na ligação adesivada aço-epóxi-concreto.

No capítulo 6, os resultados experimentais são apresentados e discutidos. Nesse capítulo constam as análises da caracterização dos agregados, do concreto produzido e dos ensaios de cisalhamento direto realizados neste trabalho.

No capítulo 7 são apresentadas as conclusões deste estudo e sugestões para trabalhos futuros. As referências bibliográficas são apresentadas no capítulo 8.

2 Concreto com agregados de resíduos de concreto

O uso de resíduos de concreto como agregados para a produção de um novo concreto é uma alternativa bastante explorada e estudada no meio científico. Diversos estudos apontam que é possível obter concretos adequados para usos diversos, utilizando agregados reciclados de concreto. Porém, é de extrema importância conhecer as características dos agregados empregados e do concreto resultante. Por exemplo, no Brasil ainda não existem normas técnicas que abordem o uso de concreto com resíduo para fins estruturais, como já visto em outros países.

Este capítulo aborda questões voltadas para o concreto com resíduos de concreto, apresentando as principais características dos concretos produzidos com agregados reciclados. São apontadas as características mais relevantes do agregado graúdo de resíduo de concreto (ARC), bem como sua influência no comportamento do concreto confeccionado com tais agregados. Neste documento, serão abordados apenas concretos confeccionados com agregados oriundos de resíduos de concreto que, por vezes, serão denominados simplificada e de **agregados reciclados**.

2.1 PROPRIEDADES DO CONCRETO COM ARC

Nas últimas décadas, diversos pesquisadores têm estudado as propriedades dos agregados de resíduos de concreto para melhor compreensão e entendimento desse material visando a sua reutilização na construção civil, principalmente em novos concretos. Algumas características já são amplamente conhecidas; sabe-se, por exemplo, que agregados reciclados possuem heterogeneidade e absorção de água superiores aos agregados naturais (KANG, 2014; WANG *et al.*, 2016; BRANDES, 2018; MALYSZ, 2018; GERIN, 2020). Tais características resultam da existência de uma camada de argamassa aderida, juntamente com sua alta porosidade. Essa argamassa aderida influencia as propriedades mecânicas do concreto com ARC e seus efeitos devem ser levados em conta no processo de produção do concreto (XIAO, 2012; CUI *et al.*, 2015; ECKERT, M. e OLIVEIRA, M. 2017).

O agregado graúdo é o principal responsável pela massa unitária, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional do concreto. Essas propriedades dependem da densidade e resistência do agregado, as quais estão diretamente relacionadas com características físicas como volume, tamanho e distribuição de poros. A dimensão e forma do agregado graúdo, podem ainda afetar indiretamente a resistência do concreto. Quanto maior, mais alongado e mais achatado for o agregado, maior é a tendência de acúmulo de água

próximo à sua superfície (exsudação) enfraquecendo, assim, a zona de transição pasta-agregado e a resistência do concreto. De forma geral, agregados naturais oriundos de rochas britadas e seixos são pouco porosos.

Sendo assim, o agregado é uma parte vital do concreto e governa grande parte de suas propriedades. A Tabela 2-1 traz, de forma resumida, as principais conclusões de estudos que avaliaram a influência da substituição do agregado natural graúdo por agregado graúdo reciclado de concreto. Pode-se concluir assim que, em relação à trabalhabilidade, resistência à compressão e à tração, não foi observado um padrão de aumento ou redução, visto que esses parâmetros são influenciados por diferentes métodos de misturas (não avaliados na Tabela 2-1). Já para o módulo de elasticidade, uma redução foi frequentemente observada.

Tabela 2-1: Influência da substituição do agregado natural por ARC nas propriedades do concreto

Teor de substituição (%)	Autor	Trabalhabilidade	Resistência à compressão	Resistência à tração	Módulo de elasticidade
1 < X ≤ 25	Ferreira (2013)	≈ ¹	↑	↓	≈
	Barbudo <i>et al.</i> (2013)	↑	↓	≈	≈
	Kang (2014)	≈	≈	↓	≈
	Araújo <i>et al.</i> (2016)	↓	↑	≈	≈
25 < X ≤ 50	Gonçalves (2011)		↑	≈	↓
	Ferreira (2013)	Variável	≈	↓	≈
	Barbudo <i>et al.</i> (2013)	↑	≈	↓	≈
	Kang (2014)	↓	↓	↓	↓
	Xiao <i>et al.</i> (2014)		≈	↑	↓
	Wang <i>et al.</i> (2016)	≈	≈	≈	↓
	Araújo <i>et al.</i> (2016)	≈	≈	↓	≈
50 < X ≤ 75	Gerin (2020)	≈	↑	≈	≈
	Ferreira (2013)	≈	≈	↓	≈
	Araújo <i>et al.</i> (2016)	↑	↓	≈	↓
75 < X ≤ 100	Gonçalves (2001)	↓	≈		↓
	Schubert <i>et al.</i> (2012)	Variável	≈		↓
	Ferreira (2013)	≈	↓	↓	≈
	Xiao <i>et al.</i> (2005)		↓	↓	↓
	Barbudo <i>et al.</i> (2013)	↑	≈	↑	↓
	Wang <i>et al.</i> (2016)	≈	↓	↓	↓
	Araújo <i>et al.</i> (2016)	↓	↑	↓	≈

Gerin (2020)	≈	↑	≈	≈
--------------	---	---	---	---

¹≈ Variação menor que 10%

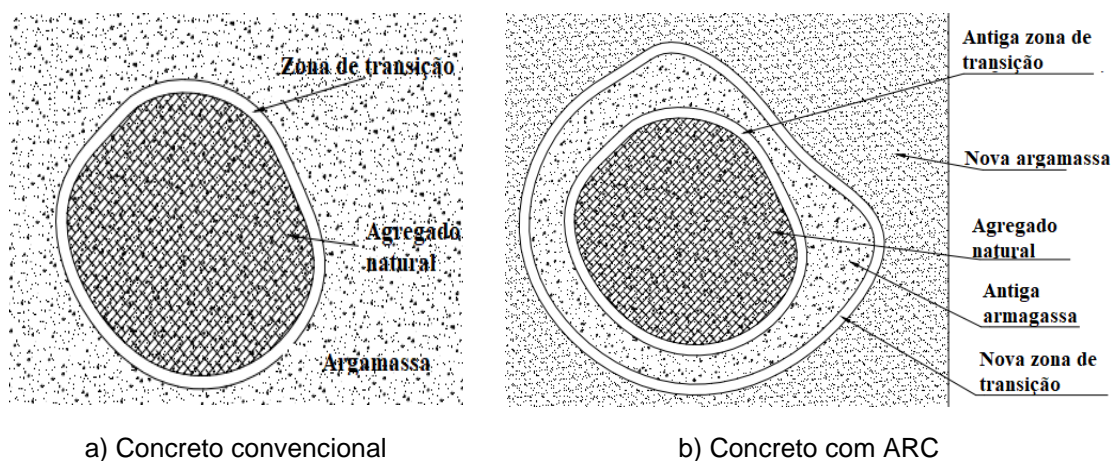
Fonte: Autor (2021)

↑ Aumento; ↓ Redução

Para qualquer tipo de concreto fabricado, é importante um entendimento amplo de sua microestrutura. Analisando-se a microestrutura do concreto convencional, é possível identificar três fases principais: a pasta de cimento endurecida, as partículas de agregado e a zona de transição. Essa última fase possui propriedades distintas das demais, geralmente é a parte menos resistente do concreto e tem influência significativa nas suas propriedades mecânicas (Figura 2-1), (MEHTA E MONTEIRO, 1994).

Para entender o concreto com agregado graúdo de resíduo de concreto é necessário compreender também a sua microestrutura. Os agregados reciclados são produzidos a partir de resíduos de concreto britados e os agregados naturais do concreto original estão agora cobertos por uma camada de argamassa pertencente à matriz cimentícia do concreto antigo. Assim sendo, as propriedades do concreto reciclado (Figura 2-1b) estão vinculadas a uma combinação de fases diferente da encontrada no concreto convencional (Figura 2-1a). Essas fases são constituídas agora de agregados naturais antigos, argamassa antiga aderida, antiga zona de transição, argamassa nova e uma nova zona transição (CALCADO, 2015). A heterogeneidade já existente no concreto convencional torna-se mais complexa com a utilização de agregados reciclados.

Figura 2-1: Microestrutura do concreto convencional e com ARC



Fonte: Autor (2021)

De acordo com TAM e TAM (2005) os agregados reciclados estão sempre ligados a uma camada de argamassa aderida, tornando os agregados mais porosos e menos resistentes. Assim sendo, nos concretos com ARC, é encontrada uma nova zona de transição menos resistente se comparada ao concreto convencional.

2.1.1 Absorção de água e trabalhabilidade do concreto com ARC

É sabido que a porosidade, granulometria, forma e textura superficial dos agregados influenciam as propriedades do concreto no estado fresco. A taxa de absorção de água está diretamente ligada à porosidade do agregado (MONDINI, 2018). Como o concreto com ARC é mais poroso, tem-se, por consequência, concretos com maior absorção de água.

Segundo González-Taboada *et al.* (2016), a taxa de absorção de água do agregado natural varia, geralmente, entre 0% e 4%, enquanto o valor da taxa de absorção para o agregado reciclado fica entre 1,65% e 13,1%. A Tabela 2-2 apresenta valores de absorção medidos em agregados de resíduos de concreto encontrados em alguns estudos. Observa-se que a taxa de absorção de água dos agregados reciclados é geralmente maior que a registrada para agregados naturais. Isso implica em um concreto também com maior porosidade, logo, taxas de absorção de água também maiores. Estudos realizados por Lintz *et al.* (2012), Eckert e Oliveira (2016), e Gao *et al.* (2018), apontam que quanto maiores os teores de substituição de ARC, maior é a absorção de água do concreto fabricado. O aumento dessa propriedade é preocupante para a durabilidade do concreto. Essa questão é tratada posteriormente no item 2.1.3.

Tabela 2-2: Valores de absorção de água encontrados na literatura

Estudo	Absorção do agregado natural (%)	Absorção do ARC (%)	Trabalhabilidade	
			Concreto convencional (cm)	Trabalhabilidade Concreto com ARC (cm)
Schubert <i>et al.</i> (2012)	-	2,1 - 4,8	45	40-48
Kang <i>et al.</i> (2014)	1,1	5,4		-
Wang <i>et al.</i> (2016)	0,6	2,4	17	16-17
Araújo <i>et al.</i> (2016)	0,5	6,7		-
Eckert (2017)	0,5 - 1,1	5,9 - 8,4	14	10,5 - 13
Brandes (2018)	0,6	3,4 - 4,4		-
Rangel <i>et al.</i> (2019)	1,3 - 1,5	6,1 - 11,4		-
Gerin (2020)	1,6	5,7	23,5	21-22,5
Prasad <i>et al.</i> (2021)	0,5	1,9 - 7,1		-

Fonte: Autor (2021)

Considerando um mesmo traço, um concreto produzido com ARC possui, geralmente, menor trabalhabilidade se comparado a concreto com agregados naturais. Isso ocorre devido à maior porosidade do agregado de resíduos de concreto resultante da grande quantidade de argamassa aderida (GONÇALVES, 2011) que absorve parte da água da mistura deixando uma quantidade menor de água de amassamento.

. De maneira geral, essa característica tende a reduzir a trabalhabilidade do concreto porque parte da água da mistura é absorvida pelo agregado reciclado, deixando uma quantidade menor de água de amassamento.

Alguns estudos avaliaram ainda o efeito do teor de substituição de ARC na trabalhabilidade do concreto. Eckert e Oliveira (2016) e Ozbakkaloglu *et al.* (2017), constataram que, com o aumento do teor de substituição do ARC na mistura, havia uma redução na trabalhabilidade do concreto. Esse efeito pode ser explicado pelo mesmo parâmetro de absorção de água dos agregados reciclados que reduzem a água livre de amassamento.

Para minimizar os efeitos da redução da trabalhabilidade do concreto, comumente emprega-se a pré-molhagem dos agregados reciclados. Com a pré-molhagem, o agregado reciclado inicia o processo de saturação em uma etapa anterior à mistura do concreto; assim, durante a mistura, ele já não tem a mesma capacidade de absorção, afetando menos a trabalhabilidade do concreto. Entretanto, esse processo deve ser realizado de forma controlada, pois uma pré-molhagem inadequada pode aumentar a relação água/cimento da mistura e reduzir a resistência do concreto. Diante disso, a ABNT NBR 15116 (2021) recomenda, para concretos sem fim estrutural, que o agregado reciclado passe por uma pré-molhagem de até 80% da taxa de absorção do agregado.

Outra alternativa para melhorar a trabalhabilidade dos concretos produzidos com ARC, é o uso de aditivos plastificantes ou superplastificantes, assim como diversos modificadores presentes no mercado (LEITE, 2001, PELISSARI *et al.*, 2020). Rashid *et al.* (2020) utilizaram superplastificantes nas misturas e concluíram que o uso de superplastificantes foi satisfatório e pôde compensar o efeito negativo do ARC na trabalhabilidade. O uso de aditivos também foi avaliado por Barbudo *et al.* (2013), que obtiveram concretos com trabalhabilidades compatíveis com o concreto de referência (abatimento $\geq 110\text{mm}$), mesmo para concretos com teores de 100% de ARC. Com o uso de plastificantes e superplastificantes, os autores observaram ainda uma redução na quantidade de água necessária para um abatimento semelhante, isso também contribuiu para aumentar a resistência à compressão dos concretos com agregados reciclados e aditivos em relação à referência. Cui *et al.* (2015) utilizaram um modificador de organossilicone alcalino que foi pulverizado no ARC para modificar sua taxa de absorção de água. A modificação da superfície do ARC mostrou-se uma ferramenta com potencial para reduzir a perda de trabalhabilidade do concreto, resultando em uma mistura consistente e de boa trabalhabilidade. Outro procedimento que ajuda a trabalhabilidade do concreto com ARC, é submeter o agregado a uma etapa de peneiramento que visa à retirada das partículas mais finas presentes do agregado (ARAÚJO *et al.*, 2016).

Segundo Gerin (2020), os três métodos de mistura do concreto com agregados reciclados mais usados para melhorar a trabalhabilidade do concreto fresco são: pré-

molhagem com compensação de água (LEITE, 2001); pré-molhagem sem adição de água extra na mistura (KUSTER, 2018) e o método “*TSMA (two-stage mixing approach)*” ou “*método de mistura em duas fases*”, proposto por Tam e Tam (2005). Nesse último, a adição de água é feita em duas etapas. O item 5.3.3 apresenta o método *TSMA*, que também foi empregado no presente trabalho.

2.1.2 Resistência à compressão e módulo de elasticidade

Avaliar o desempenho mecânico do concreto inclui avaliar, dentre outros parâmetros, sua resistência à compressão e seu módulo de elasticidade. Esses parâmetros permitem que se conheçam importantes características do material e também se são adequados ao uso para aplicações específicas como as estruturais. Sendo assim, é importante conhecer a influência do ARC nessas propriedades do concreto.

A resistência do concreto está diretamente ligada à presença de discontinuidades e falhas presentes na pasta de cimento, agregados e zona de transição. Via de regra, o principal fator que influencia a resistência do concreto é sua porosidade, sabendo que há uma relação inversa entre esses dois fatores (MONDINI, 2018). Segundo a lei de Abrams, de 1918, a relação água/cimento está diretamente ligada com a resistência à compressão do concreto, visto que o aumento dessa relação enfraquece a matriz cimentícia devido ao aumento da porosidade. Portanto, a diminuição dessa relação reduz a porosidade e melhora significativamente a resistência da zona de transição, conferindo ao concreto uma maior resistência (MEHTA e MONTEIRO, 2006).

De maneira geral, a resistência à compressão do concreto com ARC (mais poroso) é inferior a resistência do concreto com agregado natural (menos poroso), quando se leva em consideração misturas com o mesmo consumo de cimento. Entretanto, uma série de estudos indicam que os concretos com ARC geralmente possuem pelo menos dois terços da resistência dos concretos comum. Essa resistência pode ser aumentada reduzindo-se a relação água/cimento, contudo, isso gera um aumento no consumo de cimento e, por consequência, um maior impacto ambiental no tocante a emissões de CO₂ (ÂNGULO e FIGUEIREDO, 2011).

Na maioria das vezes, o agregado reciclado possui resistência à compressão inferior ao agregado natural em função da sua maior porosidade, absorção de água e menor massa unitária e específica. Então, em concretos com matrizes de alta resistência (baixa relação água/cimento) é esperado que os concretos com ARC tenham resistência à compressão menores que os concretos com agregados naturais. Segundo Cabral (2007), quando a matriz do concreto com ARC for menos resistente (elevada relação água/cimento) que o agregado reciclado, este último não exercerá grande influência na resistência do concreto, uma vez que

o elo mais frágil será a matriz cimentícia. Por outro lado, quando a matriz cimentícia é mais resistente, o agregado reciclado passa a exercer substancial influência na resistência do concreto, pois a ruptura tende a ocorrer no agregado. Em concretos produzidos com ARC, a resistência do concreto que originou o ARC não possui grande influência na resistência do novo concreto quando a relação água/cimento é alta. Contudo, quanto mais elevada for a resistência do concreto com ARC, mais dependente esta fica da resistência do concreto que originou o agregado reciclado (CABRAL, 2007). De acordo com González-Taboada *et al.* (2016) o aumento do percentual de substituição de ARC leva à redução da resistência à compressão do concreto. No entanto, quando a relação água/cimento é superior a 0,6, a influência do ARC não é significativa, porque a ruptura se dá na zona de transição.

Os estudos de Xiao *et al.* (2005), Gonçalves (2011), Ferreira (2013), Araújo *et al.* (2016), Kurad *et al.* (2017) e Gerin (2020) indicam que com métodos adequados de processamento dos agregados reciclados, métodos de misturas e adições, não há redução significativa na resistência à compressão do concreto. Nesses estudos, mesmo com substituição total do agregado graúdo natural por ARC, podem ocorrer redução ou aumento da resistência à compressão do concreto (Tabela 2-3).

Tabela 2-3: Influência do ARC na resistência à compressão do concreto

Autor	Variação percentual na resistência do concreto (%)	
Gonçalves (2001)	+2	
Xial <i>et al.</i> (2005)	-12	
Schurbert <i>et al.</i> (2012)	+12,5	
Ferreira (2013)	-13	
Araújo <i>et al.</i> (2016)	+5,2	
Wang <i>et al.</i> (2016)	-11,2	
Kurad <i>et al.</i> (2017)	-7 (sem aditivo)	+12,9 (com aditivo)
Gerin <i>et al.</i> (2020)	+14,3	

Fonte: Autor (2021)

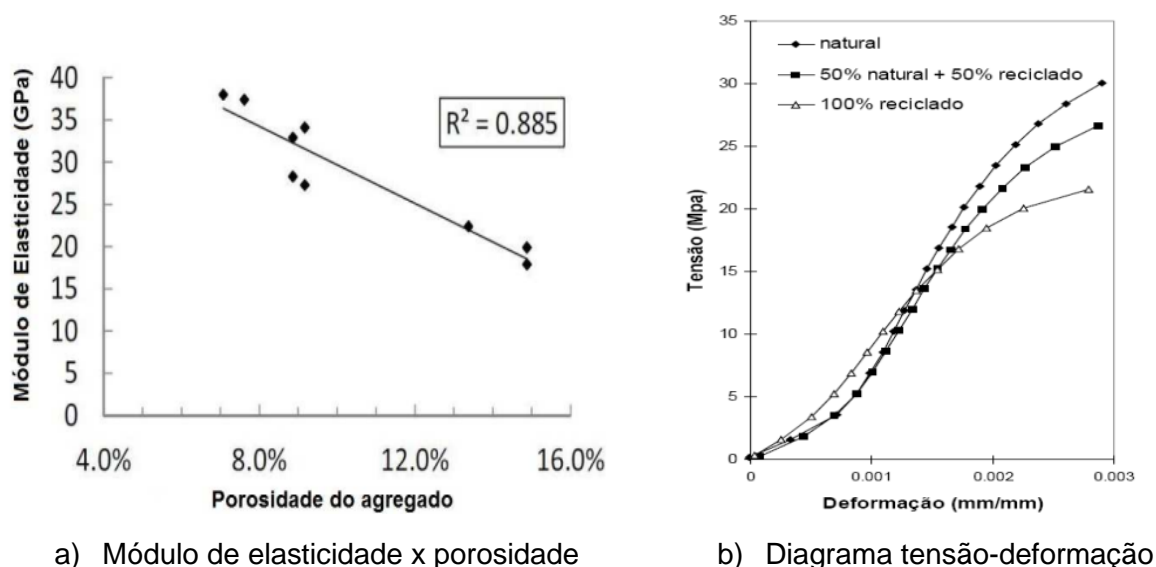
Em concretos estruturais (25 - 35 MPa) com consumo de cimentos mais moderados (250 – 350 kg/m³), o ARC pode ser usado quase que integralmente com vantagens técnicas competitivas, quando o teor de absorção de água do agregado é de 7% (ÂNGULO; FIGUEREDO, 2011). As propriedades de absorção e densidade do ARC, bem como o processo de mistura escolhido (adição de água extra, pré-saturação do agregado), influenciam a zona de transição do concreto e, portanto, sua resistência à compressão. Para concretos com mesma relação água/cimento, quando o ARC possui baixa absorção de água, devido à sua natureza ou ao processo de mistura, ele não consegue absorver uma grande

quantidade de água livre. Nesse caso, a quantidade de água livre é maior e pode afetar negativamente a zona de transição do concreto produzido. No entanto, se o ARC possuir alta capacidade de absorção, irá reter uma quantidade relativamente grande de água, o que acaba melhorando efetivamente a zona de transição do concreto e sua resistência à compressão (GONZÁLEZ-TABOADA *et al.*, 2016).

A compreensão sobre o módulo de elasticidade ou modulo de deformação é de extrema importância para estruturas, tendo em vista que é usado durante o cálculo estrutural para prever as flechas máximas admissíveis e, por conseguinte, o grau de fissuração dos elementos estruturais. Diferentemente da resistência onde os agregados graúdos são tratados de forma secundária, para o módulo de elasticidade eles tem grande relevância (MONDINI, 2018).

Vários fatores determinam o comportamento elástico de materiais heterogêneos como o concreto. Densidade, fração volumétrica, módulo de elasticidade dos componentes e características da zona de transição influenciam o comportamento do material. Como a densidade é inversamente proporcional à porosidade, esta acaba por influenciar a porosidade do concreto que, por sua vez, influencia seu módulo de elasticidade. Isso ocorre porque a porosidade do agregado determina sua rigidez e, por conseguinte, controla a capacidade de o agregado restringir a deformação da matriz (MEHTA e MONTEIRO, 2006). Como o agregado reciclado é mais poroso, é lógico pensar que, com o aumento do teor de substituição de ARC, o concreto apresente redução do módulo de elasticidade. A Figura 2-2 apresenta, respectivamente, a influência da porosidade e do uso de ARC nos valores do módulo de elasticidade do concreto.

Figura 2-2: Influência da porosidade e do uso de ARC no módulo de elasticidade do concreto

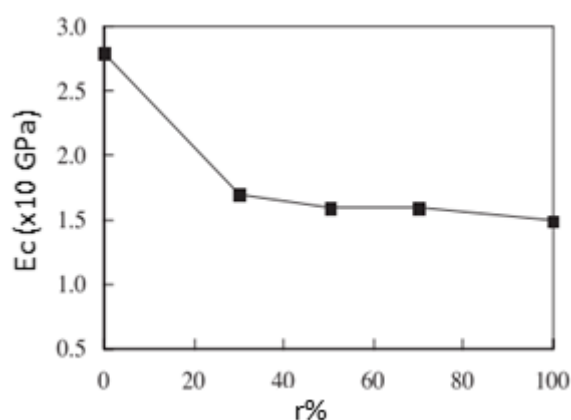


Fonte: a) GUÐMUNDSSON (2013); b) ÂNGULO (2005)

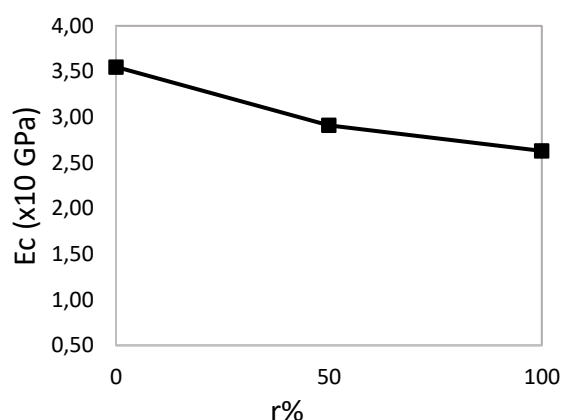
Segundo Ângulo e Figueredo (2011), a redução do módulo de elasticidade dos concretos com ARC tem consequências importantes no projeto de estruturas de concreto armado, já que esse parâmetro afeta a rigidez dos elementos estruturais submetidos à flexão. Estudos diversos também identificaram quedas no módulo de elasticidade nos concretos com ARC, sendo quedas de até 45%. (LEITE, 2001; XIAO *et al.*, 2005; GONÇALVES, 2011; SCHUBERT *et al.*, 2012; FERREIRA, 2013; KANG, 2014; WANG *et al.*, 2016; ARAÚJO *et al.*, 2016; GERIN, 2020). De acordo com Ujike (2000), essa redução é mais sentida quando se produz concretos com ARC com baixa relação água/cimento. O decréscimo do módulo de elasticidade pode afetar também a durabilidade do concreto armado.

Xiao *et al.* (2005) mostra que o teor de substituição de ARC também tem influência sobre o módulo de elasticidade do concreto. Entretanto, as curvas tensão-deformação desses concretos são semelhantes às dos concretos com agregados naturais e, em princípio, não há nenhuma objeção quanto ao uso do ARC em concretos estruturais por conta do módulo de elasticidade. Nesse estudo, houve redução do módulo de elasticidade com o aumento do teor de ARC no concreto. A forma e propriedades das superfícies do ARC podem ter influência na curva tensão-deformação e no módulo de elasticidade. A Figura 2-3a traz a relação entre o módulo de elasticidade e o teor de substituição (XIAO *et al.*, 2005). O mesmo comportamento foi observado no estudo de Wang *et al.* (2016), que utilizou teores de 50% e 100% de substituição de ARC e observou reduções de 15% e 22%, respectivamente.

Figura 2-3: Relação entre o módulo de elasticidade e o teor de substituição do ARC



a) XIAO *et al.* (2005)



b) Dados de WANG *et al.* (2020)

Fonte: XIAO *et al.* (2005)

Vários estudos (BARBUDO *et al.*, 2013; KANG *et al.*, 2014; SOARES *et al.*, 2014; WANG *et al.*, 2016; GERIN, 2020) comprovam que quanto maior o teor de substituição do ARC no concreto, menor é o seu módulo de elasticidade. Contudo, podem ser obtidos concretos com ARC com reduções pequenas dos seus módulos de elasticidade. Kang *et al.* (2014) produziram concretos com ARC ($a/c=0,45$) com diferentes teores de substituição. Para

os teores de substituição investigados (15%, 30% e 50%), foram observadas reduções respectivamente de 0%, 9% e 13% nos módulos de elasticidade em relação ao concreto de referência. Em concretos de resistências à compressão semelhantes, Soares *et al.* (2014) encontraram reduções de 5,8 % e 11,3% no módulo de elasticidade do concreto, para substituições de 25% e 100% de ARC em relação ao concreto somente com agregados naturais. Segundo ARAÚJO *et al.* (2016), as reduções para concretos com 19%, 43%, 75% e 100% de ARC foram de 6,1%, 6,1%, 11,8% e 5,7% respectivamente. Gerin (2020) também obteve pequenas reduções no módulo de elasticidade ao utilizar o método de mistura *TSMA* e substituição do agregado por volume. Foram confeccionados concretos com 30%, 50% e 100% de ARC e obtidas reduções de apenas 3%, 5,4%, 8,9% respectivamente.

Nos diversos trabalhos citados anteriormente, foram encontradas diferentes reduções de módulo de elasticidade. A principal razão dessa diversidade de valores é a diferença dos módulos de elasticidade dos próprios agregados reciclados (XIAO *et al.* 2005). Sabe-se que o módulo de elasticidade do concreto com ARC está ligado a módulo de elasticidade do próprio ARC e ao seu volume. Geralmente os agregados possuem valores de módulos maiores que os da matriz, dessa forma, quanto mais elevados forem os valores dos módulos e volume dos agregados, maiores serão os valores do conjunto. Segundo Cabral (2007), aparentemente o comportamento do módulo de elasticidade do concreto é regido pelo agregado. Dessa forma, o fato do agregado reciclado ser mais deformável que o agregado natural, implica que o concreto produzido com agregado reciclado é mais deformável que o concreto convencional.

2.2 COMENTÁRIOS FINAIS

Baseado nos trabalhos citados, conclui-se que o uso de agregados reciclados, principalmente os agregados graúdos de concreto, pode cooperar para minimizar os impactos da construção civil no meio ambiente. O uso do ARC em concreto geralmente está associado a uma perda na trabalhabilidade, e reduções na resistência à compressão e no seu módulo de elasticidade. Embora a substituição de agregado natural por ARC deixe o concreto mais poroso e altere algumas de suas características mecânicas, é possível mitigar os efeitos negativos mediante processos de tratamento do agregado, métodos de mistura, adições e tecnologia adequadas.

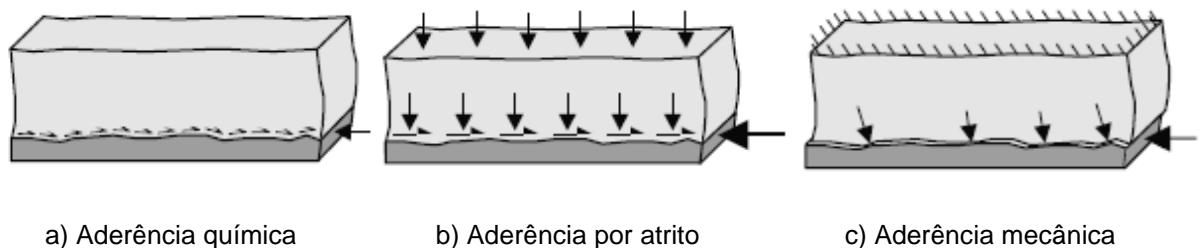
3 Transferência de forças na interface aço-concreto

3.1 MECANISMOS DE ADERÊNCIA E COMPORTAMENTO CONJUNTO

A aderência refere-se ao estado em que dois ou mais substratos diferentes são unidos por relações interfaciais para a transferência de força. As relações interfaciais que mantêm os substratos unidos podem ser forças de *Van der Waals*, ligações químicas ou atração eletrostática. Além desses mecanismos, a resistência mecânica do sistema é determinada também por propriedades mecânicas da zona de contato entre os materiais.

Em elementos mistos, a aderência aço-concreto pode ser dividida em três mecanismos principais: aderência química, aderência por atrito e aderência mecânica. A nomenclatura dos mecanismos é idêntica à utilizada para elementos em concreto armado. A aderência química (Figura 3-1a) ou por adesão decorre da ligação físico-química do aço com o concreto e resulta das reações de hidratação do concreto. Porém, a aderência química não é resistente o suficiente para transmitir os esforços entre os materiais, tem comportamento frágil e é rapidamente vencida. Em ensaios de cisalhamento direto, essa aderência está relacionada ao trecho inicial da curva Tensão de cisalhamento vs. Escorregamento relativo (Figura 3-2) e trata-se de um mecanismo elasto-frágil observado somente nos estágios iniciais de carregamento, em que os deslocamentos e as tensões são muito pequenos.

Figura 3-1: Parcelas de aderência aço-concreto



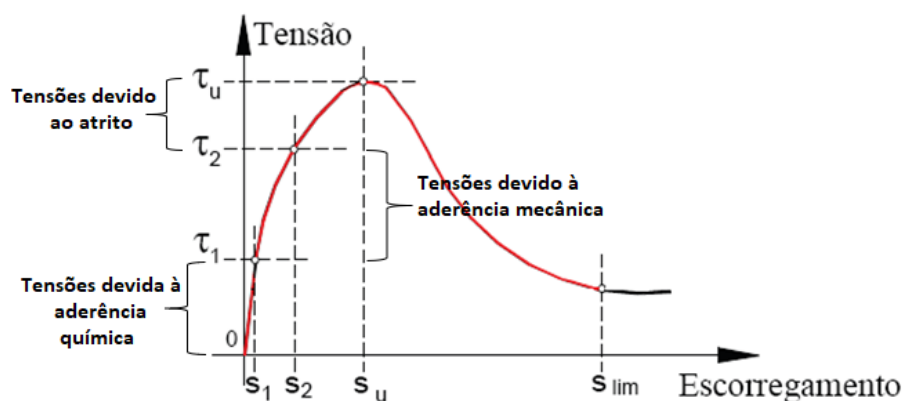
Fonte: JOHANSSON (2002)

Vencida a aderência por adesão, passa a ser mobilizado o mecanismo de aderência por atrito, que surge quando ocorre o deslizamento relativo entre os materiais, e é expresso por um coeficiente de atrito μ . Essa parcela da aderência é afetada por ações externas de compressão e pela rugosidade superficial dos materiais, estando relacionada ao trecho final da curva Tensão de cisalhamento vs. Escorregamento relativo. O coeficiente de atrito pode variar de zero, em superfícies lubrificadas com óleo, a 0,6 em condições normais de uso (SILVA, 2006). A parcela de aderência por atrito (Figura 3-1b) é maior que a parcela de

aderência química e pode ser aumentada ou reduzida por tratamentos superficiais no aço e no concreto.

A aderência mecânica existe naturalmente devido a falhas e irregularidades superficiais inerentes ao processo de produção dos perfis e do concreto (Figura 3-1c). As micro rugosidades presentes nos materiais aumentam essa parcela de aderência devido ao surgimento de micro ancoragens. Em vigas mistas, essa aderência não é suficiente para garantir o comportamento conjunto entre os materiais, porém essa parcela pode ser consideravelmente aumentada utilizando-se conectores de cisalhamento, como os pinos com cabeça, tornando-a a principal parcela de aderência entre o aço e o concreto. Nesses casos, a parcela de adesão e de atrito são desprezadas no dimensionamento. A Figura 3-2 mostra o gráfico Tensão de cisalhamento vs. Escorregamento relativo ilustrando as três parcelas de aderência.

Figura 3-2: Curva típica Tensão de cisalhamento vs Escorregamento relativo aço-concreto – ensaio de cisalhamento direto



Fonte: Adaptado de ARAÚJO *et al.* (2013)

O comportamento conjunto é imprescindível para a existência de qualquer elemento misto, sendo necessária uma interação entre os dois materiais. Essa interação é garantida por conectores de cisalhamento, mossas e reentrâncias, visto que a aderência natural não é capaz de assegurar o comportamento conjunto. As principais funções desses mecanismos são a de transferir o fluxo de cisalhamento na interface dos materiais, impedir a separação entre o concreto e o aço e minimizar o deslizamento horizontal devido a forças de cisalhamento. Esse deslizamento é prejudicial para o comportamento conjunto, visto que esse é caracterizado quando os materiais unidos se deformam como um único elemento.

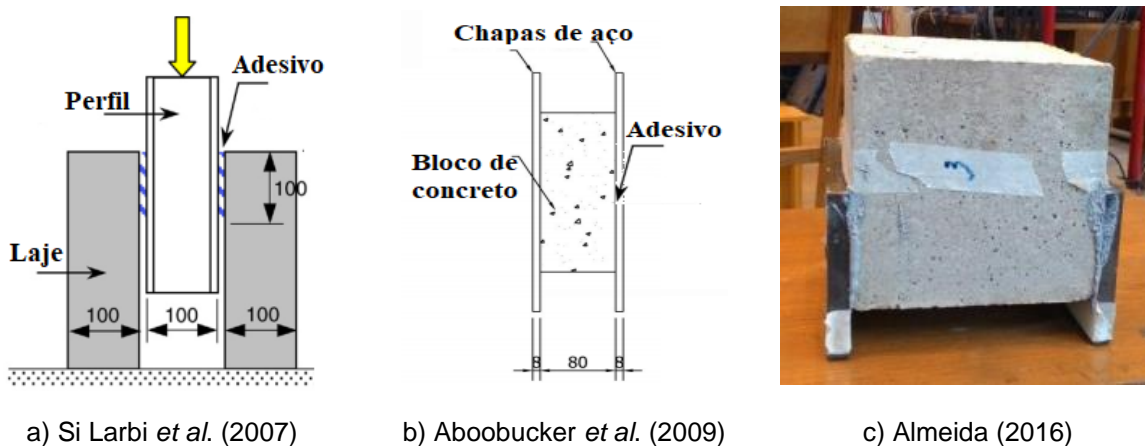
Uma das maneiras de avaliar o comportamento da ligação aço-concreto é o ensaio de cisalhamento direto. Esse ensaio avalia de forma simples a transferência de forças de cisalhamento entre os materiais. Além de quantificar essa resistência, é possível ainda medir o deslizamento relativo entre o aço e o concreto, além de definir se a ligação tem

comportamento dúctil ou rígido. O ensaio de cisalhamento direto é normatizado pelo EUROCODE 4 (1994) e consiste em um perfil de aço unido a duas lajes de concreto. Uma força vertical é aplicada sobre o perfil, gerando reações na base das lajes de concreto. Transdutores de deslocamento são posicionados em cada lado do modelo para medir o deslizamento relativo entre as partes. O ensaio é realizado até a ruptura da ligação e tem como principal resultado a curva Tensão (ou força) de cisalhamento vs. Escorregamento relativo aço-concreto.

O ensaio de cisalhamento direto normatizado pelo EUROCODE 4 (1994) aplica-se a ligações aço-concreto com conectores tipo pino com cabeça. Contudo, tal modelo serve de base para muitos pesquisadores que o utilizam para estudar outros tipos de ligação como, por exemplo, as ligações adesivadas, com as devidas adaptações. Muitos estudos utilizam a geométrica proposta pelo EUROCODE 4 (SI LARBI *et al.* 2007; JURKIEWIEZ *et al.* 2011; MEAUD *et al.* 2014; KUMAR *et al.* 2016), enquanto outros modificam esse arranjo (BERTHET *et al.* 2011; ABOOBUCKER *et al.* 2009; ALMEIDA 2016; DE CORTE *et al.* 2017). Ainda assim, os ensaios de cisalhamento direto permitem investigar a ligação aço-concreto e suas interações quanto ao cisalhamento. A Figura 3-3 ilustra alguns modelos para ensaios de cisalhamento direto encontrados na literatura, para a interface aço-concreto adesivada.

O modelo de Si Larbi *et al.* (2007), Figura 3-3a, é similar ao proposto pelo EUROCODE 4 (1994), retirando-se apenas os conectores tipo pino com cabeça e substituindo-os por adesivos. Já o modelo apresentado por Aboobucker *et al.* (2009), (Figura 3-3b) é um modelo tipo “sanduiche”, onde uma laje de concreto tem duas laterais totalmente revestidas por duas chapas de aço maiores, com espessura relativamente pequena. Já Almeida *et al.* (2016) apresenta um modelo reduzido (Figura 3-3) em que um bloco central de concreto tem duas de suas laterais parcialmente revestidas por chapas de aço mais espessas. Esse modelo torna-se interessante devido ao seu custo.

Figura 3-3: Diversos modelos para ensaios de cisalhamento direto disponíveis na literatura



Fonte: Autor (2021)

3.2 TENSÃO DE ADERÊNCIA ENTRE BARRA DE AÇO E CONCRETO COM ARC

Após extensa pesquisa nas bases de dados, não foram identificados estudos contemplando a ligação entre aço e concreto, via ensaios de cisalhamento direto, em elementos cujo concreto é confeccionado com ARC. Contudo, a literatura traz estudos que abordam o comportamento da aderência entre barras de aço imersas no concreto com ARC. Sendo assim, este item aborda o tema, tendo como foco analisar a influência do concreto com agregado graúdo de resíduo de concreto na aderência aço-concreto.

No caso da barra imersa no concreto, o comportamento da aderência é avaliado por meio de ensaios de arrancamento (*Pull-out test*, *Beam-end test*). Nesses ensaios, as barras de aço, embebidas no concreto, são tracionadas enquanto o concreto que a circunda fica contido. Desse ensaio são obtidas a curva Força vs. Deslizamento e a resistência de aderência entre os dois materiais em relação ao deslizamento relativo.

A aderência entre aço e concreto, analisada nesses ensaios de arrancamento, é vista de maneira semelhante à aderência nos elementos mistos aço-concreto, ou seja, é dividida nos mesmos três componentes de aderência: química, por atrito, e mecânica. Nesse item também são apresentados estudos nos quais foi avaliada a aderência aço-concreto com ARC via ensaios de arrancamento.

Xiao e Falkner (2007) avaliaram a influência do ARC na aderência aço-concreto considerando teores de substituição do agregado natural por ARC de 50% e 100%. Foram investigadas barras lisas e nervuradas de 10 mm de diâmetro. Os modelos com barras lisas apresentaram reduções de 12% e 6% na aderência, respectivamente para os teores de 50% e 100% em relação ao concreto com agregado natural. Já para as barras nervuradas, a influência do concreto com ARC na aderência foi mínima (menor que 1%). Esse resultado ocorreu porque o efeito da ligação mecânica, proporcionado pelas nervuras, é predominante e mais relevante se comparado ao efeito do uso de ARC no concreto. Foi observado ainda que o desenvolvimento da força de aderência e o processo de deterioração da aderência aço-concreto com ARC foram semelhantes ao observado nos modelos com concreto convencional.

O efeito do ARC na aderência é estudado em termos de uma relação comumente chamada de *Normalized bond strengths* ou Resistência normalizada de aderência (RLN), definida como a razão entre a tensão de aderência média (τ_0) e a raiz quadrada da resistência a compressão do concreto (f_{ck}), ou seja, $RLN = \tau_0/\sqrt{f_{ck}}$. Nos modelos com barras lisas, para teor de substituição de 50%, observou-se diminuição de 7,4% na resistência normalizada de aderência, enquanto para substituição de 100% houve um aumento de 5,2%. No caso das barras nervuradas, o cenário é ainda mais favorável: para os teores de substituição de 50% para 100% ocorreram aumentos, respectivamente, de 4,2% e 12% na resistência normalizada

de aderência. Isso indica que mantida a resistência do concreto, a aderência aço-concreto com ARC seria maior que a registrada para aço-concreto convencional.

Choi e Kang (2008) também avaliaram a influência do ARC na aderência. Os concretos foram fabricados com $a/c = 0,5$ e $a/c = 0,4$ e teores de substituição de 0%, 30%, 50% e 100%. Para ambas as relações a/c , notou-se aumento na resistência normalizada de aderência nos modelos com ARC.

No mesmo contexto, Huang e Wang (2011) também observaram aumento na aderência aço-concreto ao se aumentar o teor de ARC. Foram analisados teores de substituição de 0%, 30%, 50%, 75% e 100%. Nesse estudo, quanto maior o teor de substituição, menor a resistência do concreto, porém, a aderência aço-concreto aumentou com o aumento do teor de substituição.

Butler *et al.* (2011) realizaram ensaios de arrancamento, do tipo *Beam-end test*. Além dos modelos de referência (com agregados naturais), foram produzidos concretos com substituição total do agregado gráudo natural por ARC, oriundos de duas fontes diferentes. Também houve variação no comprimento de ancoragem (125 mm ou 375 mm) e na resistência do concreto (30 MPa ou 50 MPa). A Tabela 3-1 apresenta alguns dos resultados obtidos por Butler *et al.* (2011).

Tabela 3-1: Resultados de Resistência de aderência – ensaios arrancamento de Butler *et al.* (2011)

Identificação	Tipo de agregado	f_{ck} (MPa)	τ_0 (MPa)	% τ_0^1	RLN = $\frac{\tau_0}{\sqrt{f_{ck}}}$
NAT-30-125	Natural	34,5	6,99		1,19
NAT-30-375			5,69		0,97
NAT-50-125		49,0	6,75		0,96
NAT-50-375			5,86		0,84
ARCI-30-125	ARC I	30,9	5,66	-19%	1,02
ARCI-30-375			5,04	-11,4%	0,91
ARCI-50-125		47,9	5,98	-11,4%	0,86
ARCI-50-375			5,25	-10,3%	0,76
ARCII-30-125	ARC II	31,3	5,50	-21,3%	0,98
ARCII-30-375			5,00	-12,1%	0,89
ARCII-50-125		49,4	5,86	-13,2%	0,83
ARCII-50-375			5,31	-9,4%	0,76

1-Diminuição da tensão de aderência em relação ao concreto de referência

Fonte: adaptado de BUTLER *et al.* (2011)

Os modelos com agregados de resíduo de concreto, bem como para diferentes comprimentos de ancoragem e resistência do concreto, apresentaram uma tendência decrescente tanto para valor da tensão média de aderência quanto para a Resistência normalizada de aderência.

No estudo de Prince e Singh (2013), foi avaliada a aderência aço-concreto com ARC, utilizando um ensaio de arrancamento, em que a ancoragem da barra ocorre apenas na região central para mitigar o efeito das tensões de compressão na aderência. Os pesquisadores concluíram que o comportamento da aderência do aço com concreto com ARC é semelhante ao comportamento da aderência do aço com concreto convencional. Os parâmetros investigados foram: teor de ARC no concreto (25%,50%,75% e 100%) e diâmetro das barras (8, 10, e 12,5 mm). Os resultados dos ensaios mostraram tendências de crescimento para a RLN, com o aumento do teor de substituição de ARC no concreto, exceto para o grupo com barras de 8 mm de diâmetro e teores de substituição de 25% e 75%. Ou seja, para os concretos com substituição total de agregado natural por ARC, houve aumento na aderência para todos os diâmetros de barras.

Breccolotti e Materazzi (2013) também estudaram a influência de ARC na aderência aço-concreto para teores de 50% e 100% e duas relações a/c (0,5 e 0,45). Houve redução da resistência última de aderência com o aumento do teor de ARC. Entretanto, os valores da resistência normalizada de aderência não foram muito afetados e tenderam a aumentar com maior teor de ARC.

Teores de substituição de 20%, 50% e 100% e relações água/cimento de 0,5 e 0,65 foram investigados por Paz *et al.* (2013). A aderência aço-concreto foi medida em ensaios de arrancamento com barras nervuradas de 10mm de diâmetro ao longo de 7, 28, 90 e 365 dias para determinar seu desenvolvimento ao longo do tempo. Aos 28 dias, os resultados (Tabela 3-2) mostraram variações na resistência à compressão do concreto e na aderência aço-concreto em função do teor de substituição.

Tabela 3-2: Síntese dos resultados de Paz *et al.* (2013)

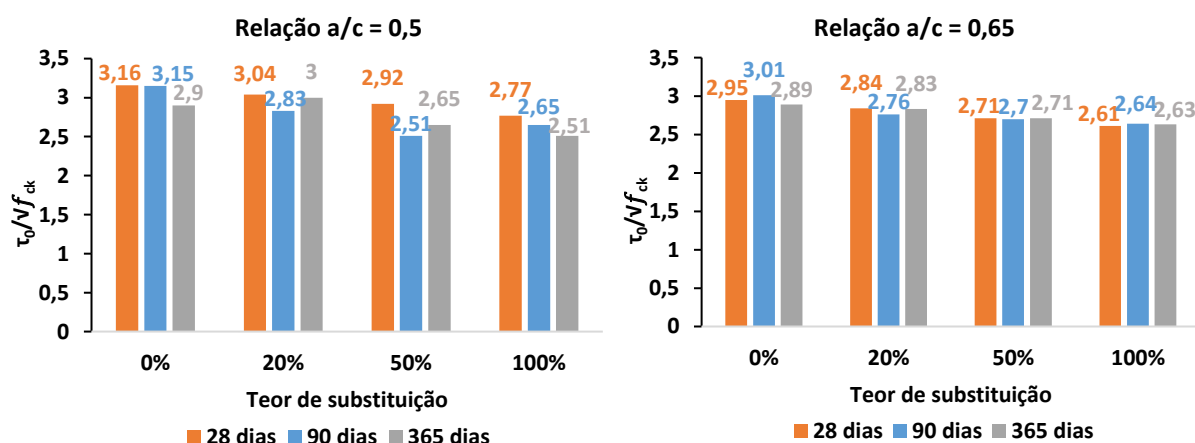
Teor de substituição (%)	Fator a/c = 0,5			Fator a/c = 0,65		
	f_{cm} (MPa)	τ_{max} (MPa)	$RLN = \frac{\tau_0}{\sqrt{f_{ck}}}$	f_{cm} (MPa)	τ_{max} (MPa)	$RLN = \frac{\tau_0}{\sqrt{f_{ck}}}$
0	64,13	25,32	3,16	53,85	21,62	2,95
20	57,19	22,97	3,04	52,83	20,67	2,84
50	52,74	21,22	2,92	49,85	19,11	2,71
100	44,20	18,39	2,77	42,04	16,90	2,61

Fonte: adaptado de PAZ *et al.* (2013)

O aumento no teor de substituição resulta em reduções na resistência à compressão do concreto e na tensão de aderência aço-concreto e o mesmo ocorre com a Resistência normalizada de aderência. Observou-se ainda que a redução da aderência foi menos acentuada nos concretos menos resistentes ($a/c = 0,65$).

A Figura 3-4 mostra a resistência normalizada de aderência para as idades de 28, 90 e 365 dias. Para a relação $a/c = 0,5$, houve variação na resistência normalizada de aderência ao longo do tempo, sendo observados decréscimos de 8,2%, 6,9%, 14% e 9,4%, respectivamente, para teor de 0%, 20%, 50% e 100%. Já para $a/c = 0,65$, não foram observadas variações consideráveis ao longo do tempo, sendo que a variação máxima foi de apenas 4%. Levando-se em consideração o aumento do teor de substituição do agregado natural por ARC, houve redução da resistência normalizada de aderência em relação à referência para todas as idades.

Figura 3-4: Variação da resistência normalizada de aderência ao longo do tempo (PAZ et al., 2013)



Fonte: Adaptado de Paz et al. (2013)

No estudo de Kim et al. (2015), foram avaliadas três relações a/c (0,51, 0,46 e 0,33) e os seguintes teores de substituição: 0%, 30%, 60% e 100%. Para as maiores relações a/c (0,46 e 0,51), ocorreu redução da resistência de aderência normalizada; já na menor relação ($a/c = 0,33$) esse valor se manteve constante. Também foi avaliada a influência da resistência à compressão do concreto, da densidade do agregado graúdo e da taxa de absorção de água do agregado. Enquanto a resistência à compressão do concreto aumenta em cerca de 10%, a aderência aumenta 20%, exceto no caso da relação $a/c = 0,33$. Nesse caso, aumentar a resistência à compressão do concreto diminui a aderência, porém com menor variação em comparação com as relações a/c mais elevadas. Com o aumento da densidade, há aumento na tensão de aderência. Por fim, quanto maior teor de absorção de água menor a resistência de aderência.

A fabricação de concreto com uso de agregados provenientes de resíduos de concretos introduziu novos fatores relacionados ao comportamento da aderência aço-concreto devido a efeitos causados pela presença da camada de argamassa residual nesses agregados. Como já dito, essa argamassa aderida ao agregado gera uma nova zona de transição que é mais fraca que a zona de transição original. Entretanto, estudos da aderência aço-concreto com ARC mostram que a aderência aço-concreto é menos afetada pelo uso de agregados de resíduos do que por parâmetros como a geometria das nervuras das barras, resistência do concreto, condições de contorno e cobertura (PAZ *et al.* 2013).

A Tabela 3-3 resume os estudos citados neste item com os respectivos efeitos do ARC na aderência aço-concreto.

Tabela 3-3: Influência do ARC na aderência aço-concreto e seus efeitos

Autores	Teor de substituição (%)	Efeito do teor de ARC
Xiao e Falkner (2007)	50,100	↑
Choi e Kang (2008)	30, 50, 100	↑
Huang e Wang (2011)	30, 50, 75, 100	↑
Butler <i>et al.</i> (2011)	100	↓
Prince e Singh (2013)	25, 50, 75, 100	↑
Breccolotti (2013)	50, 100	↑
Paz <i>et al.</i> (2013)	20, 50, 100	↓
Kim <i>et al.</i> (2015)	30, 60, 100	↓

↑ Aumento

Fonte: Autor (2021)

↓ Redução

3.3 COMENTÁRIOS FINAIS

Diante dos estudos apresentados, não há consenso na literatura quanto a influência do uso de ARC na aderência aço-concreto, sendo o aço em forma de barras, portanto, ainda são necessários estudos voltados para esse assunto. Estudar essa influência é um assunto complexo devido à grande variabilidade das propriedades dos agregados graúdos de concreto que podem ser oriundos de fontes diversas. Entre essas propriedades destacam-se: densidade, quantidade de argamassa aderida, porosidade, absorção de água e resistência à compressão do agregado. Tais propriedades influenciam no concreto resultante e, conseqüentemente, na aderência aço-concreto.

4 ADESIVOS E LIGAÇÕES ESTRUTURAIS ADESIVADAS

Neste capítulo são apresentados os principais estudos sobre adesivos e ligações adesivadas em vigas mistas de aço e concreto. É abordado o comportamento dos adesivos, das suas ligações, da ligação aço-concreto e como diferentes parâmetros mecânicos e geométricos influenciam no comportamento da ligação por adesivos.

4.1 ADESÃO MECÂNICA E FALHAS EM JUNTAS ADESIVADAS

Para introduzir o estudo dos adesivos, é importante definir os principais conceitos utilizados nessa área. A norma ASTM D907 (2012) traz alguns conceitos importantes para o presente estudo:

- Adesivo: substância capaz de manter dois materiais unidos por fixação de superfície;
- Aderente ou substrato: elemento unido a outro por adesivo;
- Aderir: ato de manter duas superfícies juntas por adesão;
- Adesão mecânica: adesão entre superfícies em que o adesivo mantém os elementos unidos por ação de intertravamento;
- Junta adesivada: região onde dois aderentes são mantidos unidos por adesivo.

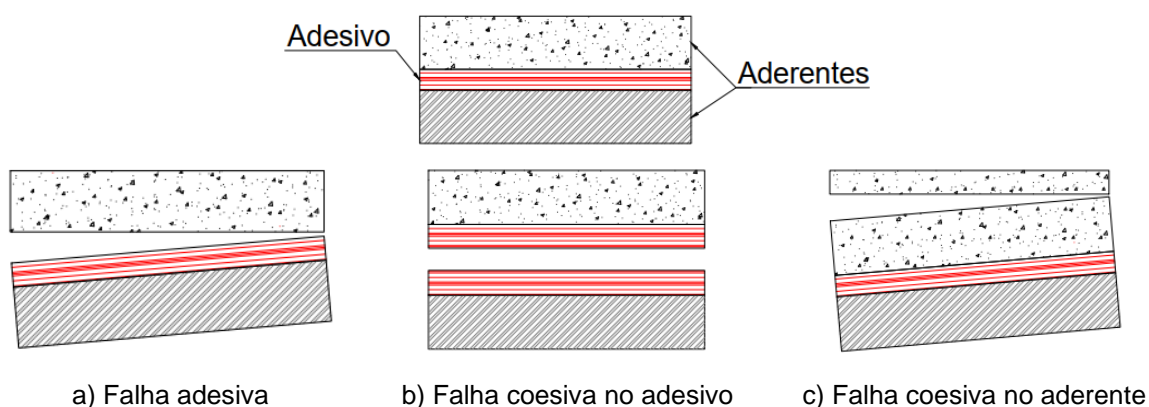
A teoria da adesão mecânica é uma das principais teorias utilizadas para explicar o mecanismo de união entre elementos via adesivos. De acordo com essa teoria, há ancoragem mecânica entre as partes conectadas, pois o adesivo penetra nas irregularidades superficiais dos elementos. Para que isso ocorra, o adesivo deve possuir propriedades reológicas adequadas e os substratos devem ter superfícies que facilitem a penetração dos adesivos, o que pode ser obtido por tratamentos superficiais (SILVA, 2007; ALMEIDA, 2016).

Estudar os tipos de falhas em juntas adesivadas (Figura 4-1) é fundamental para detectar quais problemas podem ocorrer numa junta e atuar de forma preventiva, economizando tempo e recursos. Basicamente, existem três tipos de falhas em juntas adesivadas: falha adesiva, coesiva no adesivo e coesiva no aderente. A falha adesiva (Figura 4-1a) ocorre na região entre o adesivo e o substrato, e sua principal característica é a separação ou destacamento do adesivo de um dos substratos. Após esse tipo de falha, o adesivo permanece apenas sobre um dos aderentes. Essa falha pode ocorrer pelas seguintes razões: aplicação insuficiente de pressão no momento da colagem, incompatibilidade entre o adesivo e o substrato ou contaminação nas superfícies coladas.

A falha coesiva está associada às propriedades mecânicas dos materiais. A falha coesiva no adesivo (Figura 4-1b) significa uma ruptura na estrutura do adesivo devido a cargas excessivas e, após esse tipo de falha, o adesivo é encontrado na superfície de ambos os substratos. A falha coesiva no aderente (Figura 4-1c) ocorre quando o aderente tem resistência mecânica menor que o adesivo e menor do que a interface adesivo/substrato.

Frequentemente, a falha em juntas adesivadas ocorre por falha adesiva e coesiva no adesivo simultaneamente, e são atribuídas porcentagens para cada falha, sendo essa porcentagem calculada com base na fração de área de contato superficial onde cada tipo de falha ocorreu (EBNESAJJAD, 2014; ALMEIDA, 2016).

Figura 4-1: Tipos de falhas em juntas adesivadas



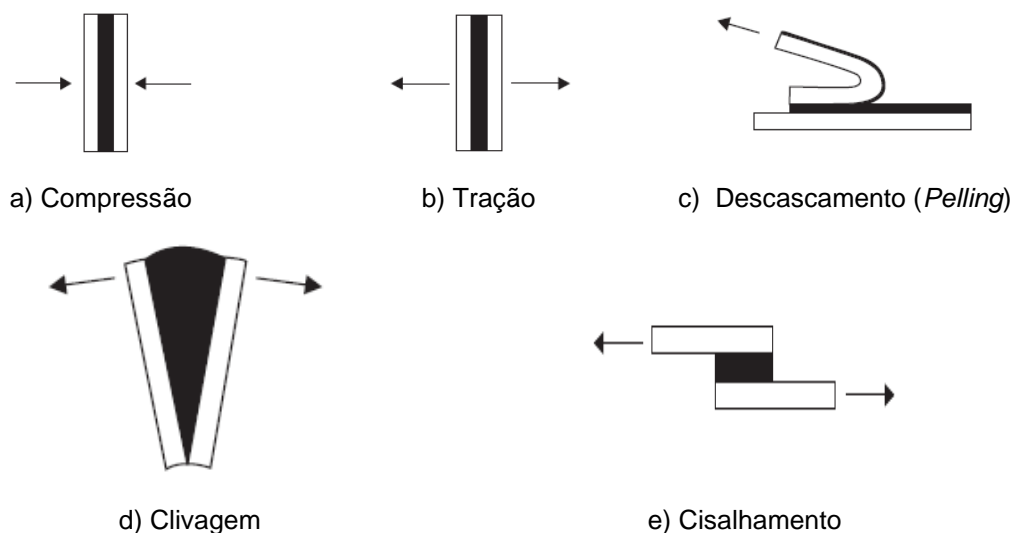
Fonte: Autor (2021)

O modo de falha não deve ser usado como único critério para analisar uma junta adesivada. Em algumas combinações aderente-adesivo, falhas adesivas podem ser observadas, mas ainda podem apresentar resistência maior do que uma junta semelhante ligada por um adesivo menos resistente e que tenha falha coesiva. O modo de falha pode indicar se a ruptura ocorreu devido à baixa resistência de um material ou devido à preparação inadequada da superfície ou, ainda, à incompatibilidade aderente-adesivo.

Os tipos de cargas atuantes, suas orientações e a velocidade de aplicação são fatores importantes na determinação da resistência da junta. Carregamento constante pode causar uma falha prematura do adesivo em serviço, especialmente após exposição ao calor ou à umidade. Cargas de impacto podem levar uma ligação adesivada à falha, mesmo se o adesivo possuir excelente resistência à tração ou ao cisalhamento. A ação do ambiente, como a temperatura, também pode diminuir efetivamente a resistência de um adesivo, sendo importante estudar as condições ambientais e como elas o afetam. Sempre que possível, as juntas adesivadas devem ser testadas sob condições ambientais compatíveis com o ambiente real de utilização. (EBNESAJJAD, 2014). Portanto, cada junta adesivada deve ser previamente estudada individualmente.

As juntas adesivadas podem estar sujeitas a solicitações diversas (Figura 4-2), com destaque para compressão, tração, descascamento, clivagem e cisalhamento (EBNESAJJAD, 2014).

Figura 4-2: Tipos de tensões em juntas adesivadas



Fonte: EBNESAJJAD (2014)

Quando uma junta é submetida à compressão pura (Figura 4-2a), é menos provável que ela falhe do que quando submetida a outros tipos de tensões, porém a compressão pura é pouco comum na prática. Em juntas submetidas à tração (Figura 4-2b), a tensão normal é distribuída uniformemente sobre a área da junta; porém, quando há excentricidade, mesmo que pequena, a junta pode falhar mais facilmente devido a outras tensões. Nesses casos, os substratos devem ser espessos para evitar a flexão. A aplicação de forças não axiais pode causar o surgimento de tensões de clivagem e de descascamento (Figura 4-2d e Figura 4-2e) sendo que, geralmente, os adesivos são menos resistentes a elas.

Em caso de descascamento (Figura 4-2c), um ou ambos os substratos são flexíveis e, assim, surge uma tensão considerável na linha da junta na tentativa de separar os materiais. Quanto ao cisalhamento (Figura 4-2e), semelhante à tensão de tração, as tensões se distribuem uniformemente em toda a área colada, mobilizando a área de contato de maneira eficiente. Sendo assim, sempre que possível, os esforços em juntas adesivadas devem ser transmitidos por cisalhamento (EBNESAJJAD, 2014; ALMEIDA, 2016).

Em relação à ligação aço-concreto, almeja-se um mecanismo eficiente para a transmissão de tensões de cisalhamento já que essas tensões são predominantes na interface aço-concreto. Os adesivos são bastante eficazes nesse contexto, instigando os diversos estudos voltados à sua aplicação em elementos mistos.

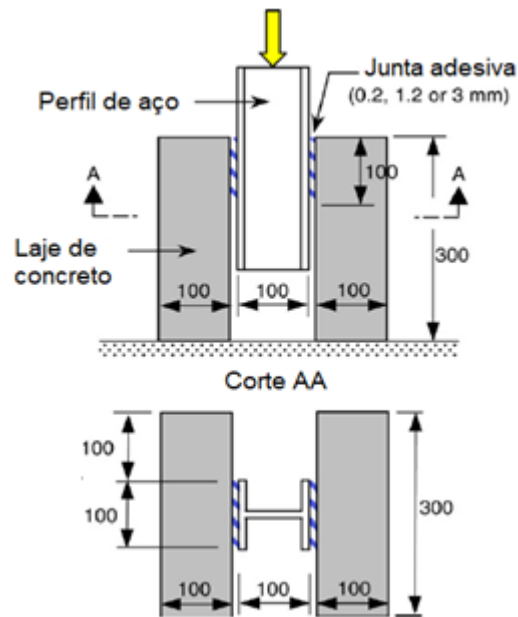
4.2 LIGAÇÕES AÇO-CONCRETO VIA ADESIVOS

O adesivo estrutural é um polímero usado para unir duas superfícies para produção de uma junta resistente. Essa definição surgiu no instante em que as colagens precisavam transmitir esforços, na mesma grandeza de ligações por solda ou rebites, de um elemento para outro. Na construção civil, os adesivos mais utilizados são aqueles à base de epóxi, pois possuem algumas propriedades essenciais, tais como: boa resistência mecânica; boa resistência térmica; ótima adesão a metais; ótima resistência química e dureza; cura em temperaturas e velocidades variadas; e ausência de compostos voláteis (como a água) durante o processo de cura (ALMEIDA, 2016).

O precursor dos estudos sobre adesivos epóxi em ligações aço-concreto foi Severud (1960). A aplicação a vigas mistas mostrou resultados promissores, pois ocorreram falhas por ruptura da laje de concreto à compressão e por escoamento do aço. Assim sendo, a resina epóxi conseguiu distribuir as tensões entre os elementos da viga de forma satisfatória. A substituição dos conectores pino com cabeça por adesivos foi avaliada por Miklofsky *et al.* (1962 *apud* BOUAZAOU *et al.*, 2007) e, diferentemente de Severud (1960), houve separação brusca entre a laje de concreto e o perfil de aço, ou seja, ruptura da ligação sem falha dos componentes. James *et al.* (1967) também investigaram a ligação adesivada, comparando-a com a ligação por pinos com cabeça; novamente foi utilizado adesivo à base de epóxi, com espessura de 6,3mm e resistência ao cisalhamento na faixa de 8,2 a 16,5 MPa. Agregados britados foram posicionados na superfície conectada. Observou-se que, na maioria dos modelos, a força última resistida pela ligação adesivada foi menor que a resistida pelos conectores pinos com cabeça (ligação mecânica), porém com valor suficientemente satisfatório. Assim, o adesivo à base de epóxi poderia substituir os conectores de cisalhamento, porém novos estudos eram necessários para avaliar parâmetros que interferiam na resistência da ligação adesivada.

Os adesivos como alternativa para substituir os conectores de cisalhamento em vigas mistas voltaram a ser investigados a partir do ano 2000. Para esse fim, dois tipos de adesivos são mais abordados: adesivos à base de epóxi e à base de poliuretano. Si Larbi *et al.* (2007) realizaram alguns ensaios a fim de caracterizar ambos os tipos de adesivos, e constataram diferença significativa de comportamento entre os adesivos à base de epóxi e de poliuretano. O adesivo epóxi mostrou-se mais resistente, porém de comportamento rígido, enquanto o adesivo poliuretano apresentou resistência menor e comportamento dúctil. Ensaios de cisalhamento direto permitiram avaliar a transferência na interface, considerando a geometria mostrada na Figura 4-3.

Figura 4-3: Geometria dos modelos para ensaio de cisalhamento direto



Fonte: adaptado de SI LARBI *et al.* (2007)

Ao todo foram ensaiados seis modelos com variação no tipo de resina (epóxi ou poliuretano) na espessura do adesivo e no tipo de tratamento superficial. Os resultados são apresentados na Tabela 4-1.

Tabela 4-1: Resultados ensaios de cisalhamento direto de Si Larbi *et al.* (2007)

Resina	Tratamento superficial	Espessura da junta (mm)	Força última (kN)	Tensão resistente ao cisalhamento (MPa)	Rigidez da ligação (MN/mm)
Epóxi	Acetona	1,2	104	5,2 ± 0,3	46
	Óxido de alumínio	1,2	118	5,9 ± 0,1	47
	Óxido de alumínio	3	110	5,5 ± 0,1	23
Poliuretano	Acetona	0,2	100	5,0 ± 0,0	11
	Óxido de alumínio	0,2	104	5,2 ± 0,3	12
	Óxido de alumínio	3	7	0,3 ± 0,1	-

Fonte: SI LARBI *et al.* (2007)

As ligações aço-concreto com adesivo epóxi apresentaram maior resistência ao cisalhamento. Quanto ao comportamento, as ligações com adesivos epóxi e poliuretano apresentaram, respectivamente, comportamentos rígido e dúctil. O modelo com junta de poliuretano de 3 mm foi descartado por falha na ligação, atribuída, pelos autores, à alta fluidez do adesivo e à espessura inadequada.

Bouazaoui *et al.* (2007) ensaiaram duas vigas, uma com adesivo epóxi e outra com poliuretano, ambas com 3mm. Os resultados (Tabela 4-2) mostraram que que a ligação

adesivada se comportou de maneira a garantir a transferência dos esforços de cisalhamento, porém com comportamento rígido.

Tabela 4-2: Valores de força última obtidos por Bouazaoui *et al.* (2007)

Viga mista	Tipo de adesivo	Espessura (mm)	F _{ue} (kN)	F _{ut} (kN)	%
P1	Epóxi	3	238	206	13,4
P2	Poliuretano	3	185	206	-11,4

Fonte: Bouazaoui *et al.* (2007)

A Figura 4-4 apresenta as vigas P1 e P2 após ensaio. Na viga P1 a falha ocorreu devido ao escoamento do aço e ao esmagamento do concreto no meio do vão. A falha foi brutal e rígida, no entanto a adesão do perfil com o concreto foi considerada boa. A única falha observada na interface estava na extremidade da viga, provavelmente devido ao choque no momento da ruptura. Contudo, nenhuma fissura na junta adesivada foi observada. Para a viga P2 verificou-se que a falha ocorreu por escoamento do aço: um grande deslocamento vertical do perfil de aço, seguido do cisalhamento da junta adesiva e da fissuração do concreto. Foi observado que não existiam fissuras de aderência, porém o concreto apresentou várias fissuras laterais. A falha da viga P2, com adesivo poliuretano, ocorreu com uma força última de valor 11,4% menor que o estimado. Nessa viga, o deslizamento aço-concreto chegou a 2 mm, bem superior aos 0,035mm registrados na viga P1.

Figura 4-4: Configuração final das vigas P1 e P2



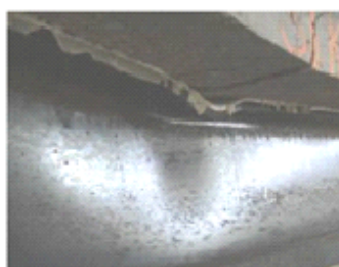
a) Viga P1



b) Ligação da viga P1 após o ensaio



c) Viga P2



d) Falha no meio do vão da viga P2



e) Ligação da viga P2 após o ensaio

Fonte: Bouazaoui *et al.* (2007)

Embora não tenha ocorrido falha na ligação aço-concreto, fica evidente a influência do tipo de adesivo no comportamento da viga mista e na transferência de esforços.

Souici *et al.* (2013) realizaram um estudo no qual foi comparada a ligação com pino com cabeça e adesivo epóxi. Nesse trabalho, foram ensaiados, à flexão, cinco modelos de vigas mistas. Os resultados indicam que todas as vigas mistas tiveram interação parcial, pois todas apresentaram descontinuidades nos diagramas de deformações. Apesar disso, é possível ainda traçar uma análise dos resultados e chegar à conclusão que a ligação com adesivo epóxi tem comportamento rígido, enquanto a ligação com pinos com cabeça demonstrou comportamento dúctil.

Kumar *et al.* (2017) avaliaram o comportamento da ligação pino com cabeça e ligação adesivada epóxi com ensaio de cisalhamento e testes de impacto. Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto mostraram uma resistência parecida para os dois tipos de modelo, entretanto uma grande diferença foi observada no deslocamento relativo médio, sendo de 0,07 mm para os modelos com adesivo e 14,03 mm para os modelos com pinos, evidenciando novamente uma ligação extremamente rígida nos modelos adesivados e uma ligação dúctil nos modelos com pinos com cabeça. Outro resultado observado foi que a energia necessária para início de fissuração ocorreu cerca de 29% menor para a ligação feita com pinos com cabeça. Entretanto, a energia necessária que leva até a falha foi de aproximadamente 27% maior para a ligação com pinos. Assim, o intervalo de golpes entre o início da fissuração e a falha é bem maior para a ligação com pinos. A fissuração demorou mais a aparecer na ligação adesivada devido a uma melhor distribuição de tensões dessa ligação, porém o comportamento da ligação adesivada é “frágil”, “absorvendo” menos energia entre o início da fissuração e a falha.

4.3 PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM O COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO ADESIVADA A BASE DE EPÓXI

O adesivo a base de epóxi resulta em ligação aço-concreto com comportamento estrutural mais adequado para elementos mistos, principalmente vigas mistas. Neste item, são destacados os principais parâmetros e sua influência na ligação aço-concreto adesivada. Entre esses parâmetros destacam-se: espessura da camada adesivada, resistência à compressão do concreto, módulo de elasticidade do adesivo, área de ligação e tratamento superficial. A Tabela 4-3 traz um panorama geral dos estudos e variação dos parâmetros investigados.

Tabela 4-3: Síntese dos estudos da ligação aço-concreto e parâmetros avaliados

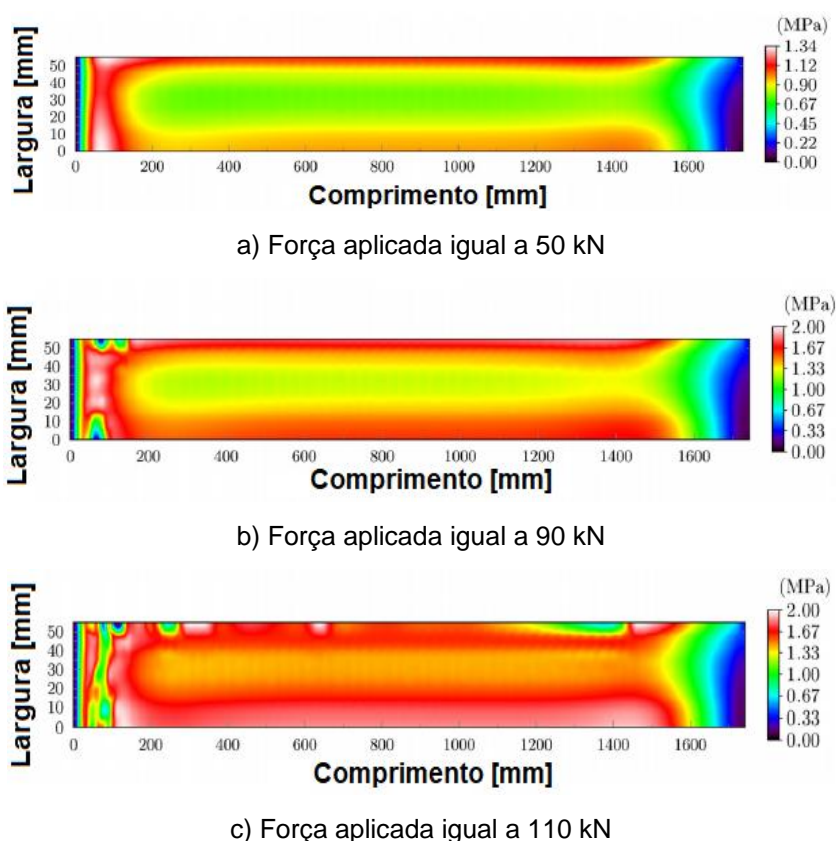
Autor	Tipo de adesivo e espessura (mm)	Tipo de ensaio	Resistência do concreto (MPa)	Tratamento superficial	Módulo de elasticidade do adesivo (GPa)
Si Larbi et al. (2007)	Epóxi e poliuretano. 1,2; 3	Cisalhamento direto	67	Coríndon, primer, e acetona	12,3 (epóxi); 0,8 (poliuretano)
Bouzaoui et al. (2007)	Epóxi e poliuretano. 3mm; variada transversal e longitudinalmente	Flexão em viga mista	68	Solvente, cobertura primária com o adesivo, jateamento	12,3 (epóxi); 0,8 (poliuretano)
Aboobucker et al. (2009)	Epóxi.	Cisalhamento direto	33; 53; 132	Acetona e jateamento	
Berthet et al. (2011)	Epóxi. 1; agregados pré-colados; influência de sulcos	Cisalhamento direto	60	-	12,3
Jurkiewicz et al. (2011)	Epóxi. 3	Cisalhamento direto	39	Acetona, primer, jateamento	12,3
Luo et al. (2012)	3; 5; 7; 10; 15	Numérico: Flexão em viga mista	20; 30; 40; 50; 60; 68	-	0,001; 00,1; 0,038; 0,1; 1; 12,3
Souici et al. (2013)	Epóxi. 4	Flexão em vigas mistas	35	Solvente e jateamento	12,3
Meaud et al. (2014)	Epóxi com sílica. > 1mm	Cisalhamento direto	34 a 37	Acetona, primer, jateamento e lixa	11,760 ± 1,374
Corte et al. (2017)	Epóxi. 2; 1,5	Cisalhamento direto	130	Acetona e jateamento	4,75
Kumar et al. (2018)	Epóxi e poliuretano. 1; 2; 3; 4; 5	Cisalhamento direto	73,5	Acetona e lixa	7,5 (epóxi)
Bhardwaj et al. (2021)		Numérico: Flexão em viga mista	41,6	-	12,3; 1,23; 0,123; 0,0123
Jurkiewicz et al. (2021)	Epóxi. 1	Cisalhamento direto e flexão em vigas mistas	28,8 a 37,1 ou 60,6	Acetona, jateamento e compressor de ar	7,1 ± 534

Fonte: Autor (2021)

Conhecer o modo de falha de uma ligação é importante para investigar como ampliar sua resistência. Porém, ao projetar elementos mistos, o mais importante é conhecer a capacidade resistente da interface aço-concreto.

Luo *et al.* (2012) investigaram como a resistência da ligação pode influenciar a capacidade resistente de um elemento misto. A investigação utilizou a modelagem numérica de uma viga mista submetida à flexão como estratégia para o estudo. O primeiro passo foi fixar a resistência ao cisalhamento da ligação em 2 MPa e, a partir disso, avaliar como o cisalhamento se desenvolve no elemento. A variável analisada foi a intensidade da força aplicada e, para tanto, foram avaliados três valores: 50 kN, 90 kN e 110 kN. A Figura 4-5 mostra o desenvolvimento das tensões de cisalhamento na interface para cada valor de força aplicada. É importante ressaltar que apenas um quarto da viga foi modelado com o intuito de reduzir o esforço computacional.

Figura 4-5: Evolução da tensão de cisalhamento na interface concreto/adesivo



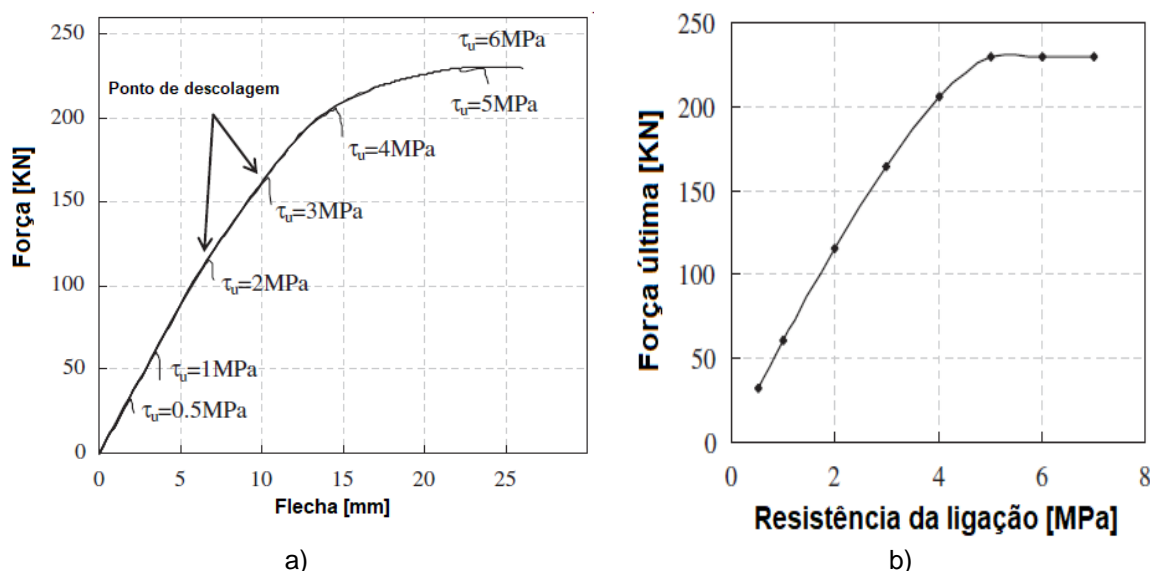
Fonte: adaptado de LUO *et al.* (2012)

Para uma força de 50 kN (Figura 4-5a), o nível de tensão de cisalhamento na interface ainda é muito pequeno, porém é possível ver que as maiores tensões ocorrem na extremidade da viga e diminuem no meio do vão. Ao aumentar a força para 90 kN (Figura 4-5b), ocorre aumento da tensão de cisalhamento e da região onde essa tensão é maior; aproximadamente metade da região de ligação atinge a tensão máxima de 2 MPa. Por fim, quando a força

aplicada é de 110 kN (Figura 4-5c), quase toda a área da interface aço-concreto atinge sua resistência ao cisalhamento, o que indica que a descolagem é iminente. A falha por descolagem é um processo frágil e transforma a viga mista em uma viga de aço, reduzindo assim sua capacidade resistente à flexão. Assim, na utilização de vigas mistas adesivadas é importante evitar a falha da ligação aço-concreto.

Após estudar como a tensão de cisalhamento se desenvolve na interface, Luo *et al.* (2012) observaram o desempenho de uma viga mista quando a resistência ao cisalhamento da ligação variou entre 0,5 e 6 MPa. A Figura 4-6 mostra os resultados encontrados. Por exemplo, para uma ligação de resistência ao cisalhamento de 0,5 MPa, a força resistida pela viga foi de aproximadamente 30 kN (Figura 4-6a). Já para uma interface com resistência ao cisalhamento de 4 MPa, essa força foi de cerca de 200 kN (Figura 4-6a).

Figura 4-6: Força resistente de uma viga mista com ligação de diferentes resistências ao cisalhamento



Fonte: adaptado de LUO *et al.* (2012)

A Figura 4-6b aponta a relação não-linear entre a força última aplicada e a resistência ao cisalhamento da ligação. Os resultados mostram que, para uma máxima eficiência da viga mista estudada, a falha não ocorre na ligação, mas nos materiais, sendo necessária uma ligação com resistência ao cisalhamento de no mínimo 5 MPa (Figura 4-6b).

Assim, a resistência ao cisalhamento da ligação deve ser capaz de transferir integral ou parcialmente os esforços de cisalhamento, constituindo o método de transferência de forças que define a solidariedade entre os materiais. Os elementos mistos podem falhar por falhas nos materiais e não na ligação adesivada. Dessa forma, a resistência do elemento misto é previsível por cálculos da resistência dos materiais, e é a máxima possível.

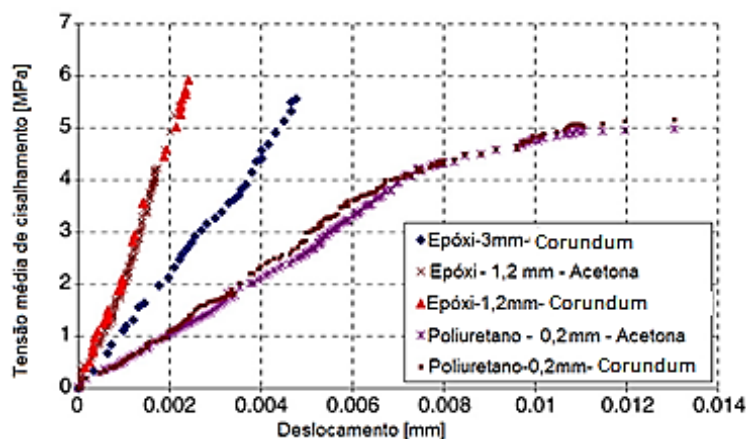
A seguir são analisados alguns parâmetros que influenciam a resistência da ligação aço-epóxi-concreto.

4.3.1 Espessura da camada adesivada

Si Larbi *et al.* (2007), Bouazaoui *et al.* (2007), Berthet *et al.* (2011), Luo *et al.* (2012) e Kumar *et al.* (2018) investigaram a influência da espessura da camada de adesivo.

Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto realizados por Si Larbi *et al.* (2007) (Figura 4-7) indicam que a espessura da junta de adesivo influencia no comportamento da ligação aço-concreto. Há diferença no comportamento da ligação pela simples mudança da espessura de 1,2 mm para 3 mm. Não houve grande mudança no valor da força máxima resistida, mas ocorreu mudança significativa na rigidez da ligação (coeficiente angular da reta), observada nas curvas de Tensão de cisalhamento vs Deslocamento. A ligação de 1,2 mm de espessura tem rigidez de cisalhamento maior, o que implica em uma restrição maior ao deslizamento relativo entre os materiais.

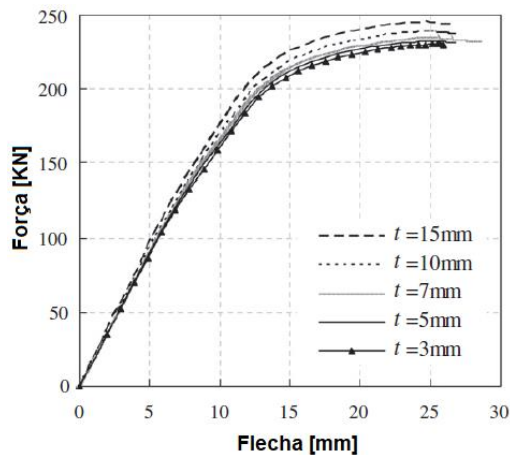
Figura 4-7: Tensão de cisalhamento vs. Deslocamento



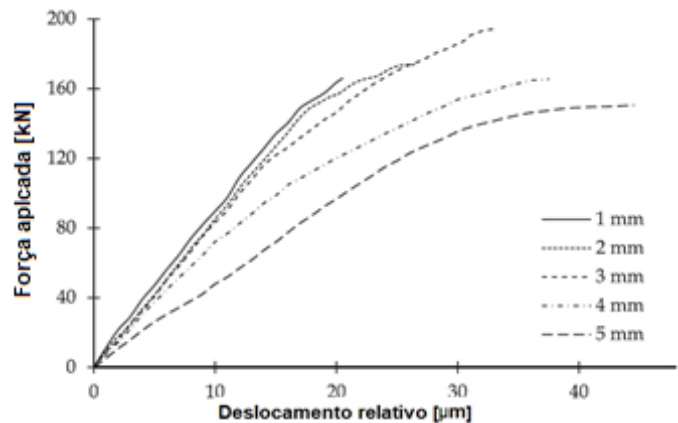
Fonte: adaptado de Si Larbi *et al.* (2007)

Estudos mais recentes realizados por Luo *et al.* (2012) e Kumar *et al.* (2018) avaliaram a influência da espessura da camada adesivada com experimentos físicos e modelos numéricos. Luo *et al.* (2012) realizaram estudos utilizando simulações numéricas para investigar o efeito da espessura no comportamento da ligação adesivada. Para isso, um modelo numérico dos resultados experimentais da viga mista P1, ensaiada por Bouazaoui *et al.* (2007), foi modelado, e as espessuras avaliadas variaram entre 3 e 15mm. Os resultados reproduzidos na Figura 4-8 mostram que a rigidez inicial é pouco influenciada pelo aumento da espessura, e que a força máxima aumenta ligeiramente.

Figura 4-8: Resultados da avaliação da variação da espessura do adesivo



a) Resultados de Luo *et al.* (2012)



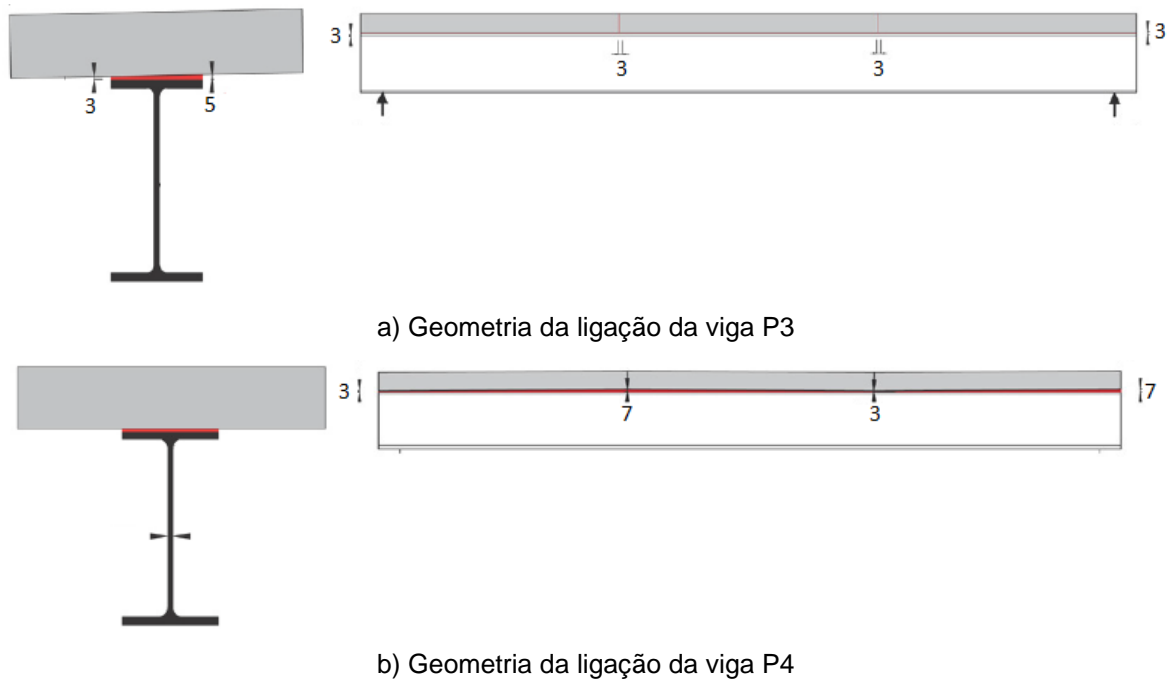
b) Resultados de Kumar *et al.* (2018)

Fontes: (a) LUO *et al.* (2012), (b) KUMAR *et al.* (2018)

Kumar *et al.* (2018) avaliaram, por meio de ensaios de cisalhamento direto, cinco espessuras de adesivo epóxi: 1, 2, 3, 4 e 5 mm. Foram ensaiados cinco modelos para cada espessura, totalizando vinte e cinco modelos ensaiados. Os resultados Força vs. Deslocamento relativo são mostrados na Figura 4-8b. O aumento da espessura de 1 mm para 2 e 3 mm gerou aumentos na capacidade resistente, aumento no deslocamento último e ligeira redução da rigidez da ligação. Aumentando a espessura para 4 e 5 mm, há redução da força máxima resistida pela interface, aumento do deslocamento e diminuição considerável da rigidez. Portanto, ligações com espessura maior que 3 mm não são recomendadas. É importante ressaltar que, do ponto de vista de força máxima, esses resultados contradizem os resultados de Luo *et al.* (2012), porém os estudos utilizaram metodologias diferentes para avaliar o comportamento e, portanto, são necessários estudos complementares para avaliar a influência da espessura do adesivo.

Bouazaoui *et al.* (2007), Berthet *et al.* (2011) e Corte *et al.* (2017) são alguns dos poucos estudos que avaliaram o efeito da uniformidade da junta adesivada no comportamento da ligação. Bouazaoui *et al.* (2007) variaram a espessura da ligação adesivada em diferentes posições das vigas mistas (Figura 4-9). Nesse estudo, a viga de referência (P1) tem espessura constante igual a 3 mm; a viga P3 teve espessura de 3 a 5 mm, variando na direção transversal; a viga P4, espessura de 3 a 7 mm, variando na direção longitudinal. A viga com variação da espessura na direção transversal (viga P3) apresentou pequeno aumento na resistência, cerca de 3% em relação à viga de referência. A viga com variação da espessura na direção longitudinal (viga P4) apresentou queda de 8% na resistência em relação à viga de referência. Entretanto, vale ressaltar que todas as vigas ultrapassaram o valor da resistência de cálculo e atenderam à resistência prevista.

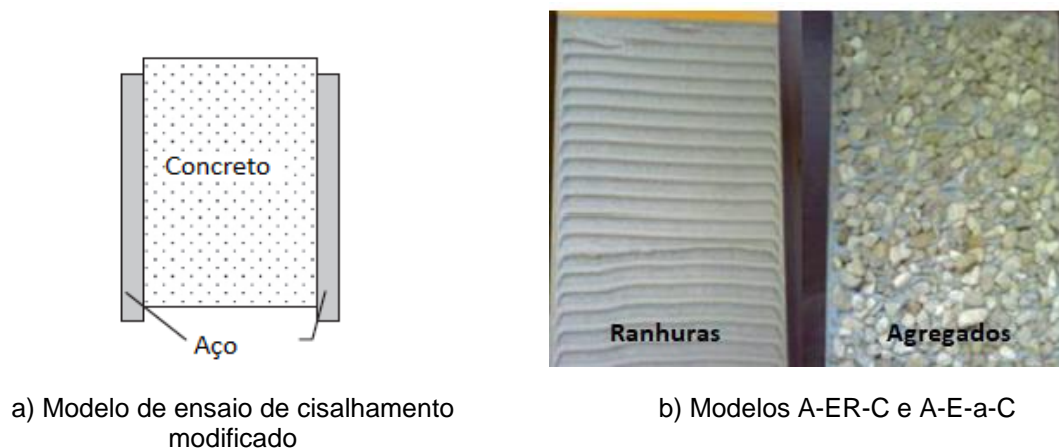
Figura 4-9: Geometria das vigas P3 e P4



Fonte: adaptada de Bouazaoui *et al.* (2007)

Diferentemente de Bouazaoui *et al.* (2007), Berthet *et al.* (2011) realizaram ensaios de cisalhamento direto com modelos constituídos de duas placas de aço e um bloco central de concreto (Figura 4-10a).

Figura 4-10: Ensaio de cisalhamento direto modificado e acabamento superficial



Fonte: adaptada de Berthet *et al.* (2011)

Cinco superfícies de contato foram investigadas: A-C (aço-concreto), conexão direta aço-concreto; A-E-a-C (aço-epóxi-agregado-concreto), agregados graúdos previamente colados com adesivo epóxi e concreto moldado sobre essa superfície; A-E-C (aço-epóxi-concreto), ligação com adesivo epóxi com 1 mm de espessura; A-ER-C (aço-epóxi com ranhuras-concreto), Figura 4-10b, resina epóxi com sulcos ou ranhuras; e A-E-a20-C (aço-

epóxi-agregado 20-concreto), semelhante ao modelo A-E-a-C, porém adesivo com 20 cm de comprimento, menor que o comprimento padrão dos demais modelos que foi de 28,5 cm. A Tabela 4-3 mostra o resultado obtido. Os modelos com ligação com adesivo epóxi (A-E-C e A-ER-C) apresentaram melhor desempenho, e aquele com epóxi e ranhuras foi o mais resistente.

Tabela 4-4: Resultados dos ensaios de cisalhamento direto de BERTHET *et al.* (2011)

	A-C	A-E-a-C	A-E-C	A-E-a20-C	A-ER-C
Força (kN)	70,6 ± 2,1	290,3 ± 6,2	435,3 ± 9,3	240,2 ± 7,4	459,5 ± 8,6
Tensão de cisalhamento (MPa)	0,8 ± 0,02	3,4 ± 0,07	5,09 ± 0,11	4,0 ± 0,09	5,4 ± 0,10

A-C: aço-concreto
A-E-a-C: aço-epóxi-agregado-concreto
A-E-C: aço-epóxi-concreto
A-E-a20-C: aço-epóxi-agregado 20-concreto
A-ER-C: aço-epóxi com ranhuras-aço

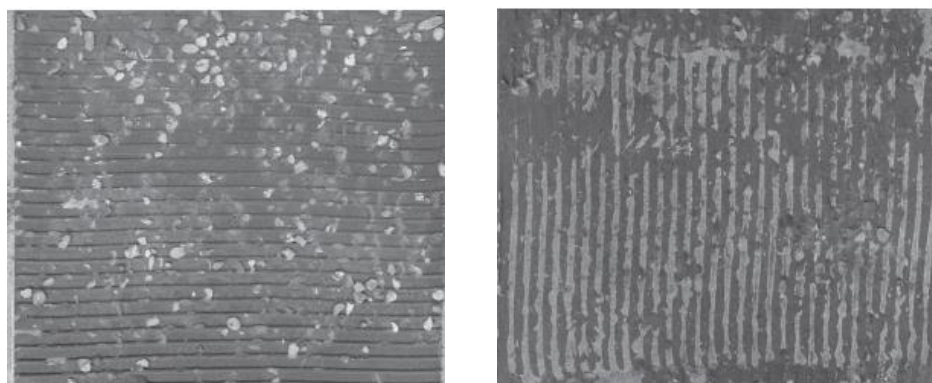
Fonte: Berthet *et al.* (2011)

Jurkiewicz *et al.* (2021) comprovaram que o uso de ranhuras aumenta a resistência ao cisalhamento da ligação. Porém esse aumento foi observado apenas nos ensaios de cisalhamento direto, sendo que nos ensaios de flexão de vigas mistas, as ranhuras não influenciaram a resistência da viga.

Os resultados mostram que juntas muito espessas aumentam a possibilidade de defeitos como regiões não curadas, tais como: poros, fissuras e concentrações de vazios (ALMEIDA, 2016), além de aumentar a chance de aplicação de forças não axiais (EBNESAJJAD, 2014). A espessura do adesivo afeta significativamente a resistência e o mecanismo de falha da ligação aço-concreto. O efeito da espessura é mais significativo quando o comprimento de colagem é relativamente pequeno, a espessura do substrato é grande e a natureza do adesivo é rígida.

Corte *et al.* (2017) investigaram influência da direção dos sulcos na capacidade resistente da ligação adesivada. Os adesivos foram aplicados com espátula dentada e os sulcos foram feitos, ora na direção vertical (direção da aplicação da carga), ora na direção horizontal (perpendicular à aplicação da carga). Feitos os sulcos (Figura 4-11), dois agregados diferentes foram colados no adesivo antes da concretagem. Para ambos os grupos, os modelos com sulcos na direção horizontal apresentaram maior resistência com aumentos de cerca entre 5,5% e 14,5%.

Figura 4-11: Sucos nas direções horizontal e vertical



a) Sucos na direção horizontal

b) Sucos na direção vertical

Fonte: Corte *et al.* (2017)

A Tabela 4-5 resume os estudos que investigaram a influência da espessura da ligação. Como há poucos estudos que avaliaram a espessura, não há consenso quanto à espessura mais indicada, e essa pode variar ainda de adesivo para adesivo.

Tabela 4-5: Síntese dos estudos que avaliaram a espessura da junta adesivada

		Cisalhamento direto								
Autor	Si Larbi <i>et al.</i> (2007)	Berthet <i>et al.</i> (2011)			Kumar <i>et al.</i> (2018)					
Espessura (mm)	1,2 3	1,0	1,0 (com ranhuras)	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0		
Tensão cisalhamento (MPa)	5,9 5,5	5,1	5,4	20,5	21,5	24,0	20,4	18,6		
Modo de falha	Coesiva no concreto	Coesiva no concreto		Adesiva	variável	Coesiva no adesivo				
Espessura mais eficiente (mm)	1,2	1,0 (com ranhuras)			3,0					
		Flexão em vigas mistas								
Autor	Bouzaoui <i>et al.</i> (2007)				Luo <i>et al.</i> (2012)					
Espessura (mm)	3	3 a 5 (transversal)		3 a 7 (longitudinal)	3	5	7	10	15	
Modo de falha	Adesiva*	Adesiva			(Modelagem numérica)					
Espessura mais eficiente (mm)		3 a 7			15					

*: Adesiva com falha coesiva no adesivo nas extremidades

Fonte: Autor (2021)

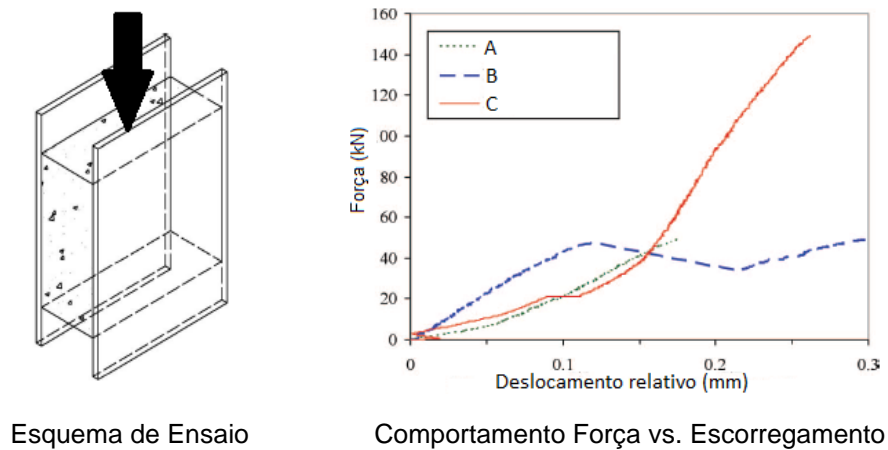
4.3.2 Resistência à compressão do concreto

Além da espessura, outro parâmetro que exerce influência na capacidade resistente da interface aço-concreto com adesivos epóxi é a resistência do concreto. Nesse contexto,

pesquisadores como Aboobucker *et al.* (2009), Jurkiewicz *et al.* (2011), Luo *et al.* (2012) e Jurkiewicz *et al.* (2021) investigaram a sua influência.

Aboobucker *et al.* (2009) realizaram ensaios de cisalhamento direto utilizando um modelo não convencional com um bloco central de concreto e duas chapas de laterais de aço (Figura 4-12a). Concretos com resistências de 33 MPa (A), 53 MPa (B) e 132 MPa (C) foram investigados, e os resultados são mostrados na Figura 4-12b. O concreto A possuía sílica ativa, agregados leves e superplastificantes. Quanto maior a resistência do concreto, maior a resistência ao cisalhamento da ligação; para o concreto mais resistente houve aumento de 200% em relação ao concreto com 33 MPa.

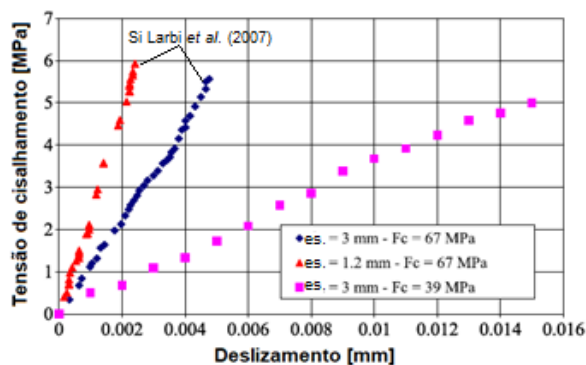
Figura 4-12: Esquema de ensaio de cisalhamento e resultados de ABOOBUCKER *et al.* (2009)



Fonte: adaptado de Aboobucker *et al.* (2009)

Na Figura 4-13, são comparados os resultados de Jurkiewicz *et al.* (2011) para concreto com 39 MPa e de Si Larbi *et al.* (2007) para concretos mais resistentes. Foi observada falha coesiva no bloco de concreto. Não houve redução significativa da tensão de cisalhamento, contudo, o deslocamento relativo foi bem maior nos exemplares com concretos menos resistentes.

Figura 4-13: Resultados de ensaios de cisalhamento direto de Jurkiewicz *et al.* (2011) e Si Larbi *et al.* (2007)

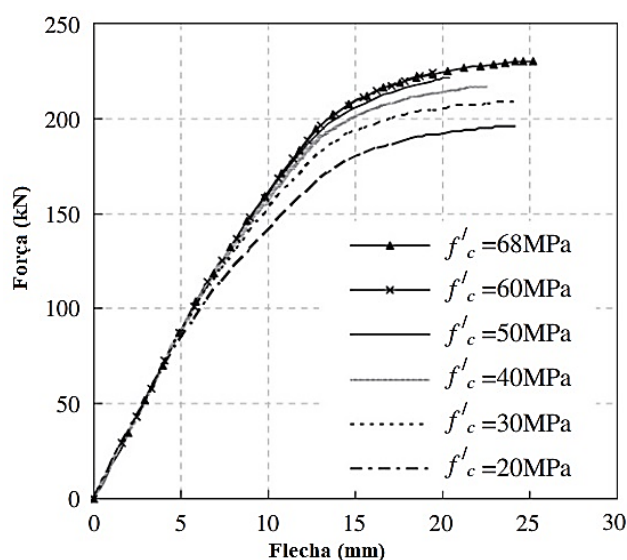


Fonte: adaptado de Jurkiewicz *et al.* (2011)

Jurkiewicz *et al.* (2011) realizaram ainda ensaios de flexão em duas vigas mistas com ligações adesivadas. O comportamento da viga mista adesivada confeccionada com concreto convencional foi semelhante ao de vigas mistas com conectores mecânicos.

Luo *et al.* (2012) avaliaram tal influência por meio de simulações numéricas de vigas mistas submetidas à flexão. Seis valores de resistência à compressão do concreto foram avaliados (20 a 68 MPa). Percebe-se (Figura 4-14) que o aumento da resistência do concreto levou a um aumento na capacidade resistente das vigas mistas.

Figura 4-14: Influência da resistência do concreto na força resistente de vigas mistas



Fonte: adaptado de Luo *et al.* (2012)

Jurkiewicz *et al.* (2021) realizaram ensaios de cisalhamento direto e de flexão em vigas mistas. No ensaio de cisalhamento direto, as resistências dos concretos foram de 31,6 MPa e 60,6 MPa. Houve aumento de cerca de 70% na resistência ao cisalhamento para a viga com concreto mais resistente. Importante ressaltar que o modelo com o concreto de alta resistência possuía área de ligação menor que o modelo com concreto de menor resistência. Já no caso do ensaio de flexão, para concretos com 37,1 MPa e 60,6 MPa de resistência, o aumento foi de apenas 4,8%. Segundo os autores, esse comportamento pode ser explicado pelo modo de falha dos modelos. No ensaio de cisalhamento direto, a falha ocorreu por cisalhamento, enquanto na viga mista, deu-se por esmagamento do concreto. Assim, do ponto de vista mecânico de curto prazo, o interesse em usar concreto de alto desempenho em vigas mistas adesivadas parece ser limitado.

A Tabela 4-6 traz um resumo dos estudos apresentados nesse item e principais variáveis analisadas.

Tabela 4-6: Síntese dos estudos que avaliaram a resistência à compressão do concreto

Autores	Tipo de ensaio	Resistência do concreto (MPa)	Resistência ao cisalhamento ou força última
Aboobucker et al. (2009)	Cisalhamento direto	A=33; B=53; C=132	A=49; B=49; C=149 (kN)
Jurkiewicz et al. (2011)	Cisalhamento direto	A=39; B=67	A= 5; B=5,5 (MPa)
Luo et al. (2012)	Simulação de viga mista	A=20; B=30; C=40; D=50; E=60; F=68	A=193; B=212; C=220; D=224; E=227; F=230* (kN)
Jurkiewicz et al. (2021)	Cisalhamento direto	A=31,6; B=60,6	A= 6 (MPa); B=10,2 (MPa)
	Flexão em viga mista	A=37,1; B=60,6	A=76,7 (kN) B= 80,4 (kN)

* Valores extraídos de gráficos

Fonte: Autor (2021)

Os resultados da literatura mostram que a resistência ao cisalhamento da interface adesivada aumenta com o aumento da resistência do concreto, contudo essa relação não é, necessariamente, linear. Ao aumentar a resistência do aderente, as microancoragens da ligação mecânica tornam-se mais resistentes e a falha por coesão do aderente e por adesão ocorrem para tensões mais elevadas.

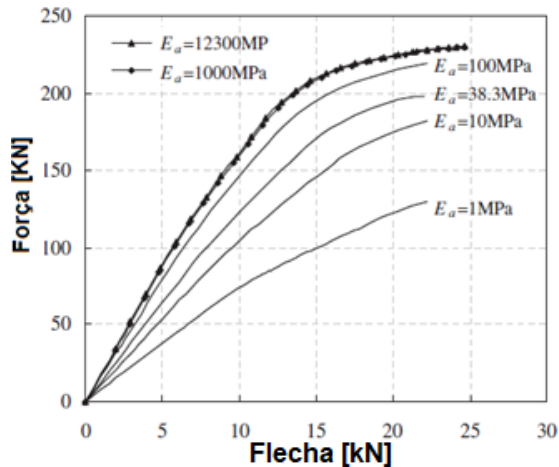
4.3.3 Módulo de elasticidade do adesivo

Poucos estudos avaliaram a influência do módulo de elasticidade do adesivo epóxi na ligação aço-concreto de vigas mistas. Luo *et al.* (2012) avaliaram essa influência por meio de simulações numéricas de vigas mistas no ensaio de flexão (Figura 4-15).

A variação do módulo de elasticidade do adesivo, de forma crescente, causa aumento da força máxima resistida pela viga mista. Entretanto, esse aumento é limitado e parece estagnar-se quando o módulo de elasticidade atinge o valor de 1000 MPa.

Na relação Força vs Flecha (Figura 4-16), é possível avaliar a influência do módulo de elasticidade do adesivo. Tal curva pode ser dividida três trechos: no trecho inicial ($0 < E_a < 1$ MPa), o efeito da ligação adesivada é muito pequeno, pois os deslocamentos relativos não são impedidos, e aço e concreto comportam-se de forma quase independente.

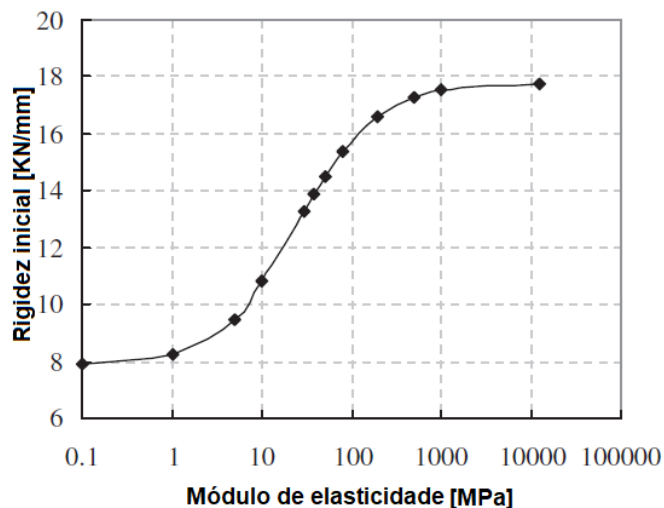
Figura 4-15: Influência do módulo de elasticidade do adesivo



Fonte: adaptado de Luo *et al.* (2012)

O comportamento da ligação aço-concreto, para adesivos com módulo de elasticidade dentro dessa faixa, é semelhante ao comportamento de uma viga de aço, ou seja, sem nenhum dispositivo de ligação aço-concreto para promover a transferência de forças. No segundo trecho ($1 \leq E_a \leq 1000$ MPa), há um aumento considerável na rigidez inicial devido ao aumento do módulo de elasticidade, pois a inclinação desse trecho é significativa. No terceiro trecho ($E_a > 1000$ MPa), a rigidez é pouco afetada pelo módulo de elasticidade do adesivo, e este reduz o deslocamento relativo de forma eficiente. Assim, os resultados mostram que o adesivo deve possuir módulo de elasticidade superior a 1000 MPa. Esse é um dos motivos da preferência por adesivos à base de epóxi em detrimento daqueles de poliuretano, tendo em conta que os primeiros geralmente possuem módulo de elasticidade muito maior e restringem o deslocamento relativo aço-concreto.

Figura 4-16: Relação entre rigidez inicial da ligação e módulo de elasticidade do adesivo



Fonte: adaptado de Luo *et al.* (2012)

Bhardwaj *et al.* (2021) realizaram simulação numérica de vigas mistas e avaliaram a influência de quatro valores de módulo de elasticidade do adesivo: 12300, 1230, 123 e 12,3 MPa. As forças últimas resistidas pelas vigas foram, respectivamente: 481, 461, 469, 398 kN. Notou-se que a tensão de cisalhamento aumenta com o aumento do módulo de elasticidade e que os adesivos com maiores módulos de elasticidade (12300 e 1230 MPa) fornecem grau de interação elevado, enquanto os adesivos com menor módulo de elasticidade (123 e 12,3 MPa) fornecem menor grau de interação e vigas mistas com comportamento inadequado.

A Tabela 4-7 sintetiza os valores de módulo de elasticidade de adesivos epóxi utilizados em ligações aço-concreto dos estudos aqui citados.

Tabela 4-7: Valor do módulo de elasticidade do adesivo epóxi em estudos variados

Autor	Módulo de elasticidade (MPa)
Si Larbi <i>et al.</i> (2007); Bouazaoui <i>et al.</i> (2007); Berthet <i>et al.</i> (2011); Jurkiewicz <i>et al.</i> (2011); Souici <i>et al.</i> (2013)	12300
Meaud <i>et al.</i> (2014); Jurkiewicz <i>et al.</i> (2014)	11760 ± 1374
Kumar <i>et al.</i> (2018)	7537,78

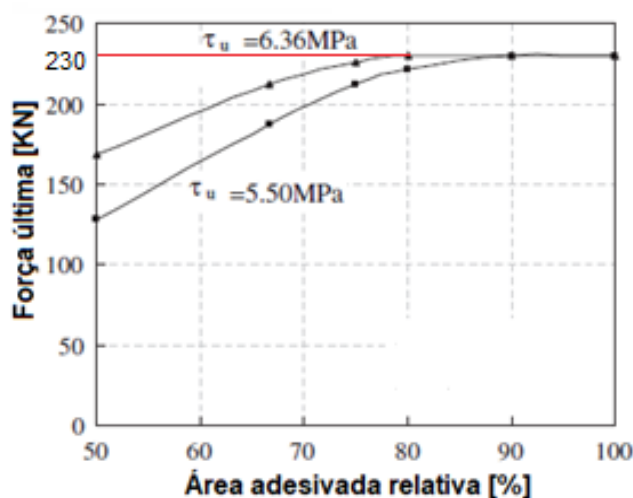
Fonte: Autor (2021)

4.3.4 Área da ligação adesivada

Na aplicação do adesivo para promover a ligação aço-concreto, sua alta fluidez combinada com imperfeições na superfície, bolhas de ar e erros de execução podem levar a uma conexão inadequada. Assim, a área efetiva de ligação é um fator importante para garantir a transferência de forças entre aço e concreto. Estudos da influência da área de ligação foram realizados para vigas mistas.

Luo *et al.* (2012) analisaram duas situações: adesivo aplicado em 50% e 100% da área total disponível. Para essa avaliação, os autores utilizaram a simulação numérica de vigas mistas em que o percentual da área adesivada ξ foi variado juntamente com a resistência ao cisalhamento da interface. A Figura 4-17 mostra a relação entre a força última resistida pela viga mista e o percentual de área adesivada ξ . Para a viga mista simulada, cuja resistência ao cisalhamento da interface foi de 6,36 MPa, uma área efetivamente colada superior a 80% resultou em uma ligação sem falhas (Figura 4-17). Entretanto, quando essa área é inferior a 80% da área possível, ocorre decréscimo da força resistida pela viga e falha devido à descolagem. Essa falha não diz respeito à resistência ao cisalhamento do adesivo, mas à resistência efetiva da ligação. Para outra viga mista, com 5,5 MPa de resistência ao cisalhamento da interface, o valor da área relativa crítica aumentou para 90%, sendo que um valor inferior de área poderia causar a falha da viga por descolagem antes que a força máxima possível de resistência da viga (230 kN) fosse atingida.

Figura 4-17: Relação entre força última resistida e área efetiva de ligação



Fonte: adaptada de Luo *et al.* (2012)

Meaud *et al.* (2014) também investigaram a influência da área de ligação, bem como a dimensão da laje conectada. A Tabela 4-8 resume o programa experimental juntamente com as medidas das lajes e da área de ligação. Para as lajes de 100 x 100 x 150 mm³, as resistências ao cisalhamento foram da mesma ordem de grandeza da resistência a tração do concreto, não variaram significativamente com o comprimento de colagem e diminuíram ligeiramente com o aumento da largura da superfície de colagem, mesmo quando a área total aumentou. Já no caso das lajes de 100 x 300 x 300 mm³, as resistências ao cisalhamento foram superiores à tração do concreto e aumentaram com o aumento do comprimento de colagem, logo, com o aumento da área colada. Como conclusão, as resistências ao cisalhamento aumentaram com o aumento do tamanho da laje e do comprimento de colagem.

Tabela 4-8: Resumo do programa experimental de Meaud *et al.* (2014)

Ensaio de cisalhamento direto	Dimensões das lajes (mm ³) esp. x comp. x alt	Área de ligação (mm ²)	Média da resistência ao cisalhamento (MPa)
PO1-100	100x100x150	2x100x100	2,0±0,5
PO1-300	100x300x300	2x100x100	6,8±0,2
PO2-100	100x100x150	2x100x130	1,8±0,4
PO2-300	100x300x300	2x100x130	7,6±0,1
PO3-100	100x100x150	2x50x100	2,6±0,7
PO3-300	100x300x300	2x100x180	9,1±0,9

Fonte: Meaud *et al.* (2014)

Poucos estudos avaliaram a influência da área adesivada na capacidade resistente da ligação aço-concreto. Entretanto, é importante ressaltar que a falha por descolagem está

ligada principalmente ao conceito de uma resistência média que é igual à razão da força total resistida pela área de ligação. Logo, uma área suficientemente grande distribui melhor as tensões de cisalhamento, reduzindo a tensão máxima média da interface.

4.4 TRATAMENTO SUPERFICIAL

O tratamento superficial é definido como a operação ou sequência de operações que inclui limpeza, remoção de materiais soltos ou modificação química de uma superfície à qual se deseja aplicar adesivos para ligações. Geralmente as superfícies metálicas são cobertas por camadas de óxidos, tornando-as fortemente polares e adequadas ao uso de adesivos (EBNESAJJAD e EBNESAJJAD, 2006). Entretanto, a remoção das camadas de óxido, seguida de abrasão e limpeza, pode melhorar as ligações em superfícies metálicas via adesivos (ALMEIDA, 2016). O tratamento superficial visa a aumentar a resistência da união entre os substratos e, principalmente, melhorar a durabilidade da junta colada, especialmente quando exposta a ambientes úmidos.

O tratamento superficial de metais, entre eles o aço, pode ser: desgorduramento, tratamento químico e abrasão. Remover todo vestígio de contaminação por óleos e graxas é extremamente importante para obter-se uma ligação adequada e, para isso, a superfície deve passar por uma etapa de desgorduramento. Muitos pesquisadores utilizaram solventes e primer para essa etapa (SI LARBI *et al.*, 2007; BOUZAOU *et al.* 2007; JURKIEWIEZ *et al.*, 2011; KUMAR *et al.*, 2016). Para obtenção de máxima resistência da ligação adesivada, muitas vezes é necessário um pré-tratamento químico que, além de ajudar na ligação, aumenta sua resistência à ação ambiental.

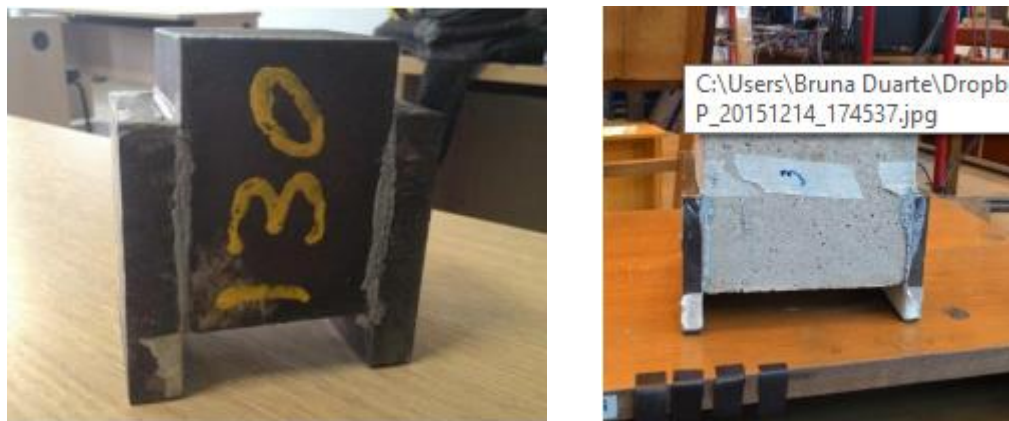
No geral, superfícies rugosas formam juntas adesivadas mais resistentes que as polidas devido ao aumento do coeficiente de atrito e travamentos mecânicos. Esse efeito é obtido por meio de abrasão. Após a abrasão, deve ocorrer a limpeza para remoção de partículas soltas. Em geral, basta o desgorduramento ou sua combinação com a abrasão e limpeza final. Os tratamentos superficiais prévios permitem remover ou impedir a formação de uma camada fraca na superfície do substrato, maximizar o grau de interações moleculares adesivo-substratos e otimizar as forças de adesão que se desenvolvem na interface (EBNESAJJAD e EBNESAJJAD, 2006).

Aboobucker *et al.* (2009) mostram que o simples jateamento de areia melhora a resistência ao cisalhamento da ligação aço-epóxi-concreto, pois aumenta a rugosidade superficial das superfícies em contato.

Almeida (2016) montou um programa experimental para avaliar especificadamente a influência do tratamento superficial na ligação adesivada. Foram confeccionados modelos de

cisalhamento direto do tipo aço-epóxi-aço e aço-epóxi-concreto (Figura 4-18), sendo a resistência ao cisalhamento do adesivo de 18 MPa.

Figura 4-18: Modelos de cisalhamento direto



a) Aço-epóxi-aço

b) Aço-epóxi-concreto

Fonte: Almeida (2016)

Seis modelos denominados como “série A”, passaram por um tratamento superficial mínimo do tipo limpeza-abrasão-limpeza, a saber, as superfícies do aço passaram por uma limpeza com uma escova, seguido por um processo de lixamento com uma lixa grão 50, finalizando com a utilização de um esmeril para aumentar a rugosidade superficial. Outros três tipos de modelos aço-epóxi-aço foram confeccionados. Os modelos B1 e B2 não passaram por nenhum tipo de tratamento superficial; os modelos B3 e B4 tiveram a superfície polida com lixa; e por fim, os modelos B5 e B6 passaram pelo mesmo tratamento superficial da série A, havendo, porém, contaminação por um produto de limpeza doméstico. Os valores médios dos resultados obtidos são mostrados na Tabela 4-9.

Tabela 4-9: Resultados obtidos por Almeida (2016)

Modelo	Tipo de tratamento superficial	Tensão de cisalhamento média (MPa)	Tipo de falha
MODELOS AÇO-EPÓXI-AÇO			
Série A (A1-A6)	Limpeza-abrasão-limpeza	23,58	Coesiva no adesivo
Série B (B1-B2)	Nenhum	10,47	Descolamento da camada de óxido e coesiva no adesivo
Série B (B3-B4)	Lixamento	5,91	Adesiva
Série B (B5-B6)	Limpeza-abrasão-limpeza + contaminante	8,44	Adesiva
MODELOS AÇO-EPÓXI-CONCRETO			
Série E (E1-E6)	Limpeza-abrasão-limpeza	6,28	Coesiva no concreto

Fonte: Almeida (2016)

Analisando os resultados apresentados, nota-se que o tratamento superficial melhorou bastante a resistência da ligação. Além disso, os modelos da Série A falharam de maneira coesiva, indicando que a adesão foi realizada com sucesso. Os resultados dos modelos B1 e B2 indicam a importância do tratamento superficial no aço, principalmente para remoção da camada superficial de óxido. Já os modelos B3 e B4 obtiveram resultados inferiores, pois tiveram a superfície polida pelo lixamento. Os modelos B5 e B6, aos quais foram adicionados o contaminante, mostraram que o produto impediu as interações aço-adesivo.

Em sequência, Almeida (2016) realizou ensaios em modelos aço-epóxi-concreto, sendo que as superfícies dos materiais passaram pelo mesmo tratamento da Série A (limpeza-abrasão-limpeza). Os resultados são apresentados também na Tabela 4-9. Nota-se que os resultados dos modelos aço-epóxi-concreto foram satisfatórios, pois a resistência ao cisalhamento dos modelos foi superior ao valor da resistência ao cisalhamento do concreto, que foi de 3,99 MPa (caracterizado pelo autor). O sucesso da ligação foi confirmado ainda pelo tipo de falha apresentado nos modelos, que foi coesiva no concreto, ou seja, a aderência aço-concreto obtida foi superior às interações do próprio concreto.

Na Tabela 4-10 são listados os tratamentos superficiais comumente utilizados

Tabela 4-10: Tratamentos superficiais

Autor	Tratamento para o concreto	Tratamento para o aço
Si Larbi <i>et al.</i> (2007)	Jateamento	Acetona Jateamento com óxido de alumínio + primer
Bouazaoui <i>et al.</i> (2007)	Jateamento + limpeza com solvente	Jateamento
Aboobucker <i>et al.</i> (2009)	-	Jateamento e Acetona
Jurkiewiez <i>et al.</i> (2011)	Jateamento	Jateamento + limpeza com acetona e primer
Luo <i>et al.</i> (2012)	Jateamento com óxido de alumínio + solvente de acetona	Jateamento
Souici <i>et al.</i> (2013)	Jateamento + limpeza com solvente	Jateamento + limpeza com solvente
Jurkiewiez <i>et al.</i> (2014)	Lixamento	Jateamento + limpeza com acetona e primer
Kumar <i>et al.</i> (2016)	Lixamento + limpeza com acetona	Lixamento + limpeza com acetona
Almeida <i>et al.</i> (2016)	Escovação + lixamento + esmeril	Escovação + lixamento + esmeril
Kumar <i>et al.</i> (2018)	Lixamento + acetona	Lixamento + acetona

Fonte: Autor (2021)

A partir desses estudos, não se pode dizer especificadamente qual o melhor tratamento superficial para a ligação aço-epóxi-concreto, entretanto, podem ser observados os tratamentos mais utilizados na literatura capazes de melhorar a resistência da ligação. No caso do concreto, é importante uma limpeza para retirada de uma camada superficial mais frágil, seguida por algum método de abrasão, como o jateamento. Para a superfície do aço, um tratamento deve ser empregado para a retirada da camada de oxidação superficial, óleos, graxas e contaminantes; seguido também de um tratamento para aumentar a rugosidade superficial que pode ser jateamento, esmerilização, ou ainda, lixamento com uma lixadeira mecânica.

4.5 COMENTÁRIOS FINAIS

Com base nos documentos citados neste capítulo, a ligação aço-concreto com adesivo epóxi tem se mostrado viável para uso em elementos mistos. Como o adesivo epóxi confere maior área de transferência e continuidade à ligação aço-concreto, esse método melhora a distribuição de tensões de cisalhamento, quando comparado às ligações com pinos com cabeça. Assim, o adesivo epóxi é adequado para ligações estruturais entre componentes de aço e concreto, contudo, há diversos aspectos como: espessura utilizada, tratamento superficial e influências das propriedades do concreto que precisam ser mais profundamente estudados com vistas a se conhecer a real influência dessas propriedades nas ligações aço-epóxi-concreto. Além disso, é importante conhecer previamente a resistência ao cisalhamento da ligação para um dimensionamento adequado dos elementos, levando-se em conta que essa resistência pode variar de acordo com o adesivo utilizado.

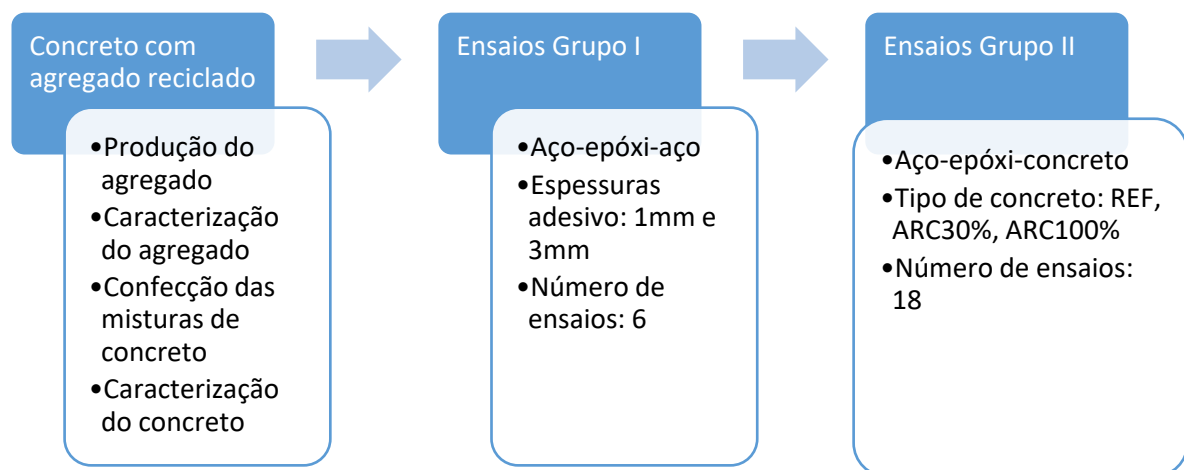
5 Programa experimental

5.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A análise experimental foi a principal metodologia empregada para investigar o comportamento da ligação adesivada aço-concreto com adesivo epóxi. Este capítulo está dividido em duas etapas principais: 1) caracterização dos materiais; 2) ensaios de cisalhamento direto no qual os parâmetros avaliados foram: tipo de concreto (agregados naturais ou agregados reciclados) e espessura da junta de adesivo.

Os ensaios de cisalhamento direto foram divididos em dois grupos que diferem entre si quanto aos materiais conectados, a saber: grupo 1 - ligação aço-epóxi-aço; grupo 2 - ligação aço-epóxi-concreto. Embora a ligação aço-epóxi-aço não seja o objetivo principal deste trabalho, tais ensaios foram utilizados para avaliar o comportamento e a resistência do adesivo epóxi, além de serem usados como forma de avaliar o conjunto de ensaios de cisalhamento direto dos modelos aço-epóxi-concreto. Também para calibração da velocidade dos ensaios do grupo 2. Em ambos os grupos foi avaliada a influência da espessura do adesivo e, para o grupo 2, também foi avaliado o uso de agregados de resíduos de concreto com a seguinte variação no teor de substituição dos agregados graúdos naturais por ARC: 0% (referência), 30% (substituição parcial) e 100% (substituição total). O fluxograma da Figura 5-1 mostra as principais etapas do programa experimental.

Figura 5-1: Etapas do programa experimental



A Tabela 5-1 resume o quantitativo de modelos ensaiados no programa experimental, bem como o número de ensaios e as respectivas variáveis analisadas.

Tabela 5-1: Quantitativo de modelos e ensaios de cisalhamento direto

Grupo I		Grupo II		
Aço-epóxi-aço		Aço-epóxi-concreto		
Espessura do adesivo (mm)		Concreto Convencional	Concreto com 30% ARC	Concreto com 100% ARC
1	3	3	3	3
3	3	3	3	3
Total	6	6	6	6

Fonte: Autor (2021)

Os itens a seguir explanam, de forma detalhada, cada uma das etapas do programa experimental.

5.2 OBTENÇÃO DOS AGREGADOS DE RESÍDUOS DE CONCRETO

Os agregados reciclados de concreto (ARC) foram produzidos a partir de corpos de prova descartados em alguns laboratórios da UFSCar. Os corpos de prova que eram constituídos de concretos convencionais de resistências diversas foram coletados no campus da universidade e passaram por um processo de britagem em um britador de mandíbulas (Figura 5-2) localizado no Laboratório de Cerâmica do Departamento de Engenharia de Materiais da UFSCar.

Figura 5-2: Britador de mandíbulas



a) Equipamento

b) Detalhe da mandíbula

Fonte: Autor (2021)

A abertura da mandíbula do britador não pode ser ajustada, impossibilitando a regulagem das dimensões dos agregados produzidos. Sendo assim, os agregados produzidos passaram por um processo de peneiramento no qual foram eliminados os agregados miúdos (passantes na peneira de 4,75 mm) e os agregados com dimensões maiores que 9,5 mm. A escolha dessa granulometria foi feita para coincidir com a faixa granulométrica dos agregados

naturais que foram utilizados. O processo de produção dos agregados de resíduo de concreto é apresentado na Figura 5-3, e resultados dos ensaios estão no item 6.1 e apêndice A.

Figura 5-3: Processo de produção do agregado de resíduo de concreto



Fonte: Autor (2021)

5.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Esta etapa tem como finalidade descrever os métodos empregados na caracterização dos materiais utilizados, incluindo a etapa de produção e caracterização do agregado de resíduo de concreto. Devido às limitações impostas pela pandemia do novo coronavírus, decretada pela OMS desde março/2020, e em vigor até a presente data (agosto/2021), não foi possível a caracterização das chapas de aço e dos adesivos à tração. Quanto à chapa de aço, os dados correspondentes à resistência ao escoamento e resistência à ruptura são irrelevantes uma vez que o tipo de ensaio realizado não gera tensões significativas nas chapas de aço. A resistência à tração do adesivo seria importante, contudo, por meio dos ensaios de cisalhamento direto aço-epóxi-aço, é possível avaliar a resistência ao cisalhamento desse material, fato esse de maior relevância para o presente trabalho.

Os concretos foram confeccionados utilizando cimento CP-V ARI (Cimento Portland de alta resistência inicial) doado pela empresa Lafarge Holcim. Foi realizado o ensaio de determinação da massa específica no Laboratório de Materiais e Componentes da UFSCar. O valor da massa específica, determinado experimentalmente, foi de 3,16 g/cm³.

5.3.1 Agregados do concreto

Neste trabalho foram utilizados areia como agregado miúdo e brita natural e ARC como agregados graúdos. Os ensaios de caracterização desses agregados estão listados na Tabela 5-2, juntamente com as respectivas normas.

Tabela 5-2: Ensaio de caracterização dos agregados miúdos e graúdos

Propriedade	Agregado		
	Miúdo	Graúdo natural	ARC
Determinação da composição granulométrica	ABNT NBR NM 248 (2003)	ABNT NBR NM 248 (2003)	ABNT NBR NM 248 (2003)
Determinação da massa específica	ABNT NBR NM 52 (2009)	ABNT NBR NM 53 (2009)	ABNT NBR NM 53 (2009)
Determinação da massa unitária	ABNT NBR NM 45 (2006)	ABNT NBR NM 45 (2006)	ABNT NBR NM 45 (2006)
Determinação da absorção de água	ABNT NBR NM 30 (2001)	ABNT NBR NM 53 (2009)	ABNT NBR NM 53 (2009)
Determinação do tempo de absorção	-	-	Método utilizado por Leite (2001)

Fonte: Autor (2021)

Para determinação da granulometria da areia, as amostras foram recolhidas de acordo com a metodologia de coleta e redução das normas NM 26 (2001) e NM 27 (2009), respectivamente. As amostras foram colocadas sobre o conjunto de peneiras da série normal, e o ensaio de granulometria seguiu os processos estabelecidos pela ABNT NBR NM 248 (2003).

Os ensaios de massa unitária foram realizados segundo a metodologia prevista pela ABNT NBR NM 45 (2006). A massa específica e a determinação da absorção de água seguiram os métodos e equações apresentados pela ABNT NBR NM 53 (2009).

Na Figura 5-4, é possível visualizar as faixas granulométricas dos agregados graúdos naturais e de resíduos de concreto.

Figura 5-4: Faixas granulométricas dos agregados graúdos



Fonte: Autor (2021)

No caso do ARC, uma curva, que relaciona a absorção de água ao longo do tempo de imersão, foi obtida usando o procedimento apresentado por Leite (2001). Os resultados dos ensaios de caracterização do agregado graúdo natural e do ARC são apresentados no item 6.1 e no apêndice A.

5.3.2 Aço e adesivo epóxi

Como citado anteriormente, devido às dificuldades impostas pela pandemia do novo coronavírus, não foi possível realizar os ensaios de caracterização do aço e do adesivo epóxi. O aço utilizado foi do tipo ASTM A36. Exemplos das chapas utilizadas são mostrados na Figura 5-5a. Já em relação ao adesivo, foi utilizado o adesivo epóxi Hardinc EP 131 (Figura 5-5b). Algumas características do adesivo foram fornecidas pelo fabricante. As características foram: módulo de elasticidade (E), resistência à compressão e resistência à flexão do adesivo. Esses valores são apresentados no item 6.1.

Figura 5-5: Chapas de aço ASTM A36 e adesivo Hardinc EP 131



a) Chapas de aço A36

b) Adesivo epóxi Hardinc EP 131

Fonte: Autor

5.3.3 Produção e caracterização do concreto

Foi adotado para o concreto de referência, um traço com resistência alvo de 40 MPa, desenvolvido por Pereira (2017) e utilizado por Gerin (2020). Além da resistência à compressão, esse traço foi adotado devido à sua trabalhabilidade, pois o concreto com ARC tende a apresentar menores valores de trabalhabilidade que o concreto convencional. Pereira (2017) e Gerin (2020) obtiveram, respectivamente, abatimentos de 22cm e 23,5cm nos ensaios de tronco de cone; para o concreto com 100% de ARC, o abatimento registrado por Gerin (2020) foi de 21 cm.

Foram confeccionadas diversas misturas sendo, uma mistura de referência apenas com agregados naturais (CREF) e duas com substituição do agregado graúdo natural por agregado de resíduos de concreto (CARC30 e CARC100). As dosagens, em massa, para as diversas misturas são apresentadas na Tabela 5-3.

Tabela 5-3: Misturas de concreto

	CREF	CARC30	CARC100
Teor de substituição	0%	30%	100%
Cimento	1	1	1
Areia	2,42	2,42	2,42
Agregado graúdo natural	2,58	1,81	-
ARC	-	0,68	2,26
Relação a/c	0,68	0,68	0,68
Consumo de cimento (kg/m³)	351,7	351,7	351,7

CREF: concreto apenas com agregados naturais

CARC30: concreto com 30% de agregados de resíduos de concreto

CARC100: concreto confeccionado exclusivamente com agregados graúdos de resíduos de concreto

Fonte: Autor (2021)

Os traços para os concretos com ARC foram obtidos a partir do traço de referência, substituindo-se o agregado natural por ARC. Utilizou-se a mesma metodologia empregada por Leite (2001) e Gerin (2020). Ambas fizeram a correção das quantidades de material, utilizando as massas específicas aparentes. Isso foi feito porque a diferença entre as massas específicas aparentes dos agregados reciclados e naturais poderia resultar em maior volume de agregado reciclado, o que demandaria uma quantidade maior de água na mistura.

A exemplo de GERIN (2020), no presente trabalho também não foi utilizado nenhum procedimento de pré-molhagem ou compensação de água para os concretos com agregados de resíduos. Esse procedimento pode ser usado para melhorar a trabalhabilidade do concreto com ARC, porém tem como consequência a redução da resistência do concreto devido ao aumento do fator água/cimento na mistura. O traço adotado no presente estudo foi utilizado por Gerin (2020) sem grande perda na trabalhabilidade do concreto com ARC, dispensando a pré-molhagem.

Os materiais foram misturados em uma betoneira com capacidade de 120 litros, adotando-se o método de mistura *T SMA*, ou mistura em etapas (Figura 5-6). Primeiramente foram misturados os agregados graúdos e miúdos por um período de 1 minuto, depois, adicionado 50% da água e misturados por mais 1 minuto. Em seguida, o cimento foi adicionado e, por último, após 30 segundos de mistura, o restante da água. Para finalizar o processo, os componentes foram misturados por 2 minutos.

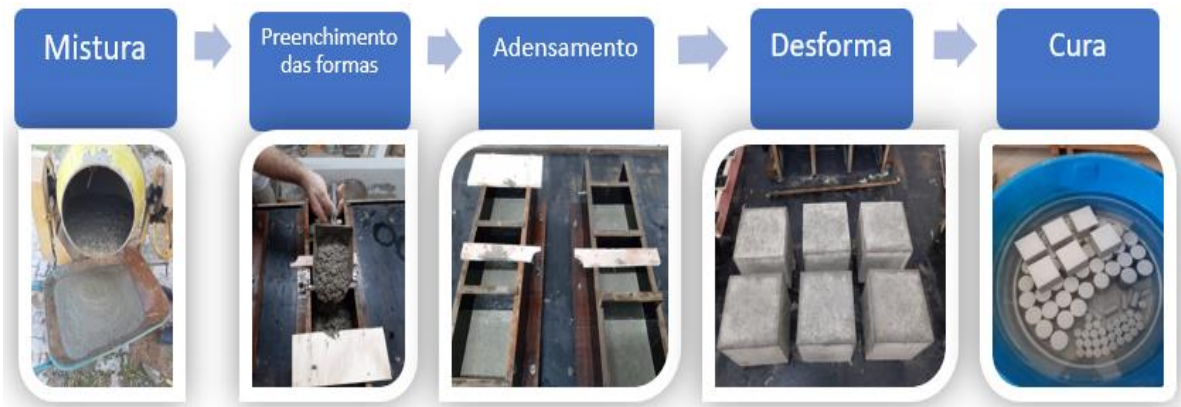
Figura 5-6: Método de mistura TSMA



Fonte: Adaptada de Tam e Tam (2005)

O adensamento do concreto foi feito utilizando-se uma mesa vibratória. A etapa de desforma foi realizada 24 horas após a moldagem, e os corpos de prova foram moldados e curados de acordo com a norma ABNT NBR 5738 (2015), sendo armazenados em tanques com solução saturada de hidróxido de cálcio até o momento dos ensaios. A Figura 5-7 resume as etapas de produção e cura do concreto.

Figura 5-7: Etapas de produção e cura do concreto



Fonte: Autor (2021)

Para caracterização do concreto no estado fresco, foram realizados ensaios de abatimento do tronco de cone (ABNT NBR NM 67,1998). No estado endurecido, os concretos foram caracterizados quanto às propriedades e respectivas normas técnicas listadas na Tabela 5-4.

Tabela 5-4: Ensaios de caracterização do concreto no estado endurecido

Traço do concreto	CREF		CARC30		CARC100		Normas
Idade do concreto	7	28	7	28	7	28	
Compressão axial	x	x	x	x	x	x	ABNT NBR 5739:2018
Módulo de elasticidade		x		x		x	ABNT NBR 8522:2017
Tração por compressão diametral		x		x		x	ABNT NBR 7222:2011
Absorção de água, índice de vazios e massa específica		x		x		x	ABNT NBR 9778:2005

Fonte: Autor (2021)

Os ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade foram realizados em uma máquina de ensaios com capacidade nominal de 600 kN, localizada no laboratório de Sistemas Estruturais (LSE) da UFSCar.

Para o ensaio do módulo de elasticidade, foi utilizada a metodologia “A” da norma ABNT NBR 8522 (2017) e, com ela, foi determinado o módulo de elasticidade inicial (E_{ci}). Em sequência, a partir do módulo de elasticidade inicial, foram calculados os valores do módulo de elasticidade secante (E_{cs}) de acordo com a formulação apresentada pela NBR 6118 (2014). Além disso, com esses ensaios foram obtidos também o valor de resistência à compressão (f_c). Para o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, seguiu-se o procedimento presente na norma ABNT NBR 7222 (2011). A Figura 5-8 mostra os ensaios realizados para caracterização do concreto.

Figura 5-8: Ensaios de caracterização do concreto



Fonte: Autor (2021)

Para os ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica (Figura 5-9), foi utilizada a metodologia prevista pela norma ABNT NBR 9778 (2005). Para esses ensaios, foram medidas as massas dos corpos de prova em condição seca, saturada e imersa em água. Os resultados da caracterização do concreto fresco e endurecido são apresentados no item 6.1.

Figura 5-9: Ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica



a) Condição seca

b) Condição saturada

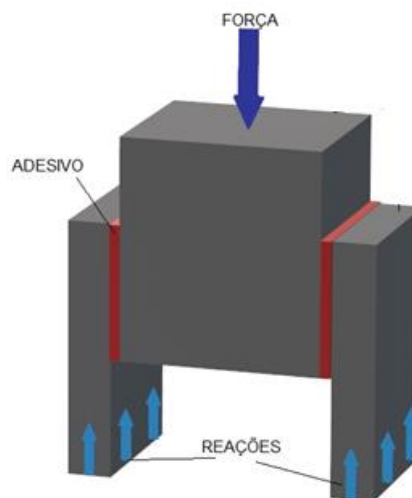
c) Imerso em água

Fonte: Autor (2021)

5.4 ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO

No presente estudo, foram utilizados ensaios de cisalhamento direto para avaliar a transferência de forças em ligações adesivadas com adesivo epóxi. Para tanto, foram utilizados modelos divididos em dois grupos. No grupo 1, uma chapa central de aço foi conectada a duas chapas laterais, também de aço. No grupo 2, um cubo central de concreto foi conectado a duas chapas laterais de aço. Em ambos, foi aplicada força vertical no cubo central (Figura 5-10).

Figura 5-10: Esquema do ensaio de cisalhamento direto

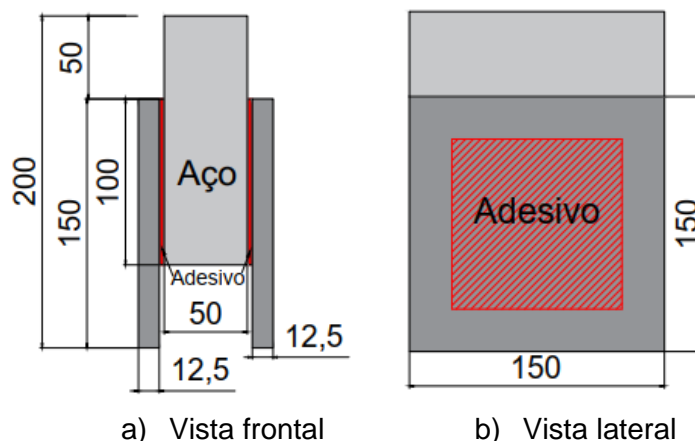


Fonte: Autor (202)

5.4.1 Produção dos modelos do Grupo 1: aço-epóxi-aço

Como já dito anteriormente, os modelos do Grupo 1 (Figura 5-11) são formados por três componentes de aço: duas chapas laterais quadradas com 15cm de lado e espessura de 12,5mm e uma chapa central de 15cm de lado e espessura de 50mm.

Figura 5-11: Geometria dos modelos do Grupo 1: aço-epóxi-aço. Unidade: mm



Fonte: Autor (2021)

A confecção desses modelos consistiu na composição das chapas centrais, tratamento superficial, colagem e cura do adesivo. As chapas centrais foram obtidas a partir da soldagem de chapas com espessuras menores (Figura 5-12), realizada pela empresa Alvo Estruturas Metálicas Ltda.

Todas as chapas são de aço ASTM A36 e foram doadas pelas empresas Construção Construção Civil e Metálica Ltda, localizada em São Carlos, e pela SEC2 – Estruturas metálicas, com sede em Ribeirão Preto.

Figura 5-12: Chapas de aço



a) Chapas laterais

b) Chapas centrais

Fonte: Autor (2021)

As chapas de aço passaram por um tratamento superficial de limpeza-abrasão-limpeza (Figura 5-13). Primeiramente, as chapas foram lixadas com um disco de grão 80 (Figura 5-13d) para eliminar todo tipo de oxidação na superfície; em seguida, para aumentar a rugosidade superficial, foi feito um lixamento para abrasão utilizando disco de desbaste para metal Ref.741423-B (Figura 5-13e). Por fim, antes da colagem, um compressor de ar foi usado para remover quaisquer partículas de poeira ou resíduo.

Figura 5-13: Processo de tratamento superficial das chapas



a) Configuração inicial

b) Após lixamento com lixa grão 80

c) Configuração final (após lixamento com disco e de desbaste)



d) Disco grão 80

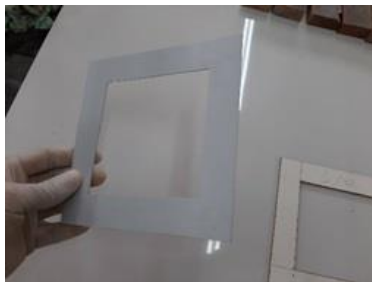


e) Disco de desbaste para metal Ref.741423-B

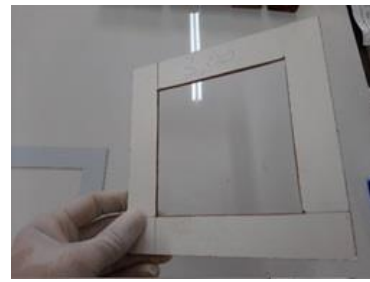
Fonte: Autor

A última etapa foi a fixação das chapas com o adesivo epóxi. Para assegurar as espessuras de colagem, foi utilizado um molde de poliestireno de $1 \pm 0,1$ mm de espessura e outro de MDF com espessura de $3 \pm 0,1$ mm. Os moldes foram posicionados sobre as chapas onde era aplicado a resina que era modelada com o uso de uma espátula (Figura 5-14).

Figura 5-14: Processo de aplicação do adesivo epóxi



a) Molde de poliestireno, 1mm



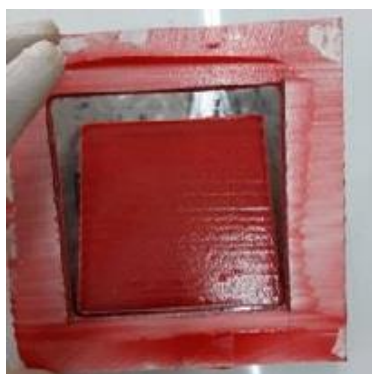
b) Molde de MDF, 3mm



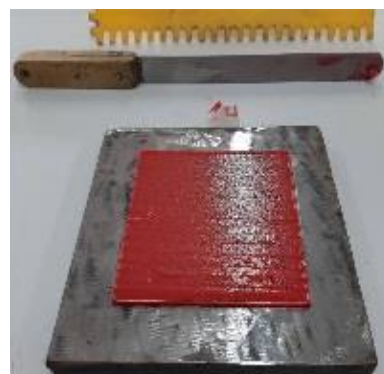
c) Adesivo sobre a superfície de aço



d) Espalhamento do adesivo



e) Adesivo aplicado e regularizado



f) Peça pronta para a ligação

Fonte: Autor (2021)

Foram aplicados adesivos com espessuras de 1 mm e 3 mm. A Figura 5-15 mostra um exemplo de um dos modelos do Grupo 1: aço-epóxi-aço.

Figura 5-15: Modelo aço-epóxi-aço finalizado

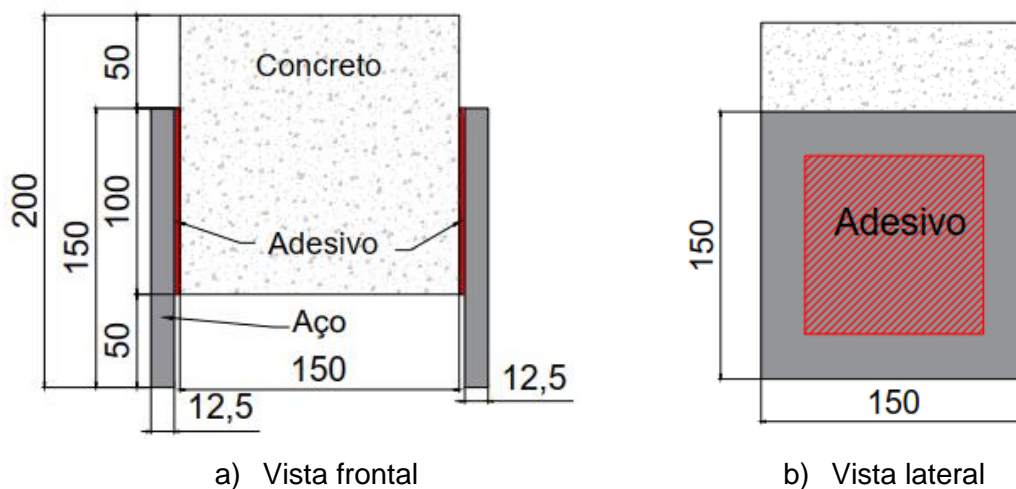


Fonte: Autor (2021)

5.4.2 Produção dos modelos do grupo II - aço-epóxi-concreto

Os modelos desse grupo são formados por duas chapas laterais quadradas com 15cm de lado e espessura de 12,5mm e um bloco central de concreto cúbico de 15 cm de lado. A geometria dos modelos do grupo 2 é apresentada na Figura 5-16. Ao todo foram ensaiados 18 modelos, sendo 3 para cada variável. A área colada total foi a mesma empregada no Grupo 1, ou seja, de 20000 mm², e foram avaliadas duas espessuras de adesivo, 1 mm e 3 mm, concomitantemente com a variação do teor de substituição do agregado natural por ARC. Os teores investigados foram 0% (REF), 30% e 100%.

Figura 5-16: Geometria dos modelos do Grupo 2: aço-epóxi-concreto. Unidade: mm



Fonte: Autor (2021)

As etapas de produção dos modelos aço-epóxi-concreto foram: organização das chapas de aço, concretagem do bloco central de concreto, tratamento superficial do aço e do concreto, colagem e cura do adesivo.

Nesses modelos, foram utilizadas as mesmas chapas de aço dos modelos aço-epóxi-aço (item 5.4.1); também foi utilizado o mesmo tratamento superficial já descrito. O tratamento superficial do cubo central de concreto consistiu em lixamento superficial com um disco de Vídea (Figura 5-17a). O aspecto final do cubo de concreto é mostrado na Figura 5-17 (b e c).

Figura 5-17: Tratamento superficial do cubo de concreto



a) Disco de Vídea

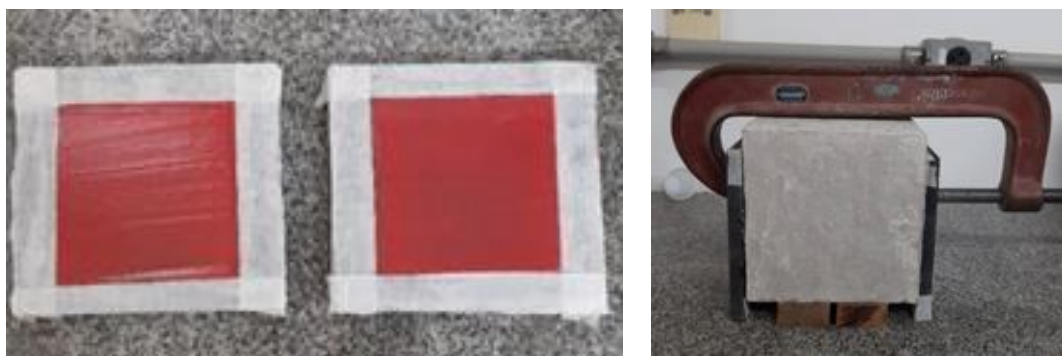
b) Configuração inicial

c) Após tratamento superficial

Fonte: Autor (2021)

A etapa de colagem foi realizada de forma semelhante aos modelos aço-epóxi-aço, porém com algumas alterações. No momento fixação dos modelos de aço, percebeu-se que ao pressionar uma chapa contra a outra, parte do adesivo escoava causando variação na espessura e na área de colagem. Assim, durante a colagem, a área de contato foi delimitada por uma fita adesiva; além disso, foi aplicada uma pequena pressão visando a garantir a área de contato, alterando minimamente a espessura adesivada (Figura 5-18a). Para fixação das partes, foi utilizado um grampo metálico (Figura 5-18b).

Figura 5-18: Detalhe da colagem dos modelos aço-epóxi-concreto



a) Detalhe da fita adesiva

b) Fixação do modelo

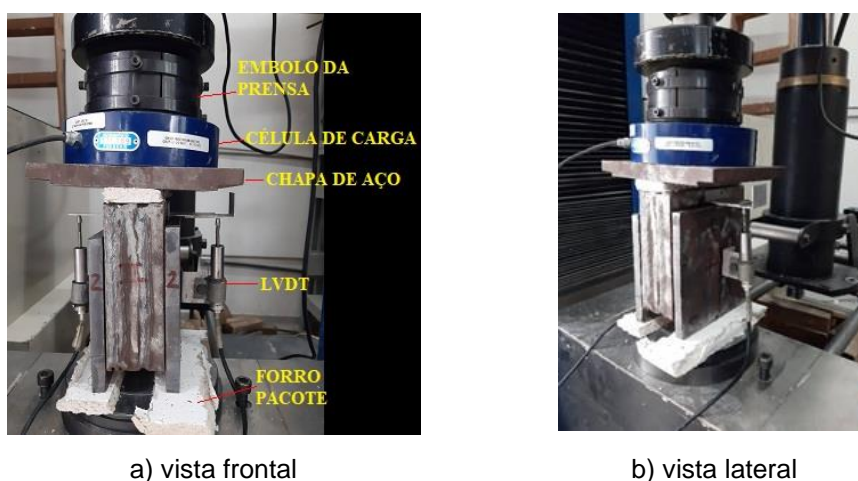
Fonte: Autor (2021)

5.4.3 Ensaio da ligação aço-epóxi-aço (grupo I)

O intuito de ensaiar a ligação aço-epóxi-aço é avaliar o comportamento e resistência do adesivo, já que nesse ensaio, a falha será adesiva ou coesiva no adesivo. Para realização desse ensaio, foram utilizadas três chapas de aço ligadas entre si por adesivo epóxi. As chapas tiveram dimensões tais para evitar a flexão. Foi aplicada uma força vertical centrada na chapa central, e registrado o deslocamento relativo entre os componentes de aço. Foi utilizada uma máquina de ensaios EMIC modelo GR044 com capacidade de 600kN.

Nesses ensaios, foram medidos, simultaneamente, a força aplicada com o uso de célula de carga de 20 toneladas-força e o deslocamento relativo aço-aço por meio de transdutores de deslocamento LVDT com curso de 25mm. Tais transdutores foram fixados em cada lateral do modelo (Figura 5-19) e permitiram a construção de curvas Força vs. Deslocamento relativo. Para facilitar a aplicação da força centrada no modelo, foram utilizados uma chapa de aço e pedaços de material de acomodação. Os resultados dos ensaios dos exemplares do grupo I são apresentados no item 6.2.

Figura 5-19: Ensaio de cisalhamento direto aço-epóxi-aço



Fonte: Autor (2021)

5.4.4 Ensaio da ligação aço-epóxi-concreto (grupo II)

Esse ensaio visa o estudo da ligação aço-epóxi-concreto. Esse conjunto de ensaios é semelhante ao realizado nos modelos aço-epóxi-aço, porém a chapa central de aço foi substituída por um bloco de concreto. Foi realizada uma etapa inicial de escorvamento antes da realização do ensaio propriamente dito. O escorvamento consistiu na aplicação de uma força inicial de aproximadamente 20 kN, verificando-se o comportamento do modelo e o funcionamento dos equipamentos de medição.

Nesse grupo de ensaios, além da variação da espessura do adesivo, também foi avaliado como o concreto com agregado de resíduo de concreto interfere no comportamento da ligação aço-concreto. Nesses ensaios, foram medidas as mesmas grandezas dos ensaios

da interface aço-epóxi-aço: força aplicada e deslocamento relativo e construídas curvas Força vs. Deslocamento relativo. Os resultados desse grupo de ensaios são apresentados no item 6.3.

Figura 5-20: Ensaio de cisalhamento direto aço-epóxi-concreto



Fonte: Autor (2021)

Descrita a metodologia empregada neste trabalho, o capítulo a seguir trata dos resultados do programa experimental e a análise deles.

6 Análise de resultados do programa experimental

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados do programa experimental. Os resultados foram divididos em: caracterização dos materiais empregados, ensaios de cisalhamento direto aço-epóxi-aço e ensaios de cisalhamento direto aço-epóxi-concreto.

6.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS E COMPONENTES

A Tabela 6-1 apresenta os principais resultados da caracterização dos agregados. Os ensaios de caracterização da areia e dos agregados graúdos foram realizados no Laboratório de Materiais e Componentes (LMC) da Universidade Federal de São Carlos.

Tabela 6-1: Características dos agregados

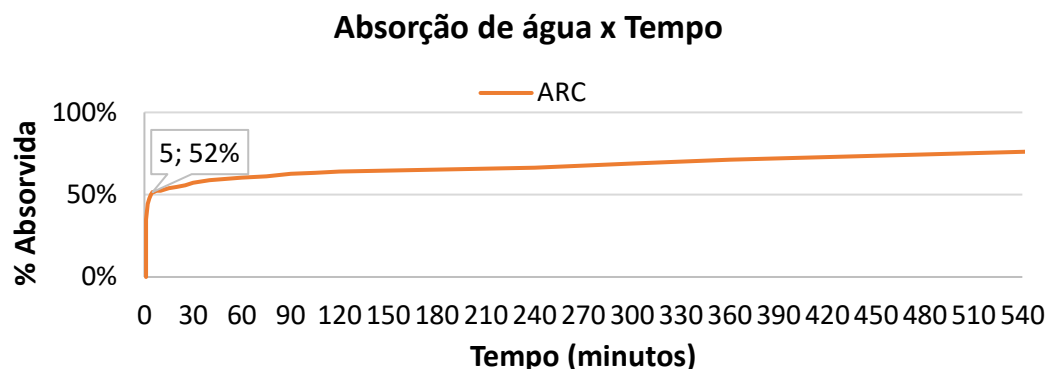
Característica	Agregado miúdo (areia)	Agregado natural graúdo	Agregado de resíduo de concreto
Dimensão máxima (mm)	2,4	9,5	9,5
Módulo de finura	1,93	2,11	1,94
Massa específica (g/cm³)	2,57	2,97	2,78
Massa específica aparente (g/cm³)		2,65	2,32
Massa unitária de material no estado solto (g/cm³)	1,59	1,61	1,26
Massa unitária material compactado (g/cm³)	1,72	1,64	1,31
Absorção de água (%)	0,25	3,97	7,27

Fonte: Autor (2021)

Mais detalhes sobre a caracterização dos agregados, como a granulometria e curvas granulométricas, são apresentadas no Apêndice A.

Na Figura 6-1, é apresentada a absorção de água ao longo do tempo, ensaio realizado apenas para o agregado de resíduo de concreto. Pode-se observar que, nos primeiros 5 minutos, o agregado absorveu uma quantidade de água equivalente a mais de 50% de sua capacidade de absorção.

Figura 6-1: Resultado do ensaio de absorção de água ao longo do tempo (ARC)



Fonte: Autor (2021)

A Tabela 6-2 apresenta as características do adesivo epóxi utilizado neste trabalho. Os valores apresentados foram fornecidos pelo fabricante do adesivo.

Tabela 6-2: Propriedades nominais do adesivo epóxi

Propriedade	Valor
Resistência à compressão	120 (MPa)
Resistência à flexão	42 (MPa)
Módulo de elasticidade	10,8 (GPa)

Fonte: HARD Indústria e Comercio LTDA

A Tabela 6-3 apresenta os resultados dos ensaios de abatimento de tronco de cone do concreto fresco e os índices físicos dos concretos endurecidos utilizados nos ensaios de cisalhamento direto.

Tabela 6-3: Valores médios de índices físicos do concreto

Tipo de concreto	CREF	CARC30	CARC100
Abatimento (cm)	23	21 (-8,7%)	10,5 (-54,3%)
Absorção de água do concreto (%)	6,59	6,53 (-0,9%)	7,21 (+9,4%)
Índice de vazios (%)	14,8	14,47 (-2,2%)	15,31 (+3,4%)
Massa específica (g/cm ³)	2,64	2,59 (-1,9%)	2,51 (-4,9%)

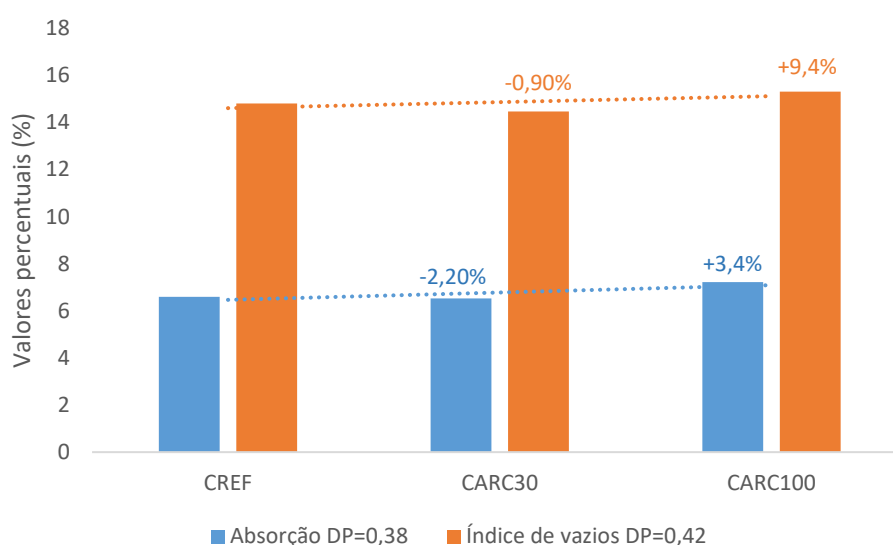
Fonte: Autor (2021)

Os resultados apresentados na Tabela 6-3 mostram que a maior absorção de água do ARC influenciou bastante a trabalhabilidade do concreto fresco. Foram observadas reduções de 8,7% e 54,3%, respectivamente, para teores de substituição de 30% e 100% em relação ao concreto de referência. A pré-molhagem do ARC poderia aumentar a trabalhabilidade do concreto, contudo esse procedimento não foi adotado neste trabalho. Houve redução pouco

expressiva na massa específica; redução de 4,9% para substituição total do agregado graúdo por ARC (Tabela 6-3).

Na Figura 6-2, pode-se comparar os valores de absorção de água e índice de vazios do concreto. De maneira geral, para ambas as propriedades, o concreto com 30% de substituição de ARC manteve-se semelhante ao concreto de referência. Para o concreto com 100% de substituição de ARC, houve aumento de cerca de 9,4% para a absorção de água e 3,4% para o índice de vazios. Os valores de desvio padrão também são indicados na Figura 6-2.

Figura 6-2: Absorção de água e índice de vazios do concreto



Fonte: Autor (2021)

O uso de ARC aumentou a resistência à compressão do concreto (Tabela 6-4). Como o ARC absorve mais água que o agregado natural, menos água fica disponível para a hidratação do cimento, reduzindo a relação água/cimento do concreto. O aumento observado foi de 11,8% para o CARC30 e de 9,3% para o CARC100 (Tabela 6-4).

Tabela 6-4: Propriedades mecânicas médias das misturas de concreto

Propriedade	CREF	CARC-30	CARC-100
Resistencia à compressão uniaxial aos 7 dias (MPa)	28,81 (± 0,58)	31,12 (± 1,22)	31,4 (± 1,22)
Resistencia à compressão uniaxial aos 28 dias (MPa)	35,84 (± 0,32)	40,08 (± 1,27)	39,19 (± 0,14)
Resistencia à tração por compressão diametral aos 28 dias (MPa)	3,55 (± 0,23)	3,62 (± 0,15)	3,15 (± 0,49)
Módulo de elasticidade (GPa)	32,74 (± 1,35)	30,79 (± 0,53)	27,97 (± 0,51)

Fonte: Autor (2021)

Os resultados das resistências à compressão aos 28 dias foram submetidos à análise de variância (ANOVA) de fator único seguido do teste de Tukey. A ANOVA serve para identificar se existe diferença estatística significativa entre a média dos grupos estudados, e o teste de Tukey aponta entre quais grupos há essa diferença. A análise apontou, com nível de certeza de 95%, que há diferenças significativas dos valores médios de resistência à compressão entre os grupos CREF e CARC30, e CREF e CARC100.

Em relação aos resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral das misturas de concreto, os valores foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA) de fator único que apontou, com nível de certeza de 95%, não haver diferença significativa entre os resultados de resistência à tração dos concretos. Em termos percentuais, foi observado aumento de 2% na resistência à tração do concreto CARC30 em relação ao concreto de referência, e redução de 11% para o concreto com substituição total (CARC100).

Em relação ao módulo de elasticidade, como esperado, os valores médios decrescem com o aumento do teor de substituição do agregado natural por ARC. Em termos percentuais, as reduções foram de 5,96% e 14,57%, respectivamente, para CARC30 e CARC100, em relação ao concreto de referência. Os resultados foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA) de fator único, sendo constatado, com 95% de certeza, que há diferença estatisticamente significativa entre os valores médios dos módulos de elasticidade. Por meio do teste de Tukey, foi constatado que essa diferença foi significativa para as misturas CREF e CARC30 em relação à mistura CARC100.

Os valores de módulo de elasticidade inicial, determinados experimentalmente, foram comparados às previsões teóricas ABNT NBR 6118 (2014), e os resultados são apresentados na Tabela 6-5. Diversos tipos de rocha foram considerados e, embora o agregado natural tenha origem basáltica, o módulo de elasticidade experimental do concreto de referência aproximou-se mais do valor correspondente ao granito. O agregado reciclado de resíduo de concreto tem constituição diversa; nesta análise, o módulo de elasticidade experimental para dos concretos com ARC aproximou-se dos valores correspondentes ao calcário.

Tabela 6-5: Comparação entre valores de Módulo de elasticidade teóricos e experimentais

Referência das equações	Módulo de elasticidade (GPa)		
	CREF	CARC30	CARC100
Experimental	32,74	30,79	27,97
ABNT NBR 6118 (2014) – Arenito	23,46 (-24,65%)	24,81(-19,40%)	24,53 (-12,30%)
ABNT NBR 6118 (2014) – Calcário	30,17 (-7,85%)	31,90 (+3,60%)	31,55 (+12,80%)
ABNT NBR 6118 (2014) – Granito	33,52 (+2,38%)	35,45 (+15,13%)	35,05 (+25,31%)
ABNT NBR 6118 (2014) – Basalto	40,23 (+22,87%)	42,54 (+38,16%)	42,06 (+50,38%)

Fonte: Autor (2021)

6.2 CISALHAMENTO DIRETO AÇO-EPÓXI-AÇO: GRUPO I

Neste item são analisados os resultados dos ensaios de cisalhamento direto dos exemplares aço-epóxi-aço (grupo I). Nesse grupo foram avaliadas duas espessuras, 1mm e 3mm, sendo que foram ensaiados três exemplares para cada espessura. Os valores de força última e deslizamento relativo aço-aço são apresentados na Tabela 6-6.

Tabela 6-6: Resultados dos ensaios de cisalhamento direto: aço-epóxi-aço

Espessura (mm)	Exemplar	Força última (kN)	Deslocamento (mm)	Média da força última (kN)	Tensão máxima (MPa)	Tensão média (MPa)
1	Aço 1-1	72,74	0,05	82,91 (±17,54)	3,64	4,15 (±0,87)
	Aço 2-1	72,83	0		3,64	
	Aço 3-1	103,17	2,05		5,16	
3	Aço 1-3	107,08	0	138,23 (±54,62)	5,35	6,91 (±2,73)
	Aço 2-3	106,31	0		5,32	
	Aço 3-3	201,30	0,02		10,07	

Fonte: Autor (2021)

A análise dos valores de força última, obtidos nos ensaios de cisalhamento direto, mostra que há uma grande variabilidade corroborando a necessidade de utilizar um número considerável de exemplares para avaliações desse tipo. Tal variabilidade fica nítida ao observar o desvio padrão. Para o tratamento dos dados visando uma análise mais adequada, os dois grupos (espessuras de 1 mm e 3 mm) foram submetidos ao teste de Dixon, também conhecido como teste Q, que permite avaliar se existem valores discrepantes dentro da amostra.

A metodologia para realizar o teste Q é resumida a seguir:

1. Ordenar os valores em ordem crescente;
2. Determinar a faixa (f), ou seja, a diferença entre o maior e o menor valor;
3. Determinar a diferença, em módulo, entre o menor valor da amostra (X_q) e o resultado mais próximo (X_p);
4. Determinar o valor “ Q_{cal} ”, utilizando a Equação 6-1

$$Q_{cal} = \frac{|X_q - X_p|}{f} \quad \text{Equação 6-1}$$

5. Comparar o valor de Q_{cal} com o valor da estatística $Q_{tabelado}$ para o nível de confiança desejado. Se $Q_{cal} > Q_{tabelado}$, rejeitar o valor analisado.

6. Se o menor valor é rejeitado, deve-se determinar novamente a faixa e testar o maior valor da série: repetir o processo até que os menores e maiores valores sejam aceitos.
7. Se o menor valor é aceito, o maior valor é testado e o processo é repetido até que os maiores e menores valores sejam aceitos. Se a amostra contiver apenas 3 valores, o teste deve ser feito apenas sobre o valor duvidoso.

Aplicando a Equação 6-1 aos valores de força última do grupo com 1 mm de espessura têm-se: $Q_{cal} = \frac{|103,17-72,83|}{103,17-72,74} = 0,997$. Sendo $Q_{crítico} = 0,941$ (KANJI, (2006) para um grupo de três exemplares e com nível de confiança de 95%, tem-se que $Q_{cal} > Q_{crítico}$. Portanto, o valor correspondente ao exemplar Aço 3-1 deve ser rejeitado. O mesmo processo de cálculo foi realizado para os exemplares com 3 mm de espessura e o valor do exemplar Aço 3-3 também foi considerado discrepante e rejeitado. Assim, a Tabela 6-7 apresenta os resultados dos ensaios de cisalhamento direto após tratamento dos dados.

Tabela 6-7: Resultados dos ensaios de cisalhamento direto: aço-epóxi-aço após análise estatística dos dados

Espessura (mm)	Exemplar	Força última (kN)	Deslocamento (mm)	Média da força última (kN)	Tensão máxima (MPa)	Tensão média (MPa)
1	Aço 1-1	72,74	0,05	72,79	3,64	3,64
	Aço 2-1	72,83	0	(±0,06)	3,64	(±0)
3	Aço 1-3	107,08	0	106,70	5,35	5,33
	Aço 2-3	106,31	0	(±0,54)	5,32	(±0,03)

Fonte: Autor (2021)

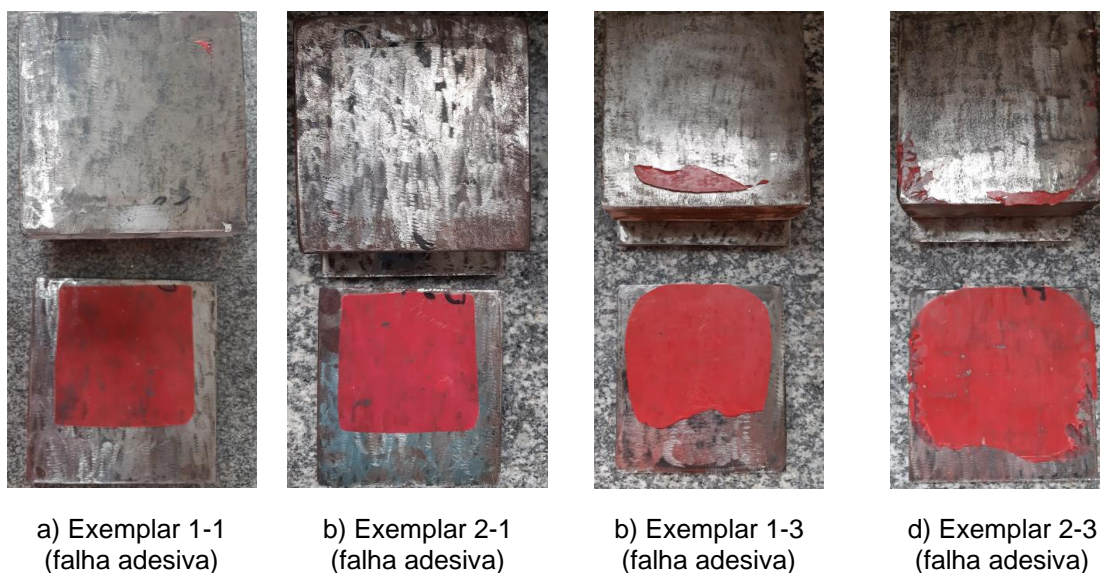
Percebe-se que há diferença significativa na resistência da interface em função da espessura do adesivo (1 mm e 3 mm). Os exemplares com adesivo de maior espessura (3 mm) apresentaram força última média 46,6% superior aos exemplares com 1 mm. Para calcular as tensões de cisalhamento apresentadas na Tabela 6-7, foi utilizada a Equação 6-2 que consiste na força última (F), valor médio, dividida pela respectiva área (A) de colagem dos exemplares (20000 mm²).

$$\tau = \frac{F}{A} \quad \text{Equação 6-2}$$

A Tabela 6-8 traz o tipo de falha em cada exemplar ensaiado. As falhas do tipo adesiva ou coesiva no adesivo já eram esperadas devido à elevada interação das chapas de aço; isto impossibilita a falha coesiva no substrato. Nota-se, na Figura 6-3, que a falha adesiva foi predominante. A identificação da falha predominante, que corresponde à ligação aço-adesivo,

permite determinar os valores de resistência ao cisalhamento da ligação aço-adesivo (falha adesiva) que são: 3,64 MPa e 5,33 MPa, respectivamente, para as ligações com 1 mm e 3mm de adesivo.

Figura 6-3: Exemplos do grupo 1 após a ruptura



Fonte: Autor (2021)

Com relação aos deslocamentos relativos, nota-se que a interação aço-aço, promovida pelo adesivo epóxi, apresenta comportamento rígido, visto que não houve deslocamentos relativos consideráveis entre as chapas. Os valores de deslocamento relativos (Tabela 6-8) indicam, claramente, que não houve deslocamento significativo até a ruptura.

Tabela 6-8: Tipo de falha nos exemplares Aço-epóxi-aço

Espessura (mm)	Exemplar	Força última (kN)	Deslocamento relativo (mm)	Tipo de falha
1	Aço 1-1	72,74	0,05	Adesiva
	Aço 2-1	72,83	0	Adesiva
3	Aço 1-3	107,08	0	Adesiva
	Aço 2-3	106,31	0	Adesiva

Fonte: Autor (2021)

6.3 CISALHAMENTO DIRETO AÇO-EPÓXI-CONCRETO: GRUPO II

Neste item são avaliados os resultados dos ensaios de cisalhamento direto para a ligação aço-epóxi-concreto. As principais variáveis analisadas nessa etapa foram a espessura da camada adesivada (1 e 3 mm) e o teor de substituição de agregado graúdo natural por ARC (30% e 100%).

A Tabela 6-9 traz uma síntese dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto. Os valores de força última passaram pelo teste Q para verificar se havia algum valor discrepante, não sendo identificado qualquer valor discrepante.

Tabela 6-9: Resultados dos ensaios de cisalhamento direto: aço-epóxi-concreto

	Espessura (mm)	Exemplar	Força última (kN)	Deslocamento relativo (mm)	Força média (kN)	Tensão máxima (MPa)	Tensão média (MPa)
concreto REF	1mm	A-CON-REF-1-1	64,96	0	96,43 (±27,89)	3,25	4,82 (±1,39)
		A-CON-REF-2-1	106,26	0		5,31	
		A-CON-REF-3-1	118,08	0		5,90	
	3mm	A-CON-REF-1-3	101,37	0	113,18 (±13,99)	5,07	5,66 (±0,70)
		A-CON-REF-2-3	109,55	0		5,48	
		A-CON-REF-3-3	128,63	0		6,43	
concreto ARC30%	1mm	A-CON-30%-1-1	52,92	0	63,76 (±11,99)	2,65	3,19 (±0,60)
		A-CON-30%-2-1	76,63	0,04		3,83	
		A-CON-30%-3-1	61,72	0		3,09	
	3mm	A-CON-30%-1-3	70,31	0	87,81 (±16,24)	3,52	4,39 (±0,81)
		A-CON-30%-2-3	90,72	-0,05*		4,54	
		A-CON-30%-3-3	102,40	0		5,12	
concreto ARC100%	1mm	A-CON-100%-1-1	34,56	0	50,14 (±14,36)	1,73	2,51 (±0,72)
		A-CON-100%-2-1	53,02	0,03*		2,65	
		A-CON-100%-3-1	62,85	0,02		3,14	
	3mm	A-CON-100%-1-3	90,31	0	88,67 (±2,14)	4,52	4,43 (±0,11)
		A-CON-100%-2-3	89,44	0,01		4,47	
		A-CON-100%-3-3	86,25	0,11		4,31	

*Valores atribuídos à ruídos durante a medição

Fonte: Autor (2021)

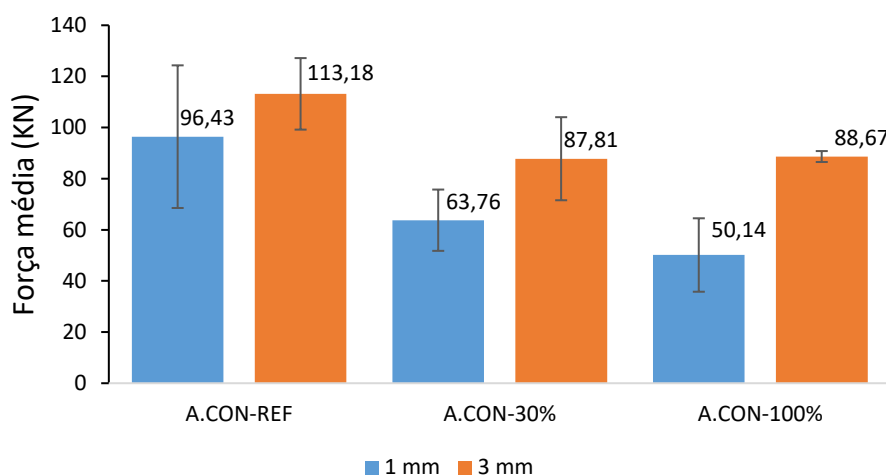
Para o cálculo das tensões de cisalhamento, apresentadas na Tabela 6-9, foi utilizada novamente a Equação 6-2. Nos itens a seguir, são analisados, separadamente, os resultados experimentais para cada variável investigada neste estudo.

6.3.1 Influência da espessura da camada adesivada na ligação aço-epóxi-concreto

As espessuras utilizadas nos ensaios experimentais foram de 1 e 3 mm, e os valores de força média correspondentes a cada espessura são mostrados na Figura 6-4. Embora pareça perceptível a influência da espessura, uma análise estatística foi realizada para identificar se há diferença significativa nos valores das forças médias em função da variação da espessura do adesivo. Assim, tais valores foram submetidos ao *test-T* de Student. Nas análises, foi considerado nível de certeza de 95% (significância de 5%). Nos exemplares com concreto de referência e com substituição de 30%, os resultados dos testes T de Student não mostraram diferença estatisticamente significativa devido à variação de espessura do adesivo.

Isso significa afirmar que, estatisticamente, para os concretos de referência e com 30% de substituição, a força resistente na interface não foi influenciada significativamente pela variação da espessura. Por outro lado, para os exemplares com 100% de ARC, o *test-T* de Student apontou diferença significativa (aumento) devido à variação de espessura do adesivo de 1mm para 3 mm. As tabelas referentes aos *test-T* de Student são apresentadas no Apêndice D.

Figura 6-4: Valores de força média dos ensaios de cisalhamento direto aço-epóxi-concreto



Fonte: Autor (2021)

Os exemplares com 3 mm de espessura de adesivo apresentaram maiores valores de força média, independentemente do tipo de concreto. Os aumentos observados foram: 17,7% para o concreto de referência, 37,7% e 76,8%, respectivamente, para exemplares com 30% e 100% de ARC no concreto reciclado. Portanto, parece existir influência do tipo de concreto e, quanto maior o teor de substituição do agregado graúdo natural por ARC, maior a influência do aumento da espessura de adesivo. É importante destacar que, para um aumento considerável (200%) na espessura (1mm para 3mm), ocorreram aumentos entre 17,7% e 76,8% na força última, a depender do tipo de concreto. Entretanto, foram identificadas falhas durante o processo de montagem dos exemplares com espessura adesivada de 1 mm. Essas falhas podem ter comprometido alguns resultados, e a avaliação da influência da espessura pode ter sido comprometida. Uma análise complementar é apresentada no item 6.3.4.

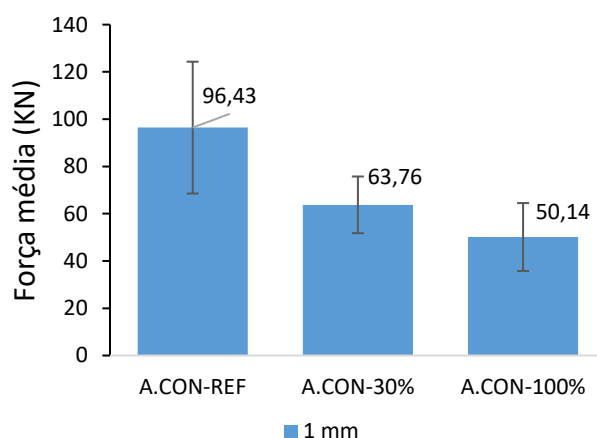
6.3.2 Influência do tipo de concreto na ligação aço-epóxi-concreto

A análise dessa variável é feita para cada espessura analisada. A Figura 6-5 apresenta os valores das forças médias dos exemplares correspondentes à ligação com 1 mm de espessura. Os valores de força média foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA) de fator único, com nível de certeza de 95%, para verificar se há diferença estatística significativa da resistência da ligação em função do tipo de concreto (referência ou reciclado).

A análise de variância demonstrou que não há diferença significativa entre os exemplares com 1mm de espessura.

Embora a Anova não tenha detectado diferença estatisticamente significativa para os exemplares com 1 mm de espessura de adesivo, houve redução percentual na força média resistida pela ligação com o aumento do teor de substituição de agregado de resíduo no concreto. Em relação aos exemplares de referência, houve redução de 33,9% na resistência ao cisalhamento da ligação para concreto reciclado com 30% de substituição (A.CON-30%). Entre os exemplares de referência e com 100% de substituição do agregado natural por ARC (A.CON-100%), a redução foi de 48%. Já entre os grupos A.CON-30% e A.CON-100% foi verificada redução de 21,4%. Embora a análise de variância (ANOVA) não tenha constatado diferença significativa no contexto do projeto de elementos estruturais, esses percentuais de redução são bastante expressivos.

Figura 6-5: Valores de força média resistente da interface aço-epóxi-concreto para os exemplares com 1 mm de adesivo



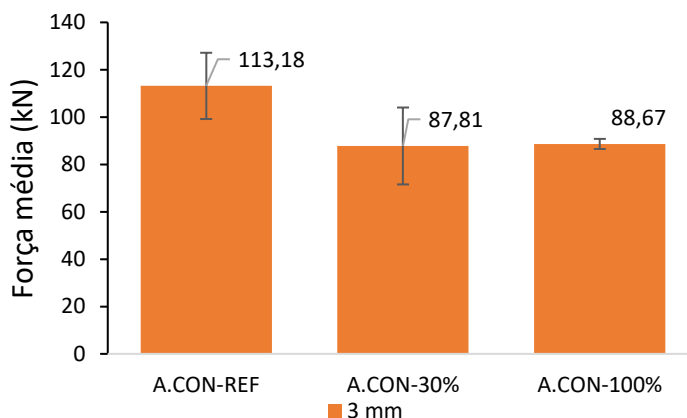
Fonte: Autor (2021)

Análise semelhante foi realizada para os exemplares com camada adesivada de 3 mm de espessura (Figura 6-6). Os dados foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA) de fator único, com nível de certeza de 95. A análise de variância demonstrou que não há diferença significativa entre os tipos de concreto avaliados.

Assim como ocorreu para os exemplares com 1 mm de espessura, neste caso também ocorreu redução da força média resistida pela ligação adesivada nos modelos com concreto reciclado (uso de agregado de resíduo de concreto). Em comparação com os exemplares de referência, houve redução de 22,4% na força média resistida pelos exemplares com substituição de 30% do agregado natural por ARC (A.CON-30%). Nos exemplares com substituição total (A.CON-100%), a redução foi bastante similar (21,6%). A diferença percentual entre os exemplares com concreto reciclado (30% e 100%) foi de 0,98%, ou seja, o aumento no teor de substituição não teve efeito significativo. Como já salientado

anteriormente, mesmo que nenhuma diferença significativa tenha sido detectada na análise de variância, a redução percentual na resistência é relevante no contexto do projeto de ligações adesivadas.

Figura 6-6: Valores de força média dos ensaios de cisalhamento direto aço-epóxi-concreto para exemplares com 3 mm de adesivo



Fonte: Autor (2021)

6.3.3 Análise dos deslocamentos relativos

A Tabela 6-10 mostra os deslocamentos relativos aço-concreto correspondentes à força última. A exemplo do ocorrido nos ensaios das ligações aço-adesivo-aço, a ordem de grandeza dos valores indica que a ligação aço-epóxi-concreto possui comportamento rígido. Os tradutores de deslocamento utilizados tinham capacidade para medir, com precisão, variações na segunda casa decimal (deslocamentos de 0,01mm), mas observou-se que, tendo em vista esse número de algarismos significativos, a maioria dos deslocamentos relativos registrados foi nulo ou muito pequeno.

Tabela 6-10: Valores de força última e deslocamento exemplares aço-epóxi-concreto

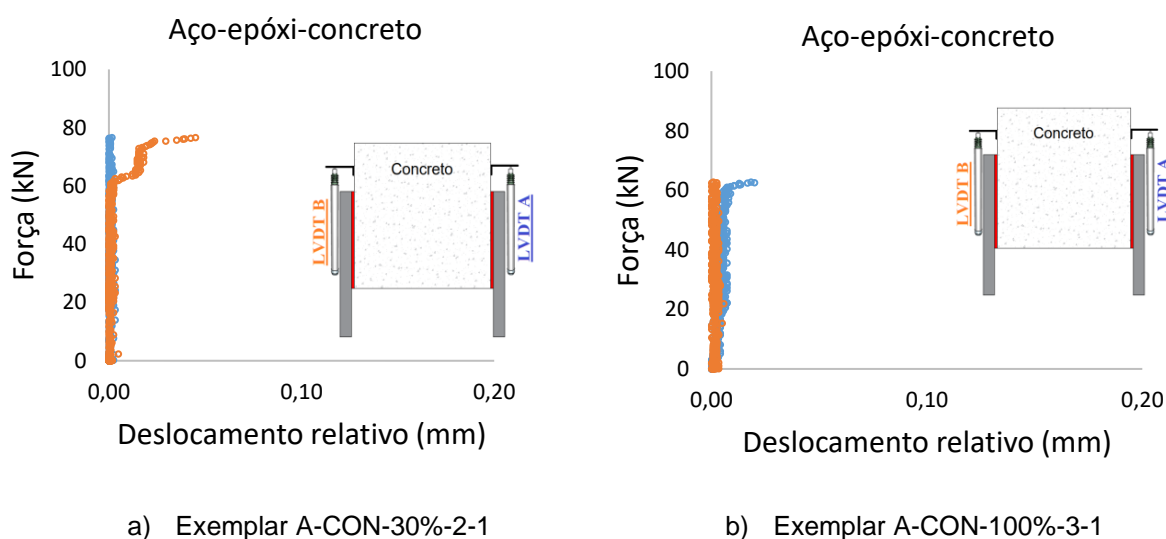
Exemplar		Força última (kN)	Deslocamento relativo (mm)
Concreto REF	1mm	A-CON-REF-1-1	64,96
		A-CON-REF-2-1	106,26
		A-CON-REF-3-1	118,08
	3mm	A-CON-REF-1-3	101,37
		A-CON-REF-2-3	109,55
		A-CON-REF-3-3	128,63
Concreto ARC 30%	1mm	A-CON-30%-1-1	52,92
		A-CON-30%-2-1	76,63
	3mm	A-CON-30%-3-1	61,72
		A-CON-30%-1-3	70,31

ARC 100%		A-CON-30%-2-3	90,72	-0,05*
		A-CON-30%-3-3	102,40	0
	1mm	A-CON-100%-1-1	34,56	0
		A-CON-100%-2-1	53,02	0,03*
		A-CON-100%-3-1	62,85	0,02
	3mm	A-CON-100%-1-3	90,31	0
		A-CON-100%-2-3	89,44	0,01
		A-CON-100%-3-3	86,25	0,11

*Valores atribuídos a ruídos durante a medição Fonte: Autor (2021)

A medida de deslocamentos relativos em ensaios de cisalhamento direto é, muitas vezes, complexa e de resultados bastante diversos. Nos exemplares aqui ensaiados, isso não foi diferente. Assim sendo, houve muito ruído nas leituras de deslocamentos relativos e, por isso, não cabe aqui analisar resultados numéricos. Dos valores de deslizamento registrados, é possível considerar apenas que o comportamento da interface é rígido, como já identificado em outros estudos (SI LARBI *et al.*, 2007; JURKIEWIEZ *et al.*, 2011; LUO *et al.*, 2012; KUMAR *et al.*, 2018). Um panorama geral da variação do deslocamento relativo em função da força aplicada, para alguns exemplares, é mostrado na Figura 6-7.

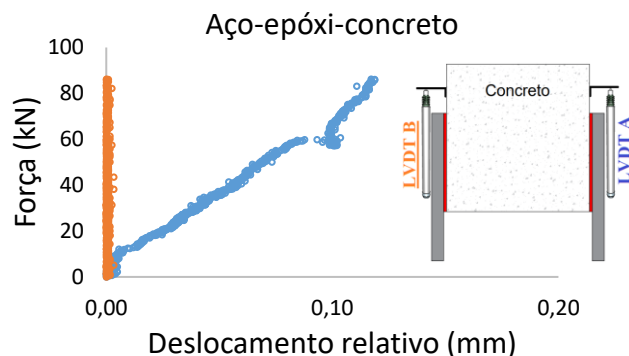
Figura 6-7: Comportamento Força vs. Deslocamento relativo para alguns exemplares



Fonte: Autor (2021)

Para os exemplares com concreto ARC100, também foram observados valores pequenos de deslocamentos relativos. Cabe aqui destacar o exemplar A-CON-100%-3-3 que apresentou deslocamento relativo de 0,11mm (Figura 6-8), sendo esse o maior deslocamento detectado.

Figura 6-8: Curva Força vs. Deslocamento relativo do exemplar A-CON-100%-3-3



Fonte: Autor (2021)

As curvas Força vs. Deslocamento relativo para todos os exemplares ensaiados estão disponíveis no Apêndice B.

6.3.4 Análise do modo de falha e da tensão resistente ao cisalhamento

A Tabela 6-11 traz um panorama da falha em cada exemplar ensaiado. A análise da falha nos exemplares para cada espessura analisada é feita juntamente com a tensão resistente.

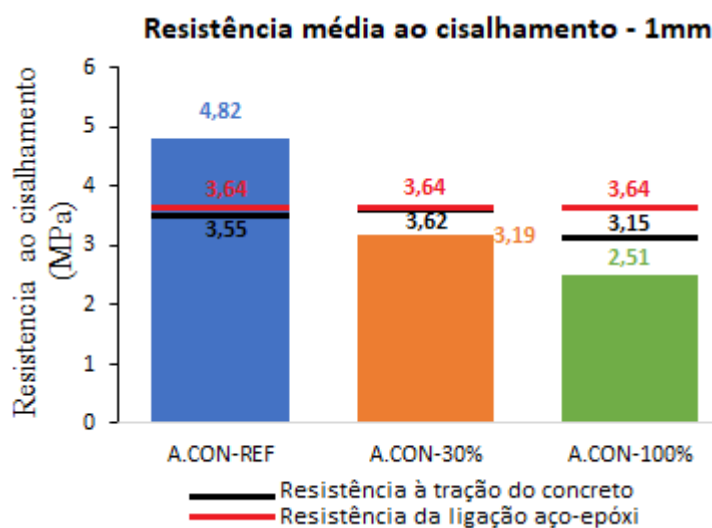
Tabela 6-11: Tipo de falha da ligação aço-epóxi-concreto

	Exemplar	Força última (kN)	Deslocamento relativo (mm)	Tipo de falha	
Concreto REF	1mm	A-CON-REF-1-1	64,96	0	Coesiva no concreto
		A-CON-REF-2-1	106,26	0	Adesiva no aço
		A-CON-REF-3-1	118,08	0	Adesiva no aço
	3mm	A-CON-REF-1-3	101,37	0	Adesiva no aço
		A-CON-REF-2-3	109,55	0	Adesiva no aço
		A-CON-REF-3-3	128,63	0	Coesiva no concreto
Concreto ARC30%	1mm	A-CON-30%-1-1	52,92	0	Coesiva no concreto
		A-CON-30%-2-1	76,63	0,04	Coesiva no concreto
		A-CON-30%-3-1	61,72	0	Coesiva no concreto
	3mm	A-CON-30%-1-3	70,31	0	Adesiva no aço
		A-CON-30%-2-3	90,72	-0,05*	Coesiva no concreto
		A-CON-30%-3-3	102,40	0	Adesiva no aço
Concreto ARC100%	1mm	A-CON-100%-1-1	34,56	0	Coesiva no concreto
		A-CON-100%-2-1	53,02	0,03*	Coesiva no concreto
		A-CON-100%-3-1	62,85	0,02	Coesiva no adesivo
	3mm	A-CON-100%-1-3	90,31	0	Coesiva no adesivo
		A-CON-100%-2-3	89,44	0,01	Adesiva no aço
		A-CON-100%-3-3	86,25	0,11	Coesiva no concreto

*Valores atribuídos à ruídos durante a medição Fonte: Autor (2021)

A tensão resistente ao cisalhamento da interface aço-epóxi-concreto para os exemplares com 1 mm de espessura é apresentada na Figura 6-9. Nesse gráfico, também são indicadas as resistências à tração dos concretos e da ligação aço-adesivo (vide resultados do grupo 1). A comparação com a resistência à tração do concreto também é relevante, pois ela pode estar diretamente relacionada à falha coesiva do concreto, visto que durante o arrancamento, as porções de concreto em contato com o adesivo podem estar sob tensões de tração ou compressão, como mostrado por Meaud *et al.* (2014).

Figura 6-9: Tensão resistente na interface aço-epóxi-concreto para exemplares com 1 mm



Fonte: Autor (2021)

Apenas a ligação com o concreto de referência (A-CON-REF-1mm) atingiu valores superiores aos de resistência à tração do concreto e da ligação aço-adesivo (Figura 6-9). Isso é confirmado pelo modo de ruptura apresentado pelos exemplares A-CON-REF-1mm: rupturas coesivas no concreto e adesiva no aço (Figura 6-10). O exemplar A-CON-REF-1-1 teve ruptura coesiva no concreto (Figura 6-10a), entretanto, a análise do exemplar pós-ensaio mostrou uma região sem adesão concreto-adesivo. Provavelmente essa região sem adesão resultou da aplicação de pressão insuficiente durante a montagem do exemplar. Neste caso, parte do adesivo não entrou em contato com o concreto e, portanto, essa falha não se configura, de fato, em falha adesiva no concreto e sim numa falha na etapa de colagem. Essa deficiência no processo de colagem dos componentes de aço e concreto explica a redução da tensão de cisalhamento resistida por esse exemplar, se comparada aos demais.

Figura 6-10: Exemplares do grupo A-CON-REF-1mm após a ruptura



a) Exemplar A-CON-REF-1-1
Coesiva no concreto



b) Exemplar A-CON-REF-2-1
Adesiva no aço



c) Exemplar A-CON-REF-3-1
Adesiva no aço

Fonte: Autor (2021)

Para os exemplares A-CON30%, a resistência ao cisalhamento foi inferior aos valores de resistência à tração do concreto e de resistência da ligação aço-adesivo (Figura 6-9). Ao avaliar a ruptura dos exemplares (Figura 6-11), novamente identificam-se áreas consideráveis de adesivo que aparentam não ter entrado em contato efetivo com o concreto. Certamente isso influenciou os resultados desses exemplares, pois, quanto menor a área de contato, menor a força resistida.

Figura 6-11: Exemplares do grupo A-CON30%-1mm após a ruptura



a) Exemplar A-CON-30%-1-1
Coesiva no concreto



b) Exemplar A-CON-30%-2-1
Coesiva no concreto



c) Exemplar A-CON-30%-3-1
Coesiva no concreto

Fonte: Autor (2021)

Em relação aos exemplares A-CON-100%-1mm, observa-se que a tensão média resistente ao cisalhamento também foi inferior aos respectivos valores de resistência à tração

do concreto e resistência da ligação aço-adesivo (Figura 6-9). Novamente, destaca-se que nos exemplares A-CON-100%-1-1 e A-CON-100%-2-1, grande parte do adesivo parece não ter aderido adequadamente ao concreto.

As falhas no processo de execução da ligação adesivada tiveram maior impacto nos exemplares cujos concretos tinham substituição parcial (30%) e total (100%) de ARC.

Diante dos resultados obtidos, é possível afirmar que o aumento da espessura do adesivo resulta em aumento da tensão resistente ao cisalhamento da ligação aço-epóxi-concreto. Contudo, esse aumento foi impactado pelas falhas na produção dos exemplares e, em função disso, podem não ser tão expressivos quanto o observado. Assim, a principal conclusão é que a espessura influencia a tensão resistente ao cisalhamento, mas o nível de influência requer novos estudos para uma determinação mais precisa.

Figura 6-12: Exemplares do grupo A-CON100%-1mm após a ruptura



a) Exemplar A-CON-100%-1-1
Coesiva no concreto



b) Exemplar A-CON-100%-2-1
Coesiva no concreto

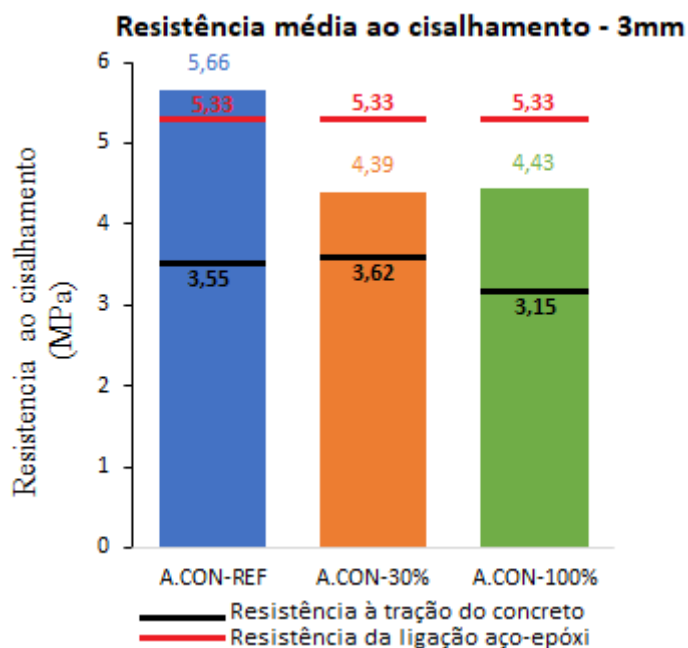


c) Exemplar A-CON-100%-3-1
Coesiva no adesivo

Fonte: Autor (2021)

A Figura 6-13 apresenta a tensão média resistente ao cisalhamento da interface aço-epóxi-concreto para os exemplares com ligação de 3 mm de espessura. Nesta mesma figura, também são indicadas a resistência à tração dos concretos e a resistência da ligação aço-adesivo (vide ensaios do grupo 1).

Figura 6-13: Tensão média resistente na interface aço-epóxi-concreto para exemplares com espessura adesivada de 3 mm



Fonte: Autor (2021)

A tensão de cisalhamento foi superior às suas respectivas resistências à tração no concreto e de ligação aço-adesivo. O modo de falha apresentado por estes exemplares (Figura 6-14) condiz com o quadro apresentado na Figura 6-13, ou seja, os exemplares apresentaram falhas coesiva no concreto (tensão resistente superior à resistência à tração do concreto) ou adesiva aço-adesivo para a qual a tensão resistente foi superior à adesão aço-adesivo).

Figura 6-14: Exemplares do grupo A-CON-REF-3mm após a ruptura



a) Exemplar A-CON-REF-1-3
Adesiva no aço



b) Exemplar A-CON-REF-2-3
Adesiva no aço

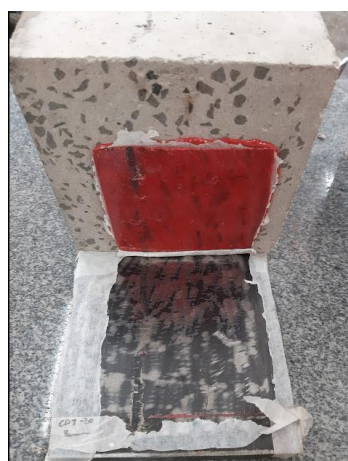


c) Exemplar A-CON-REF-3-3
Coesiva no concreto

Fonte: Autor (2021)

Para o grupo com concreto com 30% de teor de ARC (A-CON-30%-3mm), a tensão resistente ao cisalhamento da ligação tem valor intermediário, sendo maior que a resistência à tração do concreto e menor que a resistência da ligação aço-adesivo. Entretanto, dois dos exemplares apresentaram falha adesiva no aço, e apenas um apresentou falha coesiva no concreto (Figura 6-15). Isso significa dizer que a falha predominante ocorreu na ligação aço-adesivo e não no concreto. Isso pode estar relacionado com as tensões aplicadas nas ligações adesivadas que, na prática, não estão sobre tensões de cisalhamento puro. Como explicado por Meaud (2014), as ligações, muitas vezes, são submetidas simultaneamente a tensões de cisalhamento e perpendiculares de tração ou compressão. Sendo assim, há situações em que o cisalhamento está associado a um esforço de compressão, o que acaba conferindo à ligação uma resistência final superior à simples resistência à tração do concreto. Outro aspecto importante é que numa ligação real, por exemplo entre o perfil de aço e a laje de uma viga mista, o peso próprio da laje favorece o contato adesivo-concreto por ação de gravidade.

Figura 6-15: Exemplares do grupo A-CON-30%-3mm após a ruptura



a) Exemplar A-CON-30%-1-3

Adesiva no aço



b) Exemplar A-CON-30%-2-3

Coesiva no concreto



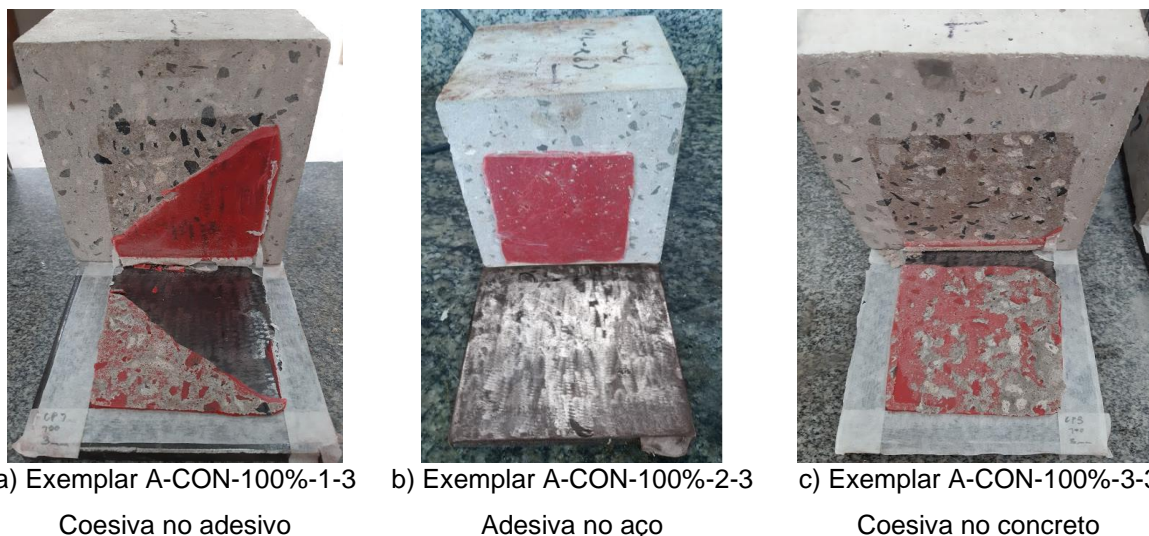
c) Exemplar A-CON-30%-3-3

Adesiva no aço

Fonte: Autor (2021)

No tocante ao grupo com substituição de 100% de ARC (A-CON-100%-3mm), o valor da resistência ao cisalhamento também se manteve entre a resistência à tração do concreto e a resistência da ligação aço-adesivo. Nesse caso, ocorreram modos de falha diferentes entre os exemplares: o exemplar 1 foi o único a apresentar ruptura coesiva no adesivo, ou seja, a ligação atingiu seu valor extremo para esse exemplar. Os exemplares 2 e 3 romperam de forma adesiva no aço e coesiva no concreto respectivamente (Figura 6-16).

Figura 6-16: Exemplos do grupo A-CON-100%-3mm após a ruptura



Fonte: Autor (2021)

6.4 COMENTÁRIOS FINAIS

Diante dos resultados apresentados, o aumento da espessura adesivada de 1 mm para 3 mm parece melhorar a resistência ao cisalhamento da ligação aço-epóxi-concreto. Entretanto, devido a falhas no processo de colagem dos exemplares com espessura adesivada de 1 mm, o aumento percentual pode não representar a realidade, requerendo novos ensaios para confirmação.

Além disso, a substituição do agregado graúdo natural pelo agregado graúdo de resíduo de concreto reduziu a resistência ao cisalhamento da ligação. Contudo, com o aumento do teor de substituição, de 30% para 100%, não foram observadas alterações na resistência da ligação para concretos com ARC.

No tocante ao comportamento da ligação, a ligação adesivada apresentou comportamento rígido, sem consideráveis deslocamentos relativos entre os materiais. Entretanto, são necessários mais estudos para verificar se o adesivo epóxi pode ser uma alternativa adequada para substituição de conectores de cisalhamento convencionais (pinos com cabeça) em vigas mistas de aço e concreto.

7 Conclusões

O objetivo principal desse trabalho foi avaliar a ligação adesivada entre o aço e o concreto com o uso de adesivo epóxi. As variáveis investigadas foram a espessura da camada de adesivo e a substituição parcial e total do agregado graúdo natural por agregado de resíduo de concreto (ARC). Para tal, foi desenvolvido um estudo experimental no qual 24 exemplares foram submetidos a ensaios de cisalhamento direto. Dos 24 exemplares ensaiados, 6 correspondem a ligações aço-epóxi-aço e 18 a ligações aço-epóxi-concreto. As espessuras de adesivo avaliadas foram de 1 mm e 3 mm, e os teores de substituição foram 30% e 100% do agregado natural por ARC.

O programa experimental foi dividido em duas etapas: produção e caracterização dos materiais e ensaios de cisalhamento direto. Da produção e caracterização dos materiais, observou-se que o agregado de resíduo de concreto possui menor massa específica e maior absorção de água que o agregado natural. Houve redução significativa na trabalhabilidade e redução discreta nos valores de resistência à compressão e à tração do concreto. Isso também foi observado para os valores de módulo de elasticidade, diminuições entre 6% e 14,5% para os concretos com substituições de 30% e 100%, respectivamente, em relação ao concreto de referência.

Com relação aos ensaios de cisalhamento direto da ligação aço-epóxi-aço (grupo 1), estes foram realizados visando a determinar a resistência da ligação aço-adesivo. Foi observada influência significativa da espessura da ligação na resistência média ao cisalhamento da ligação aço-adesivo-aço.

A análise da ligação aço-epóxi-concreto (grupo 2) também mostrou que o aumento da espessura do adesivo resulta em aumento da resistência ao cisalhamento da ligação. Entretanto, a análise dos exemplares, após a ruptura, mostrou que na maioria dos exemplares com ligação de 1 mm de espessura, uma área considerável de adesivo não entrou em contato efetivo com o concreto. Falhas no processo de confecção dos exemplares podem ter interferido na resistência ao cisalhamento dos exemplares com 1 mm de espessura de adesivo. Dessa forma, as falhas podem ter amplificado os efeitos do aumento de espessura da ligação. Portanto, sugere-se novos estudos para corroborar os resultados encontrados no presente estudo.

Quanto à influência do tipo de concreto (com agregados naturais ou reciclados), foi observada diminuição da resistência ao cisalhamento da ligação com o uso do ARC. Nos exemplares com ligação com 1mm de espessura, as reduções verificadas foram de 33,9% e 48%, respectivamente, para substituições de 0% e 100%. Contudo, tais reduções devem ser

analisada à luz dos modos de falha observados. Ligações com 3mm de espessura de adesivo apresentaram reduções de 22,4% e 21,6% para teores de 30% e 100%.

Com relação aos deslocamentos relativos, a ligação com adesivo epóxi apresentou comportamento rígido, ou seja, sem valores significativos de deslocamento relativo aço-aço ou aço-concreto.

Assim, os resultados mostram a influência da espessura da ligação e do tipo de concreto. Quanto aos resultados quantitativos, sugere-se novos estudos a fim de corroborar os percentuais de redução observados no presente estudo.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A ligação adesivada aço-concreto reciclado é um tema bastante recente e que não há, na literatura, registros de outros estudos científicos. Assim sendo, este estudo representa o início das pesquisas sobre esse tema, abrindo o caminho para novas pesquisas na área, incluindo pesquisas em que tal ligação é aplicada a elementos mistos de aço e concreto. Nesse contexto, e visando a impulsionar o desenvolvimento desse tema, alguns trabalhos futuros são sugeridos a seguir:

- Realização de ensaios complementares a fim de confirmar os resultados preliminares obtidos no presente estudo;
- Avaliação do comportamento de elementos mistos de aço e concreto com uso de concreto com agregados reciclados;
- Análise do comportamento de vigas mistas com ligação adesivada e uso de concreto com ARC em diferentes teores de substituição;
- Estudo da aderência aço-epóxi-concreto reciclado, avaliando espessuras não investigadas no presente estudo;
- Modelagens numéricas de ligações adesivadas e da transferência de forças entre os componentes de aço e de concreto.

8 Referências bibliográficas

ABOBUCKER, M.A.A., WANG, T.Y, RICHARD LIEW, Y.J. An experimental investigation on shear bond strength between steel and fresh cast concrete using epoxy. **The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering**, 2009.

ACI Committee 201, **Guide to Durable Concrete, ACI Manual of Concrete Practice**, 2002;

AKHTAR, A.; SARMAH, A. K. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective. *Journal of Cleaner Production*, v. 186, p. 262–281, 2018.

ALLWOOD, J.M.; ASHBY, M.F.; GUTOWSKI, T.G.; WORRELL, E. Material efficiency: A white paper. *Resour. Conserv. Recycl.* 2011, 55, 362–381.

ALMEIDA, PEDRO HENRIQUE. **Efeito do Tratamento Superficial em Ligações de Aço e Concreto com Adesivo Epóxi**. Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Escola de Engenharia, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D907**. Standard Terminology of Adhesives. Philadelphia, 2012.

ÂNGULO, S.C.; FIGUEIREDO, A.D. **Concreto: ciência e tecnologia - 2 vol**, Capítulo 47, 1ª edição, 2011.

ARAÚJO, D. L.; DANIN, A. R.; MELO, M. B.; RODRIGUES, P. F. Influência da adição de fibras de aço na tensão de aderência de barras de aço retilíneas. **Revista IBRACON Estruturas e Materiais**, São Paulo, v. 6, n. 2, p. 307-338, 2013.

ARAÚJO, D.L.; FELIX, L.; SILVA, L.; SANTOS, T. Influência de agregados reciclados de resíduos de construção em propriedades mecânicas do concreto. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15116**: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2021.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 30**: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 53**: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738**: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015;

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211**: agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro, 2009.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 26**: agregados: amostragem. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 27**: agregados: redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

BARBUDO, A.; DE BRITO, J.; EVANGELISTA, L.; BRAVO, M.; AGRELA, F. Influence of water-reducing admixtures on the mechanical performance of recycled concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 59, p. 93–98, 2013.

BERTHET, J. F.; YURTDAS, I.; DELMAS, A. LI. Evaluation of the adhesion resistance between steel and concrete by push out test. **International Journal of Adhesion & Adhesives**, 2011.

BHARDWAJ, A.; MATSAGAR, V.; NAGPAL, A.K.; CHAUDHARY, S. Bond Behavior in Flexural Members: Numerical Studies. **International Journal of Steel Structures**, 2021.

BOUZAOU, L.; JURKIEWIEZ, B.; DELMAS, Y.; LI, A. Static behaviour of a full-scale steel–concrete beam with epoxy-bonding connection. **Engineering Structures**, 2008.

BOUZAOU, L.; PERRENOT, G.; DELMAS, Y.; LI A. Experimental study of bonded steel concrete composite structures. **Journal of Constructional Steel Research** 2007.

BRANDES, M.R., KURAMA, Y.C. Behavior of shear-critical prestressed concrete beams with recycled concrete aggregates under ultimate loads, **Engineering Structures**, 2018.

BRECCOLOTTI, M.; MATERAZZI, L. A. Structural reliability of bonding between steel rebars and recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, 2013.

BUTLER, L.; WEST, J.S.; TIGHE, S.L. The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement. **Cement and Concrete Research**, 2011.

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.

CALCADO, G.C. DA S. **Influência da adição de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição no desempenho de argamassas de cimento Portland**. Projeto de graduação – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2015.

CHOI, H. B, KANG, K. I. Bond behaviour of deformed bars embedded in RAC. **Magazine of Concrete Research**, Korea University, 2008.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA. Ministério do Meio Ambiente, **Resolução N° 307 – Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil**. Conselho Nacional do Meio Ambiente: Brasília, DF, 2002. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA. Ministério do Meio Ambiente, **Resolução N° 448**. Altera os arts. 2º, 4º, 5º, 6º, 8º, 9º, 10 e 11 da Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA: Brasília, DF, 2012. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=672>>.

CONTRERAS, M.; TEIXEIRA, S.R.; LUCAS, M.C.; LIMA, L.C.N.; CARDOSO, D.S.L.; DA SILVA, G.A.C.; DOS SANTOS, A. Recycling of construction and demolition waste for producing new construction material (Brazil case-study). *Constr. Build. Mater.* 2016, 123, 594–600.

CUI, H. Z; SHI, X.; MEMON, S. A.; XING, F.; TANG, W. Experimental Study on the Influence of Water Absorption of Recycled Coarse Aggregates on Properties of the Resulting Concretes. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 2015.

CORTE, W.; HELINCKS, P.; BOEL, V.; Generalised fracture mechanics approach to the interfacial failure analysis of a bonded steel-concrete joint. **Frattura ed Integrità Strutturale**, 42, 2017.

DE NARDIN, S.; SOUZA, A. S.C.; DEBS, A. L.H.C.E. Comportamento conjunto em elementos mistos de aço e concreto: dispositivos mecânicos, **ABCEN, Construmetal**, 2008. Disponível em: https://www.abcem.org.br/construmetal/2008/downloads/PDFs/29_DeNardin&Souza&EI_Debs-versao_1.pdf.

EBNESAJJAD, S.; EBNESAJJAD, C. F. **Surface Treatment of Materials for Adhesion Bonding**. 1st New York: William Andrew Publishing, 2006.

EBNESAJJAD, S.; LANDROCK, A., H. **Adhesives Technology Handbook**. 3rd ed. New York: William Andrew Inc, 2014.

ECKERT, M.; OLIVEIRA, M. Mitigation of the negative effects of recycled aggregate water absorption in concrete technology. **Construction and Building Materials**, 2017.

EPDHK. Hong Kong Environment Waste Data, 2016. Disponível em: https://www.epd.gov.hk/epd/english/environmentinhk/waste/data/stat_treat.html.

EUROCODE 4. **Calculation of the steel–concrete composite structures and national application document, part 1: general rules and buildings rules**; 1994.

FERREIRA, Enildo Tales. **Contribuição ao estudo do potencial de aproveitamento de agregados reciclados de RCC produzidos na USIBEN - João Pessoa - em concreto estrutural aplicado em lajes pré-moldadas**. Tese (Doutorado, Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Salvador, 2013.

GAO, Q.; MA, Z.; XIAO, J. LI, F. Effects of Imposed Damage on the Capillary Water Absorption of Recycled Aggregate Concrete. **Advances in Materials Science and Engineering**, 2018.

GERIN, M. T. **Comportamento de pilares mistos preenchidos com concreto de resíduos de concreto submetidos a compressão axial centrada: efeito do teor de substituição e da forma de aplicação da força**, 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

GONÇALVES, M.S. **Análise da viabilidade técnica de utilização de resíduos de concreto oriundos da pré-fabricação como agregado graúdo para a produção de novos concretos**. Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2011.

GONÇALVES, R.D.C. **Agregados reciclados de resíduos de concreto – um novo material para dosagens estruturais**. Dissertação (mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2001.

GONZÁLEZ-TABOADA, I.; GONZÁLEZ-FONTEBOA, B.; MARTÍNEZ-ABELLA, F.; CARRO-LÓPEZ, D. Study of recycled concrete aggregate quality and its relationship with recycled concrete compressive strength using database analysis. **Materiales de construcción**, Madrid, 2016.

GUÐMUNDSSON, J. G. **Long-term creep and shrinkage in concrete using porous aggregate – the effects of elastic modulus**. 2013. 80 p. Thesis (Master of Science) - School of Science and Engineering, Reykjavík University, Iceland, 2013.

HANSWILLE G, PORSCHE M, USTUNDG C. Resistance of headed studs subjected to fatigue loading—Part I: Experimental study. **Journal of Constructional Steel Research** 2007.

HUANG, Q., WANG, D. Experimental study on bond-slip between steel bar and recycled aggregate concrete. **Advanced Materials Research**, Vols. 250-253, Switzerland, 2011.

JAMES D.K., ENDEBROCK, ELTON G., NORDBY, GENE M. **Use of Epoxy Compounds as a Shear Connector in Composite T-Beams**. University of Arizona 1967.

JURKIEWIEZ, B.; MEAUD, C.; MICHEL, L. Non linear behaviour of steel–concrete epoxy bonded composite beams, **Journal of Constructional Steel Research**, 2011.

JURKIEWIEZ, B; FIRAS, T.; EMMANUEL, F. Push-out and bending tests of steel-concrete adhesively bonded composite elements. **Engineering Structures**, 2021.

- JOHANSSON, M. **Composite action and confinement effects in tubular steel-concrete columns**. Suécia, 2002. Chalmers University of Technology, 2002.
- KANG, T., KIM, W., KWAK, Y., SUNG-GUL, H. Flexural Testing of Reinforced Concrete Beams with Recycled Concrete Aggregates. **ACI Structural Journal**, 2014.
- KANJI, G.K. **100 Statistical tests**, 3 ed, London, 2006.
- KIM, S.; YUN, H.; PARK, W.; JANG, Y. Bond strength prediction for deformed steel rebar embedded in recycled coarse aggregate concrete. **Materials & Design**, 2015.
- KUMAR, P., CHAUDHARY, S., GUPTA, R. Behaviour of adhesive bonded and mechanically connected steelconcrete composite under impact loading. **Procedia Engineering**, 2017.
- KUMAR, P., PATNAIK, A., CHAUDHARY, S. A review on application of structural adhesives in concrete and steel–concrete composite and factors influencing the performance of composite connections, International Journal of Adhesion and Adhesives, 2017.
- KUMAR, P., PATNAIK, A., CHAUDHARY, S. Effect of Bond Layer Thickness on Behaviour of Steel-Concrete Composite Connections. **Engineering Structures**, 2018.
- KURAD, R.; SILVESTRE, J.D.; BRITO, J.; AHMED, H. Effect of incorporation of high volume of recycled concrete aggregates and fly ash on the strength and global warming potential of concrete. **Journal of Cleaner Production**, 2017.
- KUSTER JUNIOR, J. S. **Avaliação da incorporação de agregado reciclado na composição de concretos autoadensáveis**. São Carlos, 2018. Dissertação (Mestrado em estruturas e construção civil). Universidade Federal de São Carlos, 2018.
- LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Porto Alegre, 2001. Tese (Doutorado em engenharia civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- LEVY, S. L. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. São Paulo, 2001. Tese (Doutorado em engenharia civil). Universidade de São Paulo, 2001.
- LINTZ, R.C.C; JACINTHO, A.E.P.G.A; PIMENTEL, L.L.; BARBOSA, L.A.G. Estudo do reaproveitamento de resíduos de construção em concretos empregados na fabricação de blocos. **Revista IBRACON de estruturas e materiais**, 2012.
- LUANGCHAROENRAT, C.; INTRACHOOT, S.; PEANSUPAP, V;SUTTHINARAKORN, W. Factors Influencing Construction Waste Generation in Building Construction:Thailand's Perspective, 2019.
- LUO Y.;LI A.; KANG Z. Parametric study of bonded steel–concrete composite beams by using finite element analysis, **Engineering Structures**, 2012.
- MALYSZ, G. N. **Estudo da influência da jigagem nas propriedades do concreto com agregado graúdo reciclado**. Dissertação mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

MAUÉS, L.M.F.; NASCIMENTO, B.M.O.; LU, W.; XUE, F. Estimating construction waste generation in residential buildings: A fuzzy set theory approach in the Brazilian Amazon. *Journal of Cleaner Production*, 2020.

MEAUD, C.; JURKIEWIEZ, B.; FERRIER, E. Steel–concrete bonding connection: An experimental study and non-linear finite element analysis. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete. Microstructure, properties, and materials**. 3. ed. New York, 2006.

MIKLOFSKY H.A.; BRPOWN, M.R.; GONSIOR MJ. **Epoxy bending compounds as shear connectors in composite beams**. State of New York: Dept. of Public Works, Eng. Res Series. RR.62-2; 1962.

MONDINI, B. G. **Avaliação da variabilidade de concretos utilizando resíduos de construção e demolição submetidos ao processo de separação por jigagem a seco**. Trabalho de Diplomação. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2018.

OZBAKKALOGLU, T.; GHOLAMPOUR, A.; XIE, T. Mechanical and Durability Properties of Recycled Aggregate Concrete: Effect of Recycled Aggregate Properties and Content. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018.

PAZ, S. S., FONTEBOA, B., EIRAS-LÓPEZ, J., HERRADOR, M. (2013). Bond behavior between steel reinforcement and recycled concrete. *Materials and Structures*, 2013.

PEDROSO, FÁBIO LUÍS. Concreto: as origens e a evolução do material construtivo mais usado pelo homem. **Concreto e Construções**, Mar. de 2009. Disponível em: <http://ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/Revista_Concreto_53.pdf>.

PELISSARI, V; MATASKI, A.; ALBERTI, M.E.; MEDEIROS, A. Absorção de água de amassamento em concretos produzidos com agregados reciclados. *Brazilian Applied Science Review*, 2020.

PEREIRA, M. F. **Comportamento estrutural de pilares mistos parcialmente revestidos submetidos a flexo-compressão**. São Carlos, 2017. Tese (Doutorado em engenharia de estruturas). Universidade de São Paulo, 2017.

PINTO, T. P. **Metodologia para a Gestão Diferenciada de Resíduos Sólidos da Construção Urbana**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. SP. 1999.

PRASAD, D.; PANDEY, A.; KUMAR, B. Sustainable production of recycled concrete aggregates by lime treatment and mechanical abrasion for M40 grade concrete. *Construction and Building Materials*, 2021.

RANGEL, C.S.; FILHO, R. D. T.; AMARIO, M.; PEPE, M.; POLISSENI, G. DE C.; ANDRADE, G. P. Generalized quality control parameter for heterogenous recycled concrete aggregates: A pilot scale case study. *Journal of Cleaner Production*, 2019.

PRINCE, J. R. M; SINGH, B. Investigation of bond behaviour between recycled aggregate concrete and deformed steel bars. *Structural Concrete* 15, Berlin, 2013.

RASHID, K.; REHMAN, M.U.; BRITO, J.; GHAFOR, H. Multi-criteria optimization of recycled aggregate concrete mixes. **Journal of Cleaner Production**, 2020.

SCHUBERT, S., CATHLEEN, H. ANDREAS, L., MOSER, K., MASOUD, M. (2012). Recycled aggregate concrete: Experimental shear resistance of slabs without shear reinforcement. **Engineering Structures**. 41. 490–497. 10.1016/j.engstruct.2012.04.006.

SEVERUD, LAVERNE KENNETH. **A preliminary study of the use of epoxy resin adhesives for joining concrete to steel in composite construction**. University of Arizona 1960.

SHARMAN, J. Construction Waste and Sustainability, 2017. Disponível em: <https://www.thenbs.com/knowledge/construction-waste-and-sustainability>.

SI LARBI A.; FERRIER E.; JURKIEWIEZ B.; HAMELIN P. Static behaviour of a steel–concrete beam connected by bonding. **Engineering Structures** 2007.

SILVA, A. H. M. da F. T. **Proposta de um Critério de Resistência para Juntas Metálicas Coladas**. 2007. 85 p. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói.

SILVA, L. F. M.; MAGALHÃES, A. G.; MOURA, M. F. **Juntas adesivas estruturais**. 1st ed. Porto: Publindústria, 2007.

SILVA, R. D. **Estudo da Aderência Aço-concreto em Pilares Mistos Preenchidos**, São Carlos, 2006, Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, 154 p..

SILVA, R.V., de BRITO, J., DHIR, R.K. Use of recycled aggregates arising from construction and demolition waste in new construction applications. *Journal of Cleaner Production*, v. 236, p. 1-15, 2019..

SOARES, D., BRITO, J., FERREIRA, J., *et al.*, “Use of coarse recycled aggregates from precast concrete rejects: Mechanical and durability performance”, **Construction and Building Materials**, 2014 .

SOUICI A, BERTHET JF, LI A, RAHAL N. Behaviour of both mechanically connected and bonded steel-concrete composite beams. **Engineering Structures** 2013.

TAM, V. V. W. Y.; GAO, X. F. X.; TAM, C. C. M. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. **Cement and Concrete Research**, 2005.

UJIKE, I. Air and water permeability of concrete with recycled aggregate. **International Workshop on Recycled Aggregate**. Proceedings. Niigata, Japan, pp. 95-106, 2000.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. Buildings and Climate Change Summary for Decision Makers, Paris, 2009.

WANG, J.; WU, H.; TAM, V. W. Y.; ZUO, J. Considering life-cycle environmental impacts and society's willingness for optimizing construction and demolition waste management fee: An empirical study of China. *Journal of Cleaner Production*, 2018.

WANG, Q.H., RANZI, G., WANG Y.Y., GENG, Y. Long-term behaviour of simply-supported steel-bars truss slabs with recycled coarse aggregate. **Construction and Building Materials** 116(6):335–346, 2016.

XIAO, J.; SUN, C.; JIANG, X. Flexural behavior of recycled aggregate concrete gradient slabs. **Structural Concrete**, 2014.

XIAO J, FALKNER H. **Bond behaviour between recycled aggregate concrete and steel rebars**. Constr Build Mater, 2007.

XIAO, J.Z, LI JB, and ZHANG CH. On statistical characteristics of the compressive strength of recycled aggregate concrete. **Structural Concrete**, 2005.

XIAO, J.; LI, J; ZHANG, CH. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. **Cement and concrete Research**, 2005.

XIAO, J.; LI, W; POON C. Recent studies on mechanical properties of recycled aggregate concrete in China—A review. **Science China Technological Sciences**, 2012.

XIAO, JIANZHUANG; LI, WENGUI; FAN, YUHUI; HUANG, XIAO. An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996–2011). **Construction and Building Materials**, 2012.

YONETANI, H.; Ministro Japonês do Meio Ambiente. Construction and Demolition Waste Management in Japan, 2017. Disponível em: [https://www.uncrd.or.jp/content/documents/2661Parallel%20Roundtable\(2\)-Presentation\(4\)-Hideko%20Yonetani.pdf](https://www.uncrd.or.jp/content/documents/2661Parallel%20Roundtable(2)-Presentation(4)-Hideko%20Yonetani.pdf).

ZHENG, L.N.; WU, H.Y.; ZHANG, H.; DUAN, H.B.; WANG, J.Y.; JIANG, W.P., DONG, B.Q., LIU, G., ZUO, J., SONG, Q.B. Characterizing the generation and flows of construction and demolition waste in China. *Construct. Build. Mater.* 136 (Apr), 405e413, 2017.

Apêndice A

Neste apêndice são apresentados os resultados restantes da caracterização dos agregados. Destacam-se as tabelas-resumo dos ensaios de granulometria e as curvas granulométricas dos agregados miúdos e graúdos.

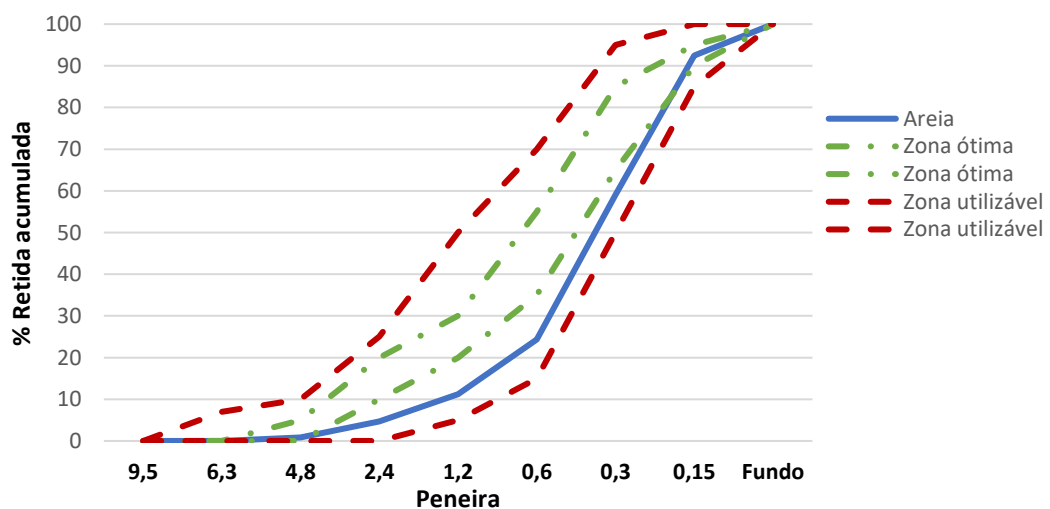
A Tabela A1 mostra as porcentagens retidas e retida acumulada, resultado do ensaio de granulometria da areia. A curva granulométrica da areia é apresentada Figura A1.

Tabela A1: Granulometria da areia

Peneira (mm)	Massa Retida (g)	% Retida	% Retida Acumulada
4,8	4,3	0,9	0,9
2,4	19,0	3,8	4,7
1,2	32,6	6,5	11,2
0,6	65,6	13,1	24,3
0,3	173,7	34,8	59,1
0,15	167,1	33,4	92,5
Fundo	37,7	7,5	100,0
Total	500,0	100,0	
Dimensão Máxima Característica:			2,4 mm
Módulo de Finura:			1,93

Fonte: Autor (2021)

Figura A1: Curva granulométrica da areia



Fonte: Autor (2021)

Conforme observado na curva granulométrica, o agregado miúdo pode ser classificado dentro da zona utilizável inferior de acordo com a ABNT NBR 7211:2009.

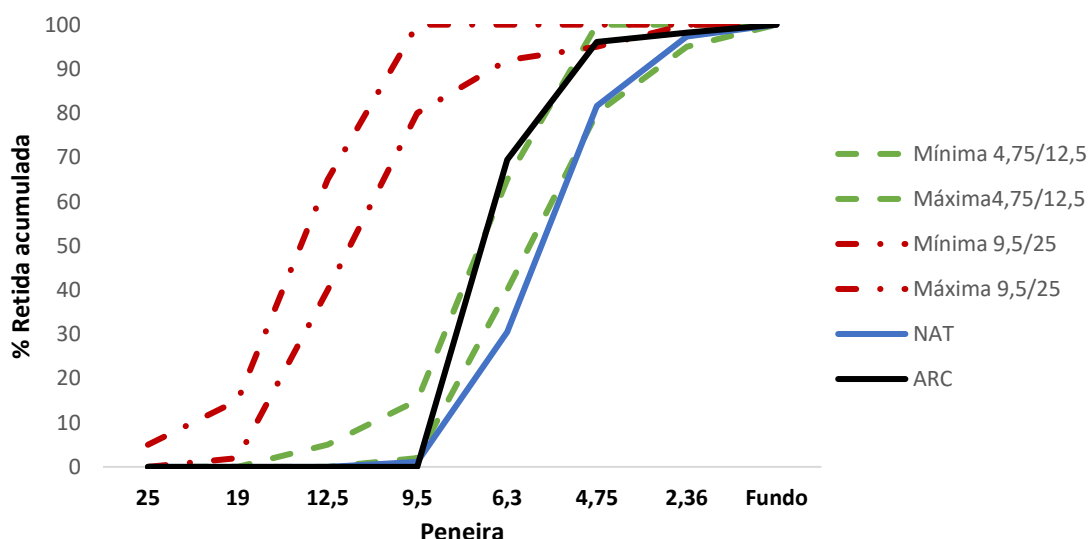
A Tabela A2 mostra as porcentagens retida e retida acumulada, resultados do ensaio de granulometria dos agregados graúdos. A Figura A2 traz a curva granulométrica desses agregados.

Tabela A2: Granulometria dos agregados graúdos

Granulometria Peneira (mm)	Agregado Natural		ARC	
	% Retida	% Retida Acumulada	% Retida	% Retida Acumulada
12,5	0,0	0,0	0,0	0,0
9,5	1,2	1,2	0,0	0,0
6,3	29,4	30,5	69,5	69,5
4,8	51,1	81,6	26,6	96,1
2,4	15,7	97,3	2,1	98,2
Fundo	2,7	100,0	1,8	100,0
Total	100,0		100	
Dimensão Máxima Característica:	9,5 mm		9,5 mm	
Módulo de Finura:	1,80		1,94	

Fonte: Autor (2021)

Figura A2: Curva dos agregados graúdos



Fonte: Autor (2021)

Verifica-se que a granulometria do agregado graúdo natural encontra-se no limite inferior da faixa granulométrica específica para agregados entre as dimensões de 4,75mm e 12,5mm. Já o agregado de resíduo de concreto encontra-se no limite superior dessa faixa.

Apêndice B

Neste apêndice são apresentadas as fotos de todos os modelos de cisalhamento direto, após a realização do ensaio, que identificam e confirmam o tipo de ruptura da ligação adesivada.

MODELOS DE LIGAÇÃO AÇO-EPÓXI-AÇO

A Figura B1 traz a configuração final da ligação dos modelos aço-epóxi-aço após o ensaio de cisalhamento direto.

Figura B1: Ligação adesivada após ruptura – Modelos aço-epóxi-aço



a) Exemplar Aço 1-1

b) Exemplar Aço 2-1



c) Exemplar Aço 3-1

d) Exemplar Aço 3-2

Fonte: Autor (2021)

MODELOS DE LIGAÇÃO AÇO-EPÓXI-CONCRETO

As Figura B2, Figura B3 e Figura B4 mostram a configuração final da ligação após o ensaio de cisalhamento direto para os modelos CREF, CARC30 e CARC100, respectivamente.

Figura B2: Ligação adesivada após ruptura – Modelos aço-epóxi-concreto-REF



a) Exemplar A-CON-REF-1-1



b) Exemplar A-CON-REF-2-1



c) Exemplar A-CON-REF-3-1



d) Exemplar A-CON-REF-1-3



e) Exemplar A-CON-REF-2-3



f) Exemplar A-CON-REF-3-3

Fonte: Autor (2021)

Figura B3: Ligação adesivada após ruptura – Modelos aço-epóxi-concreto-ARC30%



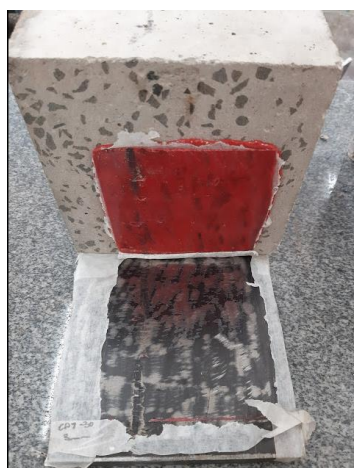
a) Exemplar A-CON-30%-1-1



b) Exemplar A-CON-30%-2-1



c) Exemplar A-CON-30%-3-1



d) Exemplar A-CON-30%-1-3



e) Exemplar A-CON-30%-2-3



f) Exemplar A-CON-30%-3-3

Fonte: Autor (2021)

Figura B4: Ligação adesivada após a ruptura – Modelos aço-epóxi-concreto-ARC100%



a) Exemplar A-CON-100%-1-1



b) Exemplar A-CON-100%-2-1



c) Exemplar A-CON-100%-3-1



d) Exemplar A-CON-100%-1-3



e) Exemplar A-CON-100%-2-3



f) Exemplar A-CON-100%-3-3

Fonte: Autor (2021)

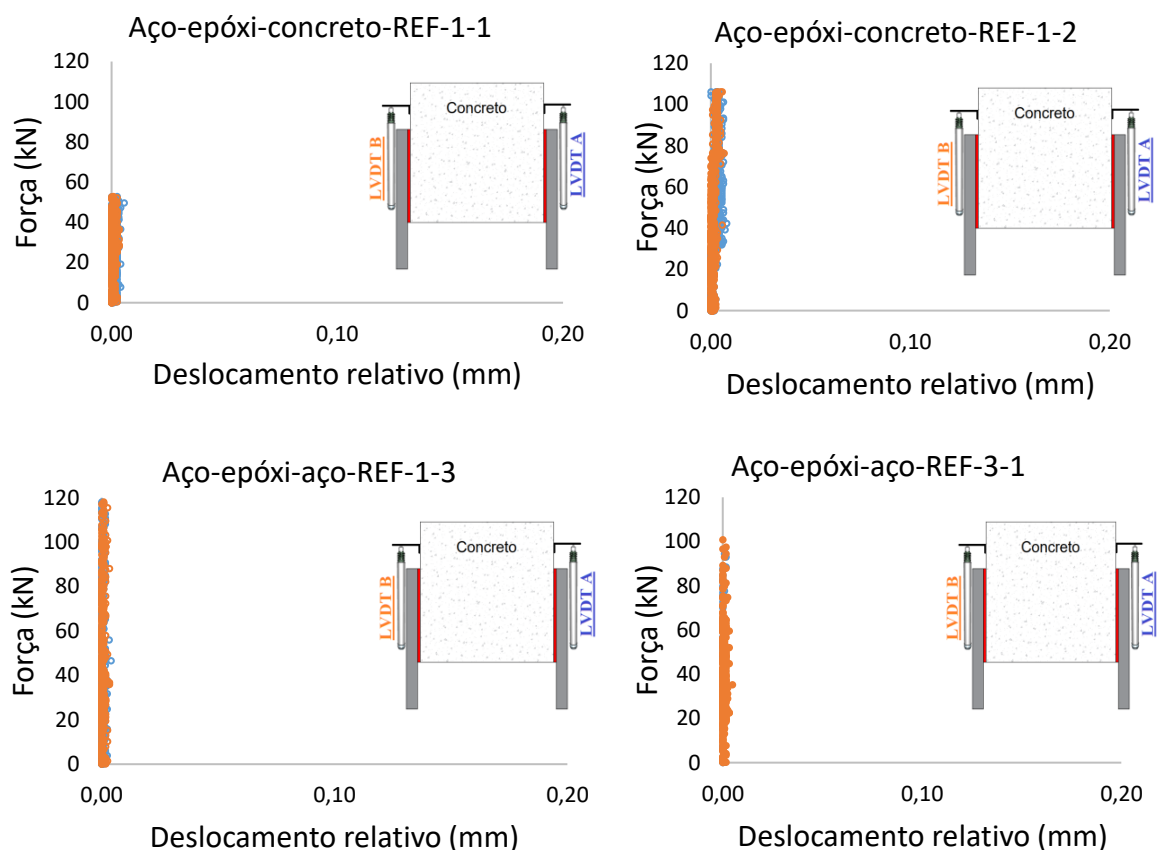
Apêndice C

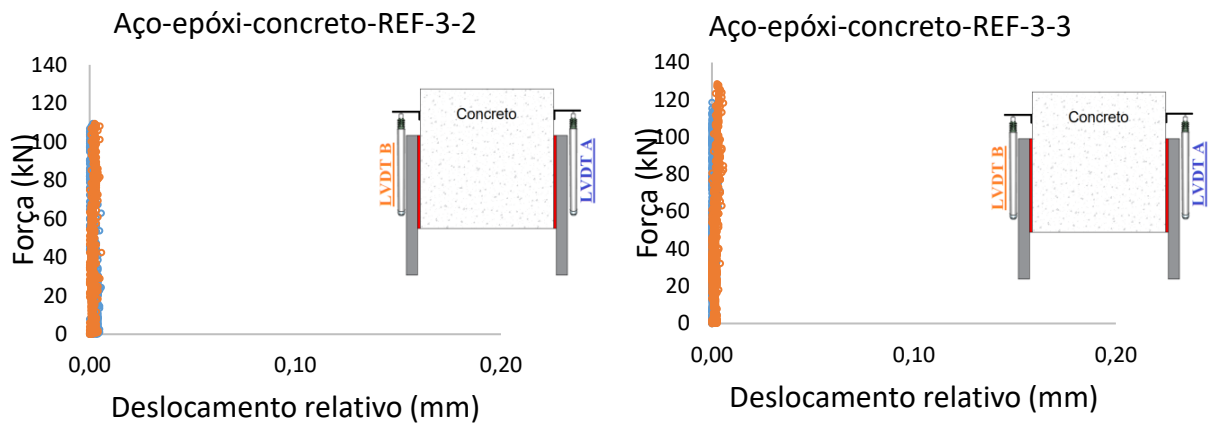
Neste apêndice são apresentadas as curvas de Força vs. Deslocamento para todos os modelos de cisalhamento direto ensaiados. Como pontuado anteriormente, alguns modelos apresentaram comportamentos atípicos na medição dos deslocamentos negativos atribuídos à possíveis acomodações do modelo durante os ensaios.

ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO: AÇO-EPÓXI-CONCRETO

As Figura C1, Figura C2 e Figura C3 mostram as curvas de Força vs. Deslocamento para os modelos Aço-epóxi-concreto, respectivamente para os modelos de referência, ARC-30, e ARC-100

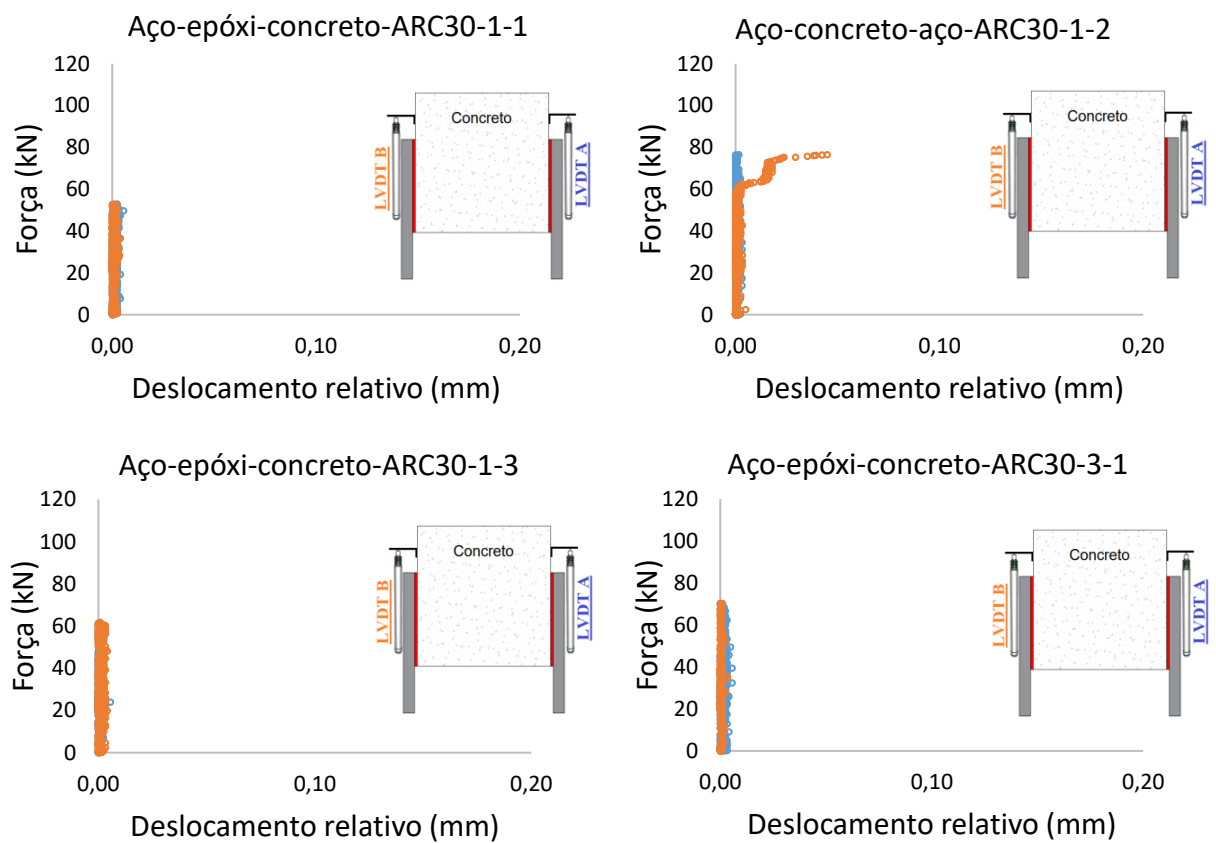
Figura C1: Curvas de Força vs. Deslocamento para os modelos Aço-epóxi-concreto-Referência

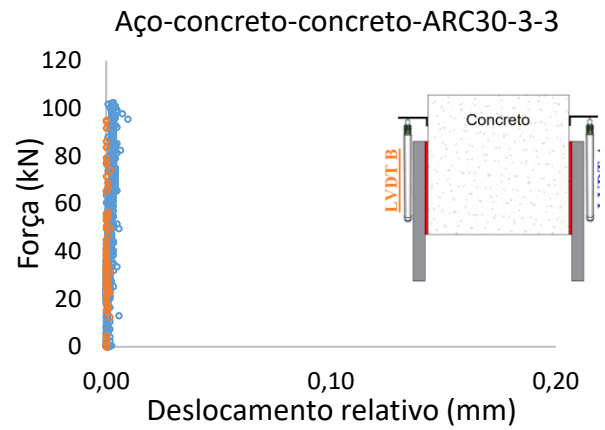
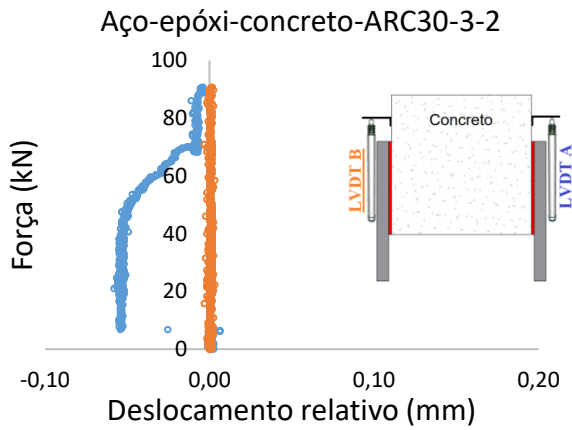




Fonte: Autor (2021)

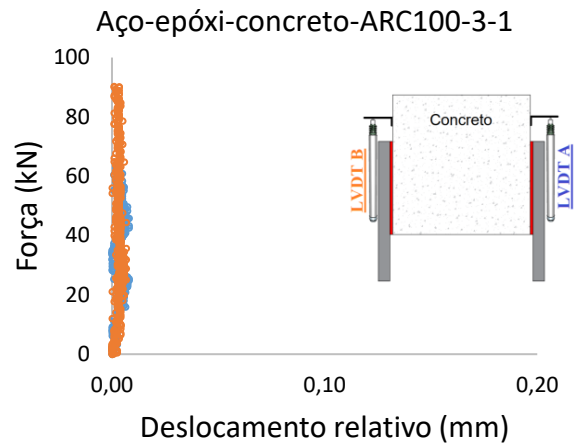
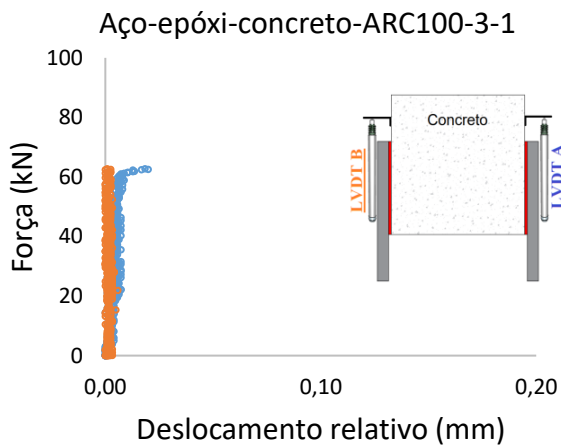
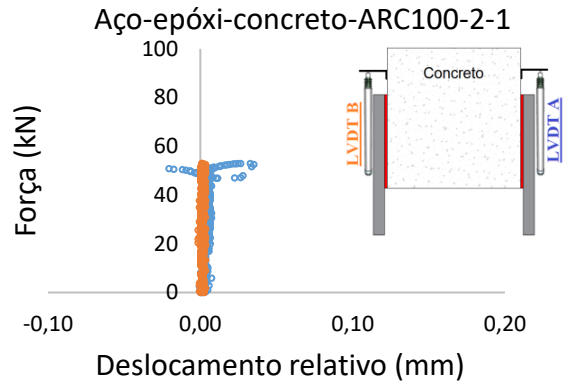
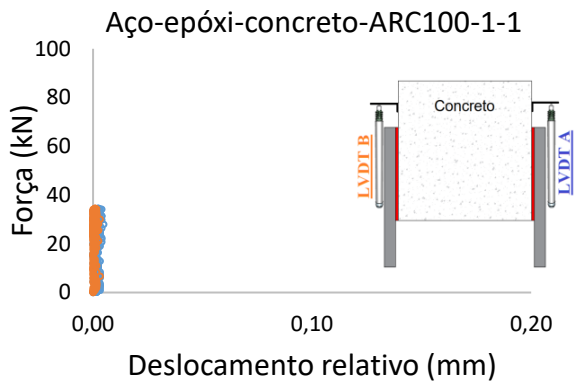
Figura C2: Curvas de Força vs. Deslocamento para os modelos Aço-epóxi-concreto-ARC30

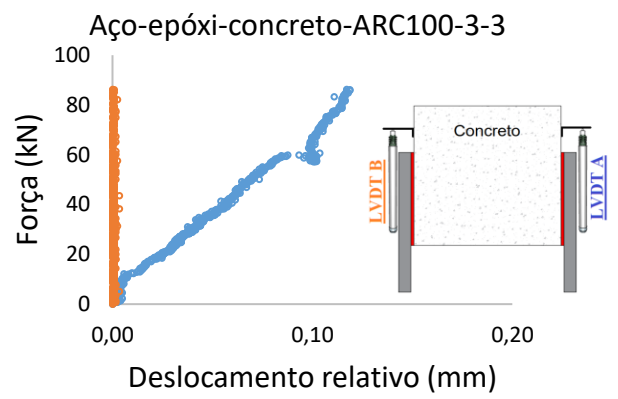
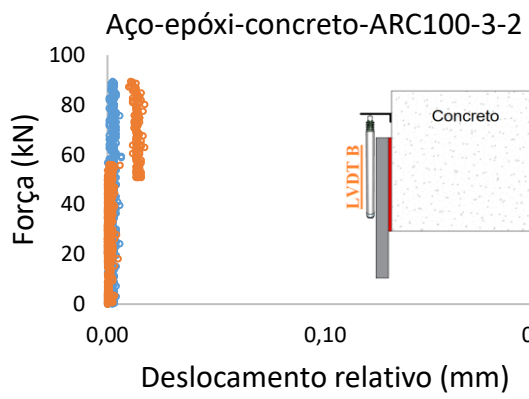




Fonte: Autor (2021)

Figura C3: Curvas de Força vs. Deslocamento para os modelos Aço-epóxi-aço-ARC100





Fonte: Autor (2021)

Apêndice D

Neste apêndice estão disponíveis as tabelas com os cálculos dos testes estatísticos ANOVA, teste de Tukey e teste T-Student realizados neste trabalho. A análise ANOVA e teste T-Student foram realizadas com o auxílio do Excel, enquanto para os testes de Tukey foi utilizado o software PAST.

Tabela D1: ANOVA e teste de Tukey para a resistência à compressão dos concretos aos 28 dias

Anova: fator
único

RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
CREF	5	179,22	35,844	0,10503
CARC30	5	200,39	40,078	1,61812
CARC100	5	195,93	39,186	0,02018

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	49,81897333	2	24,90948667	42,86535538	3,4269E-06	3,885294
Dentro dos grupos	6,97332	12	0,58111			
Total	56,79229333	14				

TESTE DE TUKEY

	CREF	CARC30	CARC100
CREF		0,0001914	0,000227
CARC30	12,42		0,1957
CARC100	9,803	2,616	

Tabela D2: ANOVA e teste de Tukey para a resistência à tração dos concretos aos 28 dias

RESUMO: Anova fator único

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
CREF	3	10,66	3,553333	0,052933
CARC30	3	10,87	3,623333	0,021433
CARC100	3	9,46	3,153333	0,241233

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	0,3858	2	0,1929	1,83365	0,239077	5,143253
Dentro dos grupos	0,6312	6	0,1052			
Total	1,017	8				

TESTE DE TUKEY

	CREF	CARC30	CARC100
CREF		0,9625	0,3513
CARC30	0,3738		0,2558
CARC100	2,136	2,51	

Tabela D3: ANOVA e teste de Tukey para módulo de elasticidade dos concretos

RESUMO: Anova fator único

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
CREF	3	98,21	32,73667	1,809233
CARC30	3	92,38	30,79333	0,278933
CARC100	3	83,9	27,96667	0,255033

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	34,51949	2	17,25974	22,09766	0,001708	5,143253
Dentro dos grupos	4,6864	6	0,781067			
Total	39,20589	8				

TESTE DE TUKEY

	CREF	CARC30	CARC100
CREF		0,08001	0,001593
CARC30	3,809		0,01848
CARC100	9,348	5,54	

Tabela D4: ANOVA para verificar efeito do ARC no grupo com 1 mm de espessura

RESUMO: Anova de fator único

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
CREF	3	289,2965	96,43216	778,009
CARC30	3	191,27	63,75667	143,656
CARC100	3	150,4342	50,14473	206,2566

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	3395,499	2	1697,749	4,515605	0,063602	5,143253
Dentro dos grupos	2255,843	6	375,9739			
Total	5651,342	8				

Tabela D5: ANOVA para verificar efeito do ARC no grupo com 3 mm de espessura

RESUMO: Anova fator único

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
CREF	3	339,5442	113,1814	195,6581
CARC30	3	263,4269	87,80898	263,854
CARC100	3	265,9985	88,66617	4,573381

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1245,49	2	622,7449	4,025626	0,077859	5,143253
Dentro dos grupos	928,171	6	154,6952			
Total	2173,661	8				

Tabela D6: Teste T-Student influência da espessura do adesivo concreto CREF

	<i>Grupo 1 mm</i>	<i>Grupo 3 mm</i>
Média	96,4321617	113,181388
Variância	778,0090416	195,658123
Observações	3	3
Variância agrupada	486,8335823	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	4	
Stat t	-0,929715594	
P(T<=t) uni-caudal	0,202572702	
t crítico uni-caudal	2,131846786	
P(T<=t) bi-caudal	0,405145404	
t crítico bi-caudal	2,776445105	

Tabela D7: Teste T-Student - influência da espessura do adesivo concreto CARC30

	<i>Grupo 1mm</i>	<i>Grupo 3mm</i>
Média	63,756668	87,80898
Variância	143,65603	263,854
Observações	3	3
Variância agrupada	203,755017	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	4	
Stat t	-2,0637085	
P(T<=t) uni-caudal	0,05399872	
t crítico uni-caudal	2,13184679	
P(T<=t) bi-caudal	0,10799744	
t crítico bi-caudal	2,77644511	

Tabela D8: Teste T-Student influência da espessura do adesivo concreto CARC100

	<i>Grupo 1mm</i>	<i>Grupo 3mm</i>
Média	50,14473167	88,66616767
Variância	206,2566238	4,573380504
Observações	3	3
Hipótese da diferença de média	0	
gl	2	
	-	
Stat t	4,595120313	
P(T<=t) uni-caudal	0,022120154	
t crítico uni-caudal	2,91998558	
P(T<=t) bi-caudal	0,044240309	
t crítico bi-caudal	4,30265273	