

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COECI - COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

THIAGO AUGUSTO BERTUZZO

**ESTUDO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO NA INTERFACE
CONCRETO-CONCRETO DE ELEMENTOS PRODUZIDOS COM
VARIAÇÕES NA GRANULOMETRIA DE AGREGADO GRAÚDO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO

2015

THIAGO AUGUSTO BERTUZZO

**ESTUDO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO NA INTERFACE
CONCRETO-CONCRETO DE ELEMENTOS PRODUZIDOS COM
VARIAÇÕES NA GRANULOMETRIA DE AGREGADO GRAÚDO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, do curso de Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. MSc. Gustavo Savaris

TOLEDO

2015



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Toledo
Coordenação do Curso de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso de Nº 006

Estudo da Resistência ao Cisalhamento na Interface Concreto- Concreto de Elementos Produzidos com Variações na Granulometria de Agregado Graúdo

por

Thiago Augusto Bertuzzo

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 16:00 horas do dia **3 de Junho de 2015** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Civil**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

Prof. Dr. Lucas Boabaid Ibrahim
(UTFPR – TD)

Prof. MSc. Rodnny Jesus Mendoza Fakhye
(UTFPR – TD)

Prof. MSc. Gustavo Savaris
(UTFPR – TD)
Orientador

Visto da Coordenação
Prof. Dr. Lucas Boabaid Ibrahim
Coordenador da COECI

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por iluminar meu caminho durante este percurso de 5 anos de faculdade.

Aos meus pais, Luiz e Terezinha, que fizeram todo o possível para me auxiliarem nestes anos de faculdade. Em especial, à minha mãe, que sempre me acalmou nos momentos difíceis.

Aos meus tios, José Carlos, Rosi e Catarina, por serem meus segundos pais na cidade de Toledo.

Ao meu irmão Leandro e a minha cunhada Polliana, que, mesmo de longe, sempre me ajudaram e me incentivaram na minha caminhada.

À memória de Thiago L. Dadalt, que me deu forças nos momentos difíceis.

AGRADECIMENTOS

Algumas palavras serão pouco para agradecer a todas as pessoas que me auxiliaram durante este trabalho e, principalmente, durante a faculdade. Dessa maneira, desde já peço desculpas se esqueci de alguém, porém pode ter certeza que foi de extrema importância em parte da minha caminhada, assim, deixo aqui a minha gratidão.

Primeiramente, agradeço a minha família. Meu pai Luiz, minha mãe Terezinha, meu irmão Leandro e minha cunhada Polliana, sempre estando ao meu lado em minhas decisões e me auxiliando sempre que precisei. Deixo aqui minha enorme gratidão.

A todos os meus tios, que sempre me auxiliaram, dando todo o apoio que precisei em Toledo durante os 5 anos, facilitando minha caminhada durante a faculdade. Deixo aqui o meu enorme agradecimento.

Ao professor Gustavo por me auxiliar em todas as etapas deste trabalho, sendo de suma importância para um bom andamento do mesmo.

Aos laboratoristas Marcos e Cláudia, aos acadêmicos Vinicius, Emilia, Gabriel W. e Gustavo, por me ajudarem nos experimentos deste trabalho. Agradeço ainda ao acadêmico Gustavo e à minha prima Mayra pelo auxílio na revisão do trabalho, sendo de suma importância para uma boa escrita do mesmo.

A todos os meus amigos de Tupãssi e de Toledo, por entenderem todas as vezes que me ausentei para realizar tarefas do TCC e da faculdade, em especial à Daniela, ao Renan, André e Alan.

Aos meus colegas que dividiram comigo esses 5 anos de faculdade. Foi com vocês que vi meu crescimento profissional e pessoal, e também que compartilhei momentos de tristezas e alegrias, os quais sempre serão lembrados e a amizade de vocês não será esquecida.

Aos meus amigos de faculdade, que passaram a ser verdadeiros irmãos. Agradeço aos amigos Adriana, Gabriel R., Gabriel W., Gustavo e Wesley, por todos esses anos de amizade.

Aos meus amigos de moradia, Gustavo M. e David, que me auxiliaram durante anos, além de me ajudarem em meu crescimento pessoal.

“Realize todos os serviços que fizer da melhor maneira possível, desde que seja o mero serviço de lavar um prato ou de varrer uma calçada”

(Luiz Roberto Bertuzzo)

RESUMO

BERTUZZO, Thiago Augusto. **Estudo da resistência ao cisalhamento na interface concreto-concreto de elementos produzidos com variações na granulometria de agregado graúdo.** 2015. 58 f. Monografia, Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2015.

Atualmente, existem vários estudos que apresentam os fatores que interferem na resistência ao cisalhamento da interface concreto-concreto, tais como a resistência do concreto, a aderência entre as peças, a rugosidade da superfície de interface de ligação das peças e a armadura da seção transversal. Entretanto, são poucos os estudos que determinam a influência desses fatores. Assim, o presente trabalho abordou o estudo sobre a influência da rugosidade na resistência ao cisalhamento da interface concreto-concreto em peças concretadas em diferentes estágios. Dessa forma, foi avaliada a influência do diâmetro máximo do agregado graúdo na resistência ao cisalhamento de peças de concreto produzidos com agregados graúdos de brita 0 e brita 1. Para o estudo, foram confeccionadas peças de concreto com dimensões de 30X10X10 cm³, concretadas de forma monolítica ou de forma composta (em duas etapas). A primeira etapa de concretagem das peças compostas preencheu as extremidades de 10x10x10 cm³, e a segunda etapa concretou a parte central, gerando assim uma interface concreto-concreto que foi submetida ao ensaio de cisalhamento direto. Antes da segunda etapa de concretagem, as faces dos elementos foram submetidas a diferentes tratamentos, obtendo rugosidades das superfícies de interface concreto-concreto lisas e rugosas. Esses resultados experimentais foram comparados aos resultados teóricos. Concluiu-se que a granulometria do agregado graúdo não interfere no cisalhamento de peças monolíticas, que as peças com interface concreto-concreto lisas têm resistência ao cisalhamento praticamente nula, que as peças compostas obtiveram valores relativamente baixos com relação à resistência das peças monolíticas, porém a resistência das peças compostas com interface concreto-concreto rugosas de brita 1 têm resistência ao cisalhamento superior às peças de brita 0.

Palavras-chave: Cisalhamento. Rugosidade. Interface concreto-concreto. Peças compostas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura pré-fabricada montada no seu local de utilização.....	13
Figura 2 - Seção transversal da viga concretada parcialmente com exposição da armadura da seção transversal	13
Figura 3 - Seção transversal da viga concretada totalmente com a ligação com a laje	14
Figura 4 - Ligação pilar-viga por consolo, com o recorte da viga	17
Figura 5 - Ligação viga-laje por nichos preenchidos com concreto	18
Figura 6 - Exemplo de ponte executada com viga pré-moldada e laje moldada no local.....	19
Figura 7 - Tensões de cisalhamento na interface de vigas compostas	21
Figura 8 - Transferência de esforços na interface de superfície rugosa.....	23
Figura 9 - Planta de fôrmas	31
Figura 10 - Fôrma para as peças monolíticas com seção transversal reduzida por tiras de isopor.....	32
Figura 11 - Planta de fôrmas para a primeira etapa de concretagem das peças compostas	33
Figura 12 - Disposição da fôrma das peças compostas durante a execução da primeira etapa de concretagem.....	33
Figura 13 - Disposição da peça com inserção das tiras de isopor nas paredes da fôrma para a segunda etapa de concretagem das peças.....	34
Figura 14 - Disposição da peça após a segunda etapa de concretagem	34
Figura 15 - Superfície da peça de B0 após tratamento superficial para exposição do agregado graúdo	35
Figura 16 – Rugosidade da superfície formada pela exposição do agregado graúdo nas peças de B0.....	36
Figura 17 - Superfície da peça de B1 após tratamento superficial para exposição do agregado graúdo	36
Figura 18 - Rugosidade da superfície formada pela exposição do agregado graúdo nas peças de B1.....	36

Figura 19 - Peça de B1 após o primeiro e o terceiro terço da peça estar com a superfície rugosa virada para o segundo terço da peça, com inserção das tiras de isopor.....	37
Figura 20 - Máquina Universal de Ensaios.....	38
Figura 21 - Peça com chapas de aço para a realização dos ensaios de cisalhamento direto	39
Figura 22 - Área da interface concreto-concreto da peça cisalhada	42
Figura 23 - Ruptura da ligação entre as superfícies de contato das peças de B0-CL e de B1-CL após a desforma.....	44
Figura 24 - Região de corte na peça de B0-M.....	46
Figura 25 - Região de corte na peça de B1-M.....	47
Figura 26 - Região de corte na peça de B0-CR	47
Figura 27 - Região de corte na peça de B1-CR	47
Figura 28 - Área cisalhada das peças: a) B0-M; b) B0-CR.....	48
Figura 29 - Área cisalhada das peças: a) B1-M; b) B1-CR.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Peso específico dos agregados	29
Tabela 2 - Massa dos materiais utilizados para a produção dos concretos das peças monolíticas de B0 e de B1	30
Tabela 3 - Massa dos materiais utilizados para produção dos concretos das peças compostas de B0 e de B1	30
Tabela 4 – Características dos concretos moldados com B0 e B1	41
Tabela 5 - Resultados dos ensaios das peças de B0-M e B1-M.....	43
Tabela 6 - Resultados dos ensaios das peças de B0-CR e B1-CR.....	45
Tabela 7 - Comparativo dos resultados das peças monolíticas com as peças compostas com interface concreto-concreto rugosa	46
Tabela 8 - Tensões de cisalhamento resistente para as peças compostas	49
Tabela 9 – Tensões de cisalhamento resistente para as peças monolíticas.....	51

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. JUSTIFICATIVA	14
1.2. OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1. A EVOLUÇÃO DO PRÉ-MOLDADO: UTILIZAÇÃO COM CONCRETO PRODUZIDO <i>IN LOCO</i>	17
2.2. LIGAÇÃO CONCRETO-CONCRETO	19
2.3. CISALHAMENTO NA INTERFACE CONCRETO-CONCRETO	21
2.4. NORMAS PARA CÁLCULO DA RESISTÊNCIA AO ATRITO ENTRE CONCRETO	24
2.4.1. NBR 6118 (ABNT, 2014)	25
2.4.2. NBR 9062 (ABNT, 2006)	26
3. MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1. DOSAGEM DO CONCRETO	28
3.1.1. Características dos materiais empregados	28
3.1.1.1. Ensaio de granulometria dos agregados	29
3.1.1.2. Ensaio de massa específica dos agregados	29
3.1.2. Produção do concreto	29
3.2. ELEMENTOS PARA ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO	31
3.2.1. Peças monolíticas	31
3.2.2. Peças compostas	32
3.2.2.1. Concretagem da segunda etapa das peças compostas: superfície de rugosidade lisa	33
3.2.2.2. Concretagem da segunda etapa das peças compostas: superfície de rugosidade rugosa	35
3.2.3. Tratamento dos corpos de prova e das peças de concreto	37
3.2.4. Ensaio de cisalhamento direto	38
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1. PROPRIEDADES DO CONCRETO	40
4.2. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO POR ENSAIO EXPERIMENTAL	41

4.2.1. Peças monolíticas	43
4.2.2. Peças compostas	43
4.2.2.1. Peças compostas com interface concreto-concreto lisa	43
4.2.2.2. Peças compostas com interface concreto-concreto rugosa.....	44
4.3. COMPARAÇÃO DAS PEÇAS MONOLÍTICAS COM AS PEÇAS COMPOSTAS COM INTERFACE CONCRETO-CONCRETO RUGOSAS.....	45
4.4. RESISTÊNCIA TEÓRICA AO CISALHAMENTO	48
4.4.1. Resistência teórica ao cisalhamento para peças compostas	49
4.4.2. Resistência teórica ao cisalhamento para peças monolíticas	50
5. CONCLUSÕES	52
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	53
7. REFERÊNCIAS	54
APÊNDICE A – CURVA GRANULOMÉTRICA DA AREIA.....	56
APÊNDICE B – CURVA GRANULOMÉTRICA DA B0	57
APÊNDICE C – CURVA GRANULOMÉTRICA DA B1	58

1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil, quando comparada aos outros ramos industriais brasileiros, é ainda avaliada como um setor de baixo desenvolvimento tecnológico, muitas vezes lembrada como um ramo tradicional e atrasado, como aponta El Debs (2000). Entre os fatores que conferem essa característica de baixa produtividade, pode-se citar o desperdício de materiais, lentidão nos processos construtivos e ausência de um eficaz controle de qualidade.

Frente a essa problemática e com o intuito de otimizar os processos construtivos, o emprego de elementos pré-moldados tem como objetivo industrializar o canteiro de obras e racionalizar a execução das estruturas de concreto armado (EL DEBS, 2000).

Segundo a NBR 9062 (ABNT, 2006) o elemento pré-moldado é todo elemento moldado antecipadamente e fora do seu local de uso, já o pré-fabricado são os elementos pré-moldados produzidos industrialmente.

A indústria do pré-fabricado de concreto vem ganhando bastante espaço na área da construção civil devido a suas estruturas serem moldadas em fábrica, apresentando um melhor controle de qualidade do concreto, consumindo também uma menor quantidade de fôrmas.

Na fabricação dos elementos pré-fabricados, são concretadas as vigas, os pilares e as vigotas das lajes separadamente e, posteriormente, no canteiro de obras, é feita a montagem da estrutura utilizando guindastes ou caminhões *munck*, sendo também realizada a concretagem das lajes. A Figura 1 apresenta uma estrutura pré-fabricada no seu local de utilização.



Figura 1 - Estrutura pré-fabricada montada no seu local de utilização

Fonte: O autor

As vigas produzidas na fábrica são parcialmente concretadas, não preenchendo toda a seção transversal, de forma a possibilitar a ligação entre as vigas e as lajes na obra. Na Figura 2, a seção transversal da viga se apresenta concretada parcialmente, com a exposição da armadura da seção transversal, e a Figura 3 apresenta a seção transversal da viga concretada completamente, já ligada à laje.



Figura 2 - Seção transversal da viga concretada parcialmente com exposição da armadura da seção transversal

Fonte: O autor



Figura 3 - Seção transversal da viga concretada totalmente com a ligação com a laje

Fonte: O autor

Com a concretagem *in loco* da laje com a viga, tem-se uma região de ligação concreto-concreto realizadas em diferentes idades, ou seja, a seção transversal da viga torna-se uma peça composta.

Desta maneira, instigam-se estudos para uma melhor compreensão do comportamento desta região composta quando submetida ao cisalhamento horizontal, que é ocasionado pela flexão da viga.

1.1. JUSTIFICATIVA

Quando submetida às cargas causadas pelo peso próprio da estrutura e pela carga accidental, surgem esforços de flexão na viga. Devido a esses esforços, aparecem tensões de cisalhamento horizontal no decorrer da seção longitudinal da viga. Essa tensão de cisalhamento tende a cortar a ligação de concreto entre a viga e a laje. Ocorrendo a ruptura do concreto, as partes da viga não trabalham mais de maneira monolítica.

Neste contexto, este trabalho justifica-se pela necessidade de mais estudos sobre a parcela de resistência ao cisalhamento gerada pelo atrito na superfície de contato concreto-concreto. Visa-se também auxiliar no desenvolvimento de teorias de dimensionamento de estruturas de concreto pré-fabricado, bem como na prevenção de patologias da estrutura, garantindo a extensão da vida útil da edificação.

1.2. OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar a influência da rugosidade da superfície de interfaces concreto-concreto através de ensaios de cisalhamento direto em peças de concreto dosados com variada granulometria do agregado graúdo.

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- comparar a resistência ao cisalhamento direto de peças monolíticas com peças compostas;
- avaliar a influência da granulometria do agregado graúdo na resistência ao cisalhamento direto do concreto;
- avaliar a influência da rugosidade da interface concreto-concreto em peças compostas na resistência ao cisalhamento direto;
- determinar as tensões de ruptura por cisalhamento nas peças de concreto.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo El Debs (2000), a evolução do concreto pré-moldado está ligada à evolução da tecnologia do concreto. Esta se dá entre o final do século XIX até meados do século XX (início da Segunda Guerra Mundial). Porém, o desenvolvimento do concreto pré-moldado é comumente ligado aos 25 anos pós Segunda Guerra Mundial.

A utilização dos elementos pré-moldados é dotada de benefícios ligados à logística e produtividade no canteiro de obras, e quando se opta pela construção com esse método construtivo não só são obtidos ganhos em tempo, mas também em qualidade. Dentre as vantagens, também podem ser citadas a diminuição dos riscos de acidentes com pessoas, economia em fôrmas de concretagem e redução do custo de transporte de concreto usinado. Também, quando se adota o uso de pré-fabricados, a obra ganha em economia de espaço, devido a não montar os elementos de vigas e pilares na obra (MENDONÇA, 2002).

Para Judice (2002), a diminuição da utilização de fôrmas e a maior agilidade no processo de fabricação da estrutura estão entre os maiores ganhos da utilização dos componentes pré-moldados.

De acordo com El Debs (2000), a execução de peças de estruturas pré-moldadas são realizadas a partir do preparo das fôrmas, das armaduras e da execução, moldagem, cura e desmoldagem do concreto.

A NBR 9062 (ABNT, 2006) apresenta que a ligação pilar-viga pode ser realizada por consolos de concreto, como apresentado na Figura 4. Essa ligação por consolo é um tipo de ligação por encaixe, onde ocorre o recorte da viga.



Figura 4 - Ligação pilar-viga por consolo, com o recorte da viga
Fonte: O autor

2.1. A EVOLUÇÃO DO PRÉ-MOLDADO: UTILIZAÇÃO COM CONCRETO PRODUZIDO *IN LOCO*

Segundo Araújo (1997), a utilização dos componentes pré-moldados com concreto produzido *in loco* é um processo comumente adotado nas estruturas pré-moldadas. Essa combinação é habitualmente denominada de elementos compostos, peças compostas ou estruturas compostas. Ressalta-se também que esta nomenclatura é mais aplicada para a associação de dois diferentes materiais, como por exemplo, a utilização de peças de madeira com peças de aço. Porém, em consequência da semelhança da combinação, a associação entre pré-moldado e concreto moldado *in loco* recebe a mesma nomenclatura.

Os elementos executados em moldagens distintas e posteriormente ligados de maneira a formar uma única peça são chamados de peças compostas. Essas peças, depois de interligadas, devem atuar em conjunto para receber as solicitações estruturais aplicadas. Sua seção transversal é denominada de seção composta ou seção mista (NBR 9062, ABNT, 2006).

Para Araújo (1997), a utilização de peças compostas facilita a execução dos componentes pré-moldados devido à agilidade da montagem na obra pela redução das dimensões das peças. Dessa maneira, diminui o peso próprio dos componentes pré-moldados, facilita a ligação entre os elementos, garante o maior monolitismo da estrutura e promove o ganho para o concreto moldado *in loco* através da diminuição das formas e cimbramento.

De acordo com Araújo (2002), existem diversos materiais e métodos para realizar as ligações entre peças. Um tipo de ligação que pode ser utilizado para unir viga e laje pré-moldadas são os conectores metálicos com concreto moldado *in loco*, onde são deixados conectores, formados por vergalhões de aço e dobrados em forma de laço, na viga pré-moldada. Na montagem, esses conectores são inseridos em furos (nichos) deixados na laje pré-moldada, que serão preenchidos por concreto. Nesse tipo de ligação, a transferência dos esforços pela interface é feita de forma discreta, sendo obtida uma vez que são utilizados conectores. Nessa consideração a resistência por atrito entre a viga e laje é desprezada. A Figura 5 apresenta uma ligação por nicho.

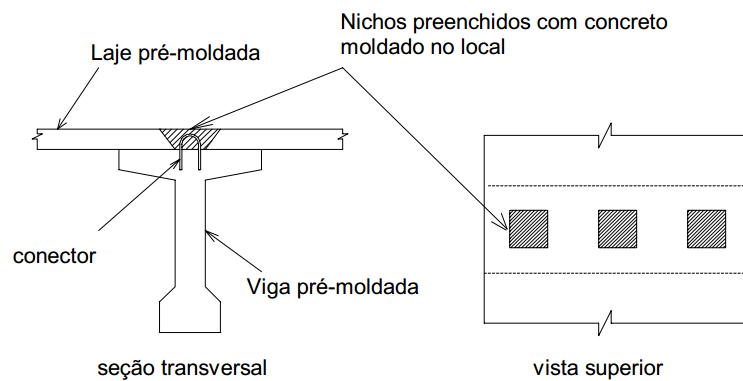


Figura 5 - Ligação viga-laje por nichos preenchidos com concreto
Fonte: Araújo (2002)

De acordo com Mendonça (2002), é comum o emprego de peças compostas de concreto em estruturas de pontes. Sobre as vigas pré-moldadas são colocadas placas de concreto, também pré-moldadas, que serão utilizadas como fôrma para a laje que será moldada no local. A Figura 6 apresenta um exemplo deste método construtivo.

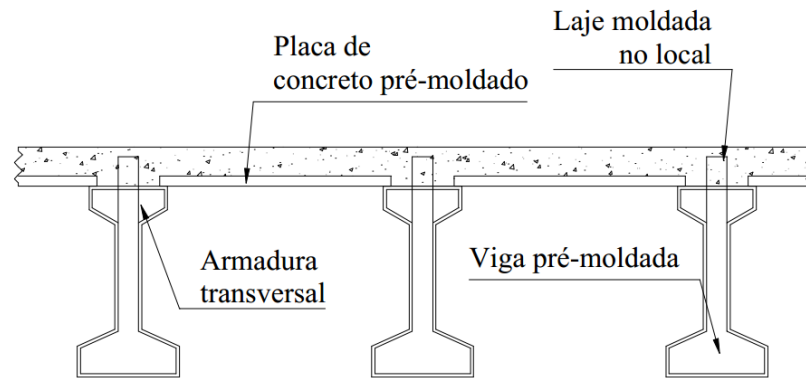


Figura 6 - Exemplo de ponte executada com viga pré-moldada e laje moldada no local
Fonte: Mendonça (2002)

Cabe salientar que um dos principais problemas ligados à utilização de elementos compostos é a dificuldade em determinar o comportamento estrutural da peça combinada, uma vez que são utilizados concretos com diferentes características e também idades distintas. Para a compreensão do fenômeno, devem ser averiguados os efeitos causados pela diferença de retração e módulo de elasticidade dos diferentes concretos utilizados na composição da peça (ARAÚJO, 2002).

Um destes problemas está na interface concreto-concreto formado pela ligação de peças compostas. Esta problemática será tratada no item a seguir.

2.2. LIGAÇÃO CONCRETO-CONCRETO

De acordo com a NBR 9062 (ABNT, 2006), as ligações são meios empregados para constituir uma estrutura, garantindo que seja feita a transmissão dos esforços solicitantes e que seja mantida a conservação da estrutura por toda a sua vida útil.

Araújo (1997) afirma que quando é feita a concretagem *in loco* em um componente pré-moldado, sua área de seção resistente é aumentada, porém, para absorver os esforços ativos na estrutura, deve-se garantir a transmissão dos esforços na interface concreto-concreto.

Quando é garantida a continuidade e a eficiência das partes nas estruturas compostas, é representada uma forma econômica de realizar a combinação de

peças. Entretanto, o comportamento monolítico das peças só é garantido caso todas as forças sejam transferidas pela interface (JUDICE, 2002).

Para se obter uma eficiente colaboração do concreto moldado *in loco* nas peças compostas, quando submetidas à flexão, deve-se garantir a transmissão total ou de parte das tensões de cisalhamento na interface concreto-concreto. Ainda, fatores como rugosidade da superfície de contato, armadura transversal e resistência do concreto possuem fator de colaboração na resistência ao cisalhamento (DA SILVA ET AL, 2009; ARAÚJO, 1997; JUDICE 2002).

Segundo a NBR 9062 (ABNT, 2006), a rugosidade nada mais é do que as saliências e reentrâncias encontradas na superfície endurecida do concreto. Essa rugosidade pode ser ocasionada no processo de moldagem, seja ela por ocasiões especiais ou pelos próprios processos de moldagem.

A peça composta poderá apresentar, dependendo dos níveis de transmissões dos esforços entre a parte pré-moldada e a parte moldada *in loco*, comportamento monolítico ou não. Portanto, para que se possa determinar se a parte da seção transversal da viga concretada na obra (que corresponde à altura da laje) irá ou não contribuir na resistência ao momento fletor, deve-se avaliar se acontecerá a transmissão de esforços na interface concreto-concreto. A Figura 7 é um modelo comum da combinação da viga pré-moldada com a laje moldada no local, onde a aderência das peças é de grande valia para a resistência da interface (ARAÚJO, 2002).

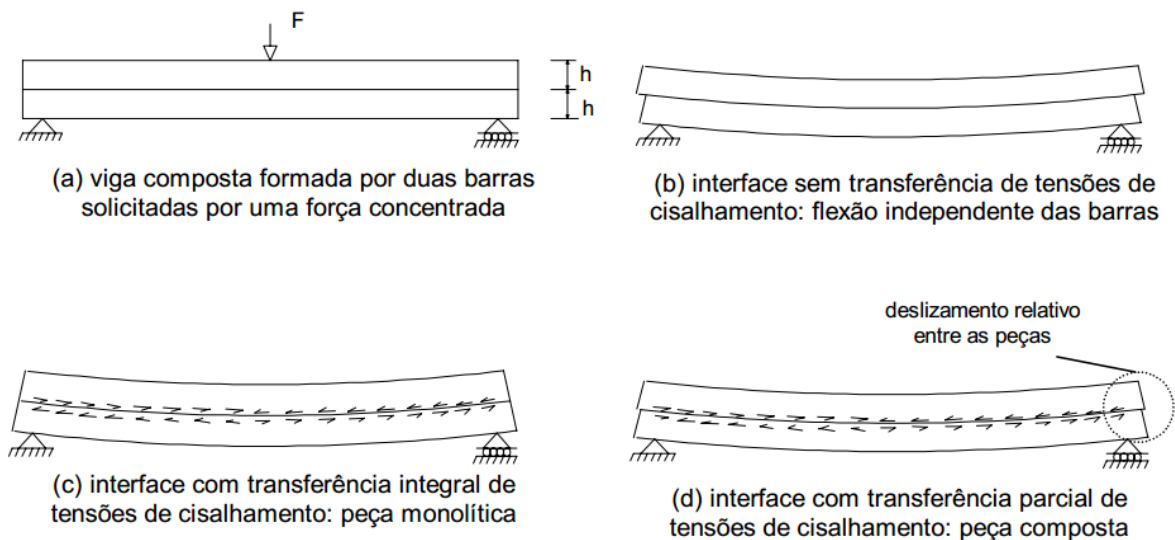


Figura 7 - Tensões de cisalhamento na interface de vigas compostas
Fonte: Araújo (2002)

Segundo Da Silva et al (2009), quanto maior for a rugosidade da superfície de interface, maior será a área de contato entre as duas peças, interferindo assim na transferência por atrito. Também, quanto maior for a sua rugosidade, menor será a interferência causada pelo material pulverulento que, porventura, possa ficar depositado nas saliências da peça concretada.

De acordo com Wight e MacGregor (2011), a transmissão dos esforços ocorre pelas tensões cisalhantes através da interface entre os dois concretos, onde pode ocorrer o deslizamento relativo das interfaces.

Segundo Judice (2002), a resistência ao cisalhamento horizontal das interfaces de concreto tem sido estudada desde os anos 60. Os principais fatores também são a aderência, a rugosidade da ligação, a taxa de armadura na seção transversal da peça e a resistência à compressão do concreto. Entretanto, a influência de cada um desses fatores ainda é questionada.

2.3. CISALHAMENTO NA INTERFACE CONCRETO-CONCRETO

De acordo com Araújo (1997), os principais fatores que interferem na resistência ao cisalhamento na interface concreto-concreto são:

- resistência do concreto – a resistência ao cisalhamento aumenta com o aumento da resistência dos concretos. Caso tenha duas resistências diferentes em uma ligação, a resistência ao cisalhamento será dada pelo concreto de menor resistência;
- aderência entre as peças compostas – caso os elementos apresentem superfície de contato aderente, eles se comportam, inicialmente, como elementos monolíticos. Entretanto, caso não haja aderência, o deslizamento e a separação das peças têm valores muito significativos, havendo também diminuição significativa da resistência última da peça;
- a rugosidade da superfície de contato – a resistência ao deslizamento aumenta com a rugosidade da interface concreto-concreto. Porém, para alguns pesquisadores, a profundidade da rugosidade não tem influência significativa. Para dados de comportamento último, o efeito da rugosidade seria ‘somável’ ao da aderência;
- a armadura transversal – para pequenos deslizamentos, a armadura transversal tem pouca influência na resistência a ligação. Porém, no estado limite último, a armadura transversal age resistindo ao corte e aumentando a resistência por atrito devido às forças normais que são aplicadas a interface.

Para Da Silva et al (2009), além desses fatores citados acima, a tensão normal aparece como um dos fatores que interferem na resistência ao cisalhamento.

Segundo Mendonça (2002), coesão, atrito, engrenamento de partículas na superfície de contato e efeito de pino na peça devido à armadura transversal são os fatores que transferem os esforços de cisalhamento em um plano de deslizamento.

De acordo com Mendonça (2002), quando o plano apresenta-se fissurado, ou seja, não tendo transferência de cisalhamento por adesão, a transferência é feita pelo atrito e pelo engrenamento das rugosidades. Caso o plano não esteja fissurado, a coesão contribui para a transferência dos esforços cisalhantes. Quando ocorre o deslocamento relativo entre as superfícies, acontece o dobramento da armadura, aparecendo o efeito de pino. Esse efeito ocasiona no concreto esforços de tração na região da armadura, acarretando, juntamente com a força de arrancamento, no esfacelamento do concreto que se encontra ao longo da armadura da seção transversal.

Para Araújo (1997), quando, em uma peça composta, são transferidas tensões de cisalhamento por sua interface de ligação, desenvolvem-se tensões de sentido contrário, tendendo a equilibrar as ações. Ao estar sujeito às tensões de cisalhamento, as duas superfícies tendem ao deslizamento na interface. Se a superfície é de natureza rugosa, esse deslizamento acontece concomitante com a separação das peças. Assim, a transferência dos esforços pode ocorrer pela superfície de contato e pela armadura transversal a interface. A Figura 8 ilustra a transferência de esforços na interface de superfície rugosa.

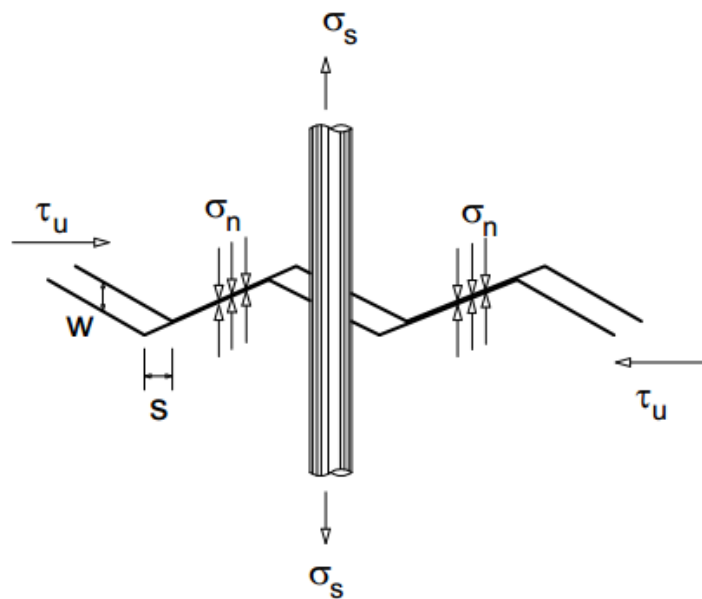


Figura 8 - Transferência de esforços na interface de superfície rugosa
Fonte: Araújo (1997)

Da Silva et al. (2009) destacam que a resistência do concreto interfere na transmissão por ações mecânicas e no efeito de pino da armadura, pois estão associados a resistência à tração do concreto. Na interface concreto-concreto, a resistência ao cisalhamento é dada pelo concreto de menor resistência.

O desempenho estrutural da seção composta é diretamente influenciado pelas tensões de cisalhamento na interface entre os dois concretos. Caso não ocorram deslizamentos na superfície não são ocasionadas alterações no comportamento da seção composta. Entretanto, quando acontecem deslizamentos relativos entre as peças, a contribuição da peça composta passa a ser parcial. Dessa maneira, o projetista busca a transferência total de cisalhamento para poder contar com a seção composta (JUDICE, 2002).

Segundo Araújo (1997), dependendo da consideração tomada pelo engenheiro para a transmissão de esforços na interface concreto-concreto, é feito o dimensionamento da peça. Se for considerado que a peça composta vai colaborar totalmente para a resistência dos esforços, os cálculos podem ser feitos considerando a seção completa no estado limite último. Caso contrário, são realizados os cálculos com colaboração parcial. Garantido a colaboração total no estado de limite último tem-se, automaticamente, total colaboração no estado de utilização. Também pode ser garantida completa colaboração no estado de utilização e fracionário no estado limite último, garantindo assim a transmissão dos esforços somente para o estado de utilização.

2.4. NORMAS PARA CÁLCULO DA RESISTÊNCIA AO ATRITO ENTRE CONCRETO

Para a melhor compreensão da resistência das peças, tanto composta quanto monolítica, foi realizada uma pesquisa das normas nacionais que tratam do assunto.

Para as peças monolíticas, pode-se avaliar a resistência ao cisalhamento pela NBR 6118 (ABNT, 2014), norma brasileira que aborda os projetos de estruturas de concreto. Esta normativa inclui os cálculos para a resistência de peças monolíticas sobre o efeito de cisalhamento direto.

A NBR 9062 (ABNT, 2006) é uma normativa brasileira que trata sobre projeto e execução de estruturas pré-moldadas. Esta norma apresenta cálculos para a determinação da resistência ao cisalhamento em peças compostas.

2.4.1. NBR 6118 (ABNT, 2014)

A norma “Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento” apresenta as equações para determinação da resistência ao cisalhamento para peças monolíticas.

Segundo a norma, as tensões de cisalhamento solicitantes de cálculo τ_{wd} para seções retangulares devem ser calculadas da seguinte forma (Equação 1):

$$\tau_{wd} = \frac{3 v_{sd}}{2 b h} \leq \tau_{Rd} \quad (1)$$

Onde:

τ_{wd} : tensão de cisalhamento solicitante de cálculo por força cortante;

v_{sd} : força solicitante cortante de cálculo;

b : base da peça;

h : altura total da seção transversal da peça;

τ_{Rd} : tensão de cisalhamento resistente de cálculo.

O cálculo da tensão de cisalhamento resistente é apresentado na Equação 2.

$$\tau_{Rd} = 0,3 f_{ctd} \quad (2)$$

Onde:

f_{ctd} : resistência à tração de cálculo do concreto.

A resistência à tração de cálculo do concreto é obtida a partir das Equações 3, 4 e 5 apresentadas a seguir.

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk,inf}}{\gamma_c} \quad (3)$$

$$f_{ctk,inf} = 0,7 f_{ct,m} \quad (4)$$

$$f_{ct,m} = 0,3 f_{ck}^{\frac{2}{3}} \quad (5)$$

Onde:

$f_{ctk,inf}$: resistência de tração característica inferior;

γ_c : coeficiente de segurança de ponderação do concreto;

$f_{ct,m}$: resistência característica a tração média;

f_{ck} : resistência característica a compressão do concreto.

Com as Equações acima apresentadas, torna-se possível o cálculo da tensão de cisalhamento resistente para peças monolíticas.

2.4.2. NBR 9062 (ABNT, 2006)

A norma “Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré-moldado” apresenta as equações para determinar a resistência ao cisalhamento em peças compostas.

Segundo a norma, permite-se adotar a peça como sendo monolítica se a tensão de aderência de cálculo satisfizer as seguintes condições (Equação 6):

$$\tau_{sd} \leq \frac{\beta_s f_{yd} A_s}{b s} + \beta_c f_{ctd} < 0,25 f_{cd} \quad (6)$$

Onde:

τ_{sd} : tensão de aderência de cálculo;

β_s : coeficiente de minoração aplicado à armadura;

f_{yd} : resistência de cálculo da armadura;

A_s : área de armadura transversal;

b : largura da interface;

s : espaçamento da armadura;

β_c : coeficiente de minoração aplicado ao concreto;

f_{cd} : resistência de cálculo à compressão do concreto.

A resistência à tração de cálculo do concreto pode ser obtida pelas Equações 3, 4 e 5 do item 2.4.1. A tensão de aderência de cálculo é apresentada na Equação 7.

$$\tau_{sd} = \frac{F_{md}}{a_v b} \quad (7)$$

Onde:

F_{md} : valor médio de compressão da ligação ao longo do comprimento a_v ;

a_v : distância entre os pontos de momentos nulo e máximo.

A norma apresenta que, para fatores menores ou iguais a 0,2 *A I b s* %, o valor de $\beta_s = 0$ e de $\beta_c = 0,3$, e para valores maiores ou iguais a 0,5 *A I b s* %, o valor de $\beta_s = 0,9$ e de $\beta_c = 0,6$. Para valores intermediários deve ser feita a interpolação linear.

Como nas peças não será utilizada a armadura, a equação da parcela que resiste ao cisalhamento fica reduzida a (Equação 8):

$$\tau_{Rd} = \beta_c f_{ctd} \quad (8)$$

Onde:

τ_{Rd} : tensão resistente de cálculo.

Com as equações acima apresentadas, torna-se possível o cálculo da tensão resistente de cálculo para as peças compostas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e a metodologia empregados nos ensaios experimentais realizados no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Toledo.

Para a realização dos estudos, foram produzidos concretos com resistência característica em torno de 40 Mpa, empregando brita 0 e brita 1, sendo avaliadas além da resistência à compressão axial e trabalhabilidade do concreto, a resistência ao cisalhamento na superfície da interface concreto-concreto.

3.1. DOSAGEM DO CONCRETO

O concreto foi produzido conforme traço em massa de 1:2,17:2,50:0,52 (cimento:areia:brita:a/c) para o concreto de brita 0 (B0) e para o concreto de brita 1 (B1), obtido em Savaris (2014). O concreto de B0 apresenta 56,77% de argamassa e o concreto de B1 57,43%, sendo a variação ocasionada pela diferença do peso específico dos agregados graúdos, os quais apresentam diâmetro máximo característico do agregado (D.M.C.) igual a 9,5 mm para B0, e D.M.C. igual a 19 mm para B1.

3.1.1. Características dos materiais empregados

Na produção dos concretos, foram empregados o cimento tipo CP-V de alta resistência inicial (ARI), a areia natural de rio, e a pedra britada de origem basáltica.

3.1.1.1. Ensaio de granulometria dos agregados

O ensaio de granulometria da areia e da brita foi realizado seguindo as recomendações da NBR NM 248 (ABNT, 2003) e da NBR 7211 (ABNT, 2009).

A curva granulométrica da areia é apresentada no apêndice A, sendo classificada como fina por apresentar módulo de finura (M.F.) igual a 1,65.

Os resultados dos ensaios de granulometria dos agregados graúdos são apresentados nos apêndices B e C, sendo classificados em brita 0, com D.M.C. igual a 9,5 mm e brita 1, com D.M.C. igual a 19 mm.

3.1.1.2. Ensaio de massa específica dos agregados

O ensaio de massa específica dos agregados foi realizado de acordo com as NBR NM 52 (ABNT, 2009) e NBR NM 53 (ABNT, 2009), sendo, respectivamente, para a areia e para brita, e seus resultados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Peso específico dos agregados

Descrição	Unidade	Peso Específico
Areia	Kg/dm ³	2,64
B0	Kg/dm ³	2,84
B1	Kg/dm ³	2,93

3.1.2. Produção do concreto

Para a produção do concreto, foi utilizada a betoneira de eixo vertical com volume de cuba de 220 litros, disponível no Laboratório de Materiais de Construção, sendo produzidos aproximadamente 60 litros de concreto com cada tipo de agregado, divididos em três etapas de betonadas, resultando em 18 corpos de prova

para ensaios de compressão axial, 18 corpos de prova para ensaios de tração por compressão diametral e 18 peças para ensaios de cisalhamento direto.

Na Tabela 2 são apresentadas as quantidades dos materiais utilizados para a produção das peças monolíticas de B0 e B1, sendo a quantidade de água corrigida de acordo com a umidade do agregado miúdo.

Tabela 2 - Massa dos materiais utilizados para a produção dos concretos das peças monolíticas de B0 e de B1

Descrição	Unidade	Quantidade	
		B0	B1
Umidade	%	4,057	4,057
Cimento	Kg	9,630	11,556
Areia	Kg	21,747	26,096
Brita	Kg	12,056	14,468
Água	Kg	4,160	4,992

Após a produção do concreto, foi realizado o ensaio de abatimento do tronco de cone, de acordo com a NBR NM 67 (ABNT, 1998), e foram moldados os corpos de prova conforme recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2003). Na moldagem das peças foi realizado o adensamento em duas camadas com 45 golpes distribuídos uniformemente por camada (15 golpes a cada terço da peça).

A moldagem das peças compostas foi realizada em duas etapas, sendo feita uma betonada de concreto de B0 e uma de B1 para cada etapa, e as massas dos materiais utilizados estão apresentadas na Tabela 3, com a quantidade de água sendo corrigida de acordo com a umidade do agregado miúdo.

Tabela 3 - Massa dos materiais utilizados para produção dos concretos das peças compostas de B0 e de B1

Descrição	Unidade	Quantidade			
		B0 – 1ª etapa	B0 – 2ª etapa	B1 – 1ª etapa	B1 – 2ª etapa
Umidade	%	3,474	3,293	3,474	3,293
Cimento	kg	12,326	9,630	11,556	9,630
Areia	kg	27,680	21,587	25,950	21,587
Brita	kg	15,432	12,056	14,468	12,056
Água	kg	5,480	4,319	5,138	4,319

Os processos para o ensaio de trabalhabilidade, moldagem dos corpos de prova e das peças compostas foram realizados como exemplificado para as peças monolíticas.

3.2. ELEMENTOS PARA ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO

Para a moldagem das peças, foram confeccionadas fôrmas de MDF (sigla em inglês para placa de fibra de média densidade) revestidas com material laminado com dimensões internas de 300x100x100 mm³. Na Figura 9 são apresentas as dimensões das fôrmas utilizadas para a concretagem das peças.

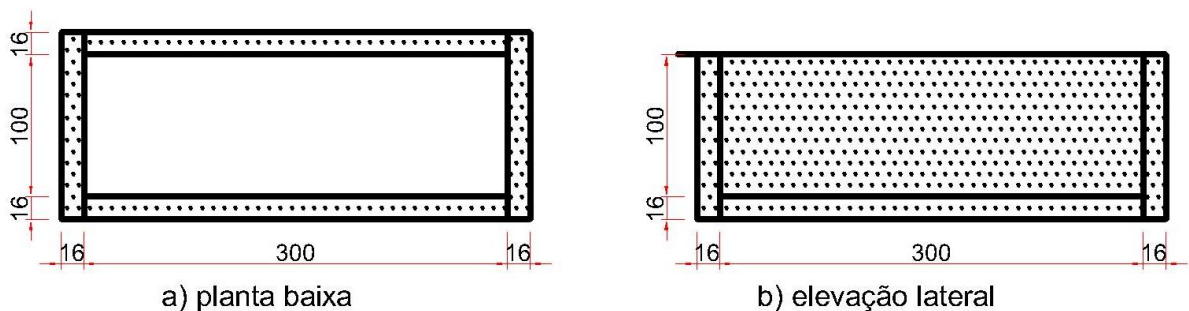


Figura 9 - Planta de fôrmas
Fonte: O autor

3.2.1. Peças monolíticas

A concretagem das peças monolíticas foi realizada em uma única etapa, sendo, para cada tipo de brita, produzidas 3 peças para ensaio de cisalhamento direto, 3 corpos de prova para ensaio de compressão axial e 3 corpos de prova para ensaio de tração por compressão diametral.

Para direcionar a ruptura da peça, a seção transversal foi reduzida nos planos cisalhantes, empregando tiras de isopor com aproximadamente 10 mm de espessura cada, na parte interna da fôrma, conforme apresentado na Figura 10.

Dessa maneira, a seção transversal foi diminuída para uma largura de aproximadamente 80 mm.



Figura 10 - Fôrma para as peças monolíticas com seção transversal reduzida por tiras de isopor

Fonte: O autor

Para facilitar na diferenciação, as peças foram marcadas pela sigla B0-M para as peças monolíticas de B0 e B1-M para as peças monolíticas de B1.

3.2.2. Peças compostas

A concretagem das peças compostas foi realizada em duas etapas, sendo produzidas, para cada tipo de brita, 6 peças para ensaio de cisalhamento direto, 6 corpos de prova para ensaio de compressão axial e 6 corpos de prova para ensaio de tração por compressão diametral.

Para se tornar possível a concretagem das peças compostas em duas etapas foram utilizadas as fôrmas dos elementos monolíticos introduzindo peças internamente, dividindo os elementos em três partes iguais, sendo concretado inicialmente o primeiro e o terceiro terço da peça, com comprimento igual a 100 mm, conforme apresentado na Figura 11.

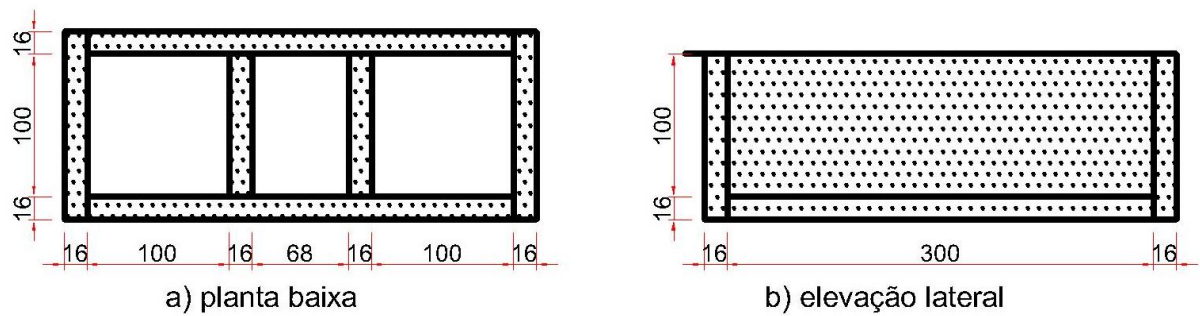


Figura 11 - Planta de fôrmas para a primeira etapa de concretagem das peças compostas
Fonte: O autor

As placas divisórias foram travadas para evitar seu deslocamento devido à pressão exercida pelo concreto. A Figura 12 apresenta a disposição da fôrma durante a primeira etapa de concretagem das peças compostas.



Figura 12 - Disposição da fôrma das peças compostas durante a execução da primeira etapa de concretagem
Fonte: O autor

3.2.2.1. Concretagem da segunda etapa das peças compostas: superfície de rugosidade lisa

Para a segunda etapa de concretagem, a qual foi realizada um dia após a primeira, foram retiradas as placas divisórias e concretado o segundo terço da peça.

Assim, o primeiro tipo de rugosidade obtido foi formado pela superfície da fôrma, sendo a interface de concreto-concreto lisa.

Antes da segunda etapa de concretagem, foram introduzidas tiras de isopor, como feito nas peças monolíticas, para a diminuição da seção transversal da peça, conforme ilustrado na Figura 13.



Figura 13 - Disposição da peça com inserção das tiras de isopor nas paredes da fôrma para a segunda etapa de concretagem das peças
Fonte: O autor

Após a colagem das tiras de isopor para induzir a seção de corte, foi executada a concretagem do segundo terço da peça, sendo apresentada na Figura 14.



Figura 14 - Disposição da peça após a segunda etapa de concretagem
Fonte: O Autor

Para esse tipo de rugosidade foram executadas 3 peças para a B0 e 3 peças para a B1, sendo nomeadas de B0-CL e B1-CL.

3.2.2.2. Concretagem da segunda etapa das peças compostas: superfície de rugosidade rugosa

A segunda interface de concreto-concreto utilizado foi a rugosa, sendo obtida pela exposição do agregado graúdo. Para a obtenção dessa rugosidade, cerca de 4 horas após a primeira etapa de concretagem, com o auxílio de uma escova com cerdas de aço, a superfície de concreto foi escovada, retirando toda a argamassa de concreto superficial e deixando exposto o agregado graúdo.

Para se tornar possível a exposição das britas na superfície da peça, como apresentado na Figura 15, o arrasamento do concreto na primeira etapa de concretagem foi executado acima da altura da fôrma, permitindo então a raspagem da argamassa superficial e a consequente exposição do agregado graúdo.



Figura 15 - Superfície da peça de B0 após tratamento superficial para exposição do agregado graúdo

Fonte: O autor

Na Figura 16 pode ser observada a rugosidade da superfície formada pela exposição do agregado graúdo.

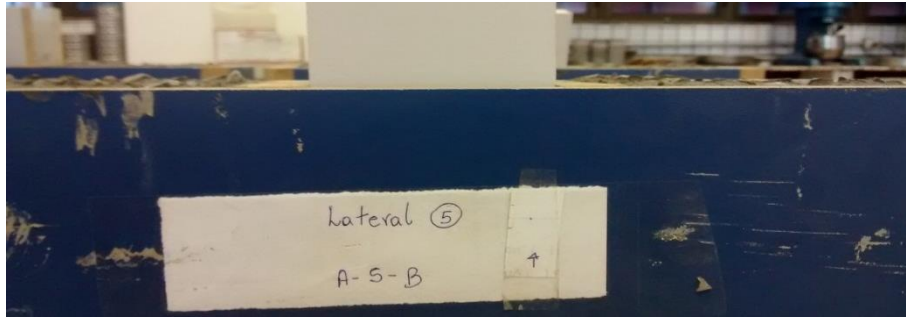


Figura 16 – Rugosidade da superfície formada pela exposição do agregado graúdo nas peças de B0

Fonte: O autor

A Figura 17 apresenta a superfície das peças de B1 após o tratamento para exposição do agregado graúdo.



Figura 17 - Superfície da peça de B1 após tratamento superficial para exposição do agregado graúdo

Fonte: O autor

Na Figura 18 pode ser observada a rugosidade da superfície formada pela exposição do agregado graúdo.



Figura 18 - Rugosidade da superfície formada pela exposição do agregado graúdo nas peças de B1

Fonte: O autor

Antes da segunda etapa de concretagem, as peças foram rotacionadas, ficando a superfície rugosa voltada para a região central da peça, inserindo as tiras de isopor, conforme apresentado na Figura 19, e posteriormente realizando a segunda etapa de concretagem.

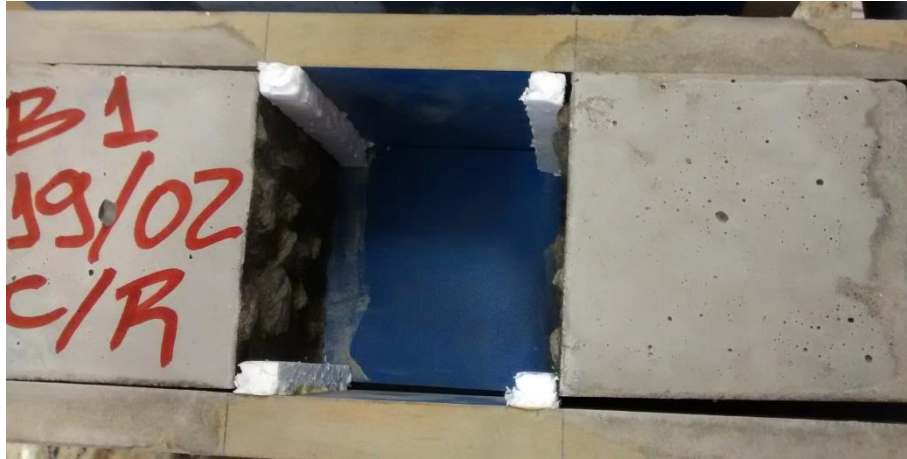


Figura 19 - Peça de B1 após o primeiro e o terceiro terço da peça estar com a superfície rugosa virada para o segundo terço da peça, com inserção das tiras de isopor

Fonte: O autor

Para esse tipo de rugosidade foram executadas 3 peças para B0 e 3 peças para B1, sendo nomeadas de B0-CR e B1-CR.

3.2.3. Tratamento dos corpos de prova e das peças de concreto

Os corpos de prova e as peças de ensaio de cisalhamento direto foram submetidas ao mesmo processo de cura e durante o mesmo período, garantindo assim que não houvesse alteração da resistência do concreto das peças para com os corpos de prova.

O capeamento os corpos de prova e das peças foi realizado com argamassa, evitando possíveis desnivelamentos da superfície de concreto, reduzindo variações dos resultados durante os ensaios de compressão axial dos corpos de prova e de cisalhamento direto.

3.2.4. Ensaio de cisalhamento direto

Após 28 dias da concretagem (considerando a segunda etapa de concretagem para as peças compostas), foram realizados os ensaios de cisalhamento direto das peças, compressão axial e compressão diametral dos corpos de prova para a respectiva determinação da resistência característica à tração e à compressão dos concretos.

Todos os ensaios de cisalhamento direto e de compressão axial e diametral dos corpos de prova foram realizados na Máquina Universal de Ensaios (Figura 20).



Figura 20 - Máquina Universal de Ensaios
Fonte: O autor

Para o ensaio de cisalhamento direto, as peças foram apoiadas em chapas de aço com dimensões de $100 \times 100 \times 30 \text{ mm}^3$, para distribuir de modo uniforme a força aplicada pela máquina à peça (chapa de aço central), e para permitir o movimento de translação da parte central para com as extremidades, atuando assim o efeito de corte na peça (chapas de aço laterais), como apresentado na Figura 21.

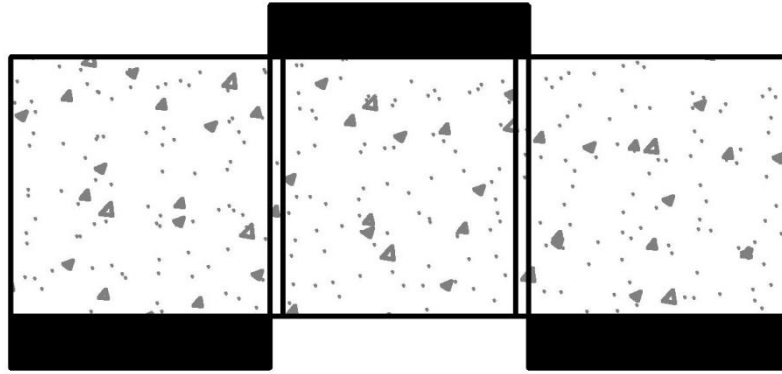


Figura 21 - Peça com chapas de aço para a realização dos ensaios de cisalhamento direto

Fonte: O autor

A Máquina Universal de Ensaio foi programada para uma velocidade de deslocamento de 1 mm/min, sendo interrompido o ensaio quando o alívio de tensão da prensa fosse de 60% da carga aplicada.

Após os ensaios, a prensa emitiu um relatório com os dados das forças de ruptura das peças e, fazendo a medição manual da área das peças cisalhadas, foi possível calcular as tensões de cisalhamento.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão expostos os resultados dos ensaios experimentais apresentados no capítulo 3 e os resultados dos cálculos das normas apresentados no capítulo 2.

Para os ensaios experimentais, primeiramente serão apresentados os resultados dos ensaios de trabalhabilidade do concreto e os resultados dos ensaios de compressão axial e compressão diametral dos corpos de prova, os quais determinam as resistências à compressão e à tração do concreto. Após a caracterização dos concretos, serão apresentados os resultados dos ensaios de cisalhamento direto, os quais estimam as resistências últimas para as peças monolíticas e para as peças compostas com interface concreto-concreto lisa e rugosa. Posteriormente, os resultados das peças compostas serão comparados com os resultados das peças monolíticas, estimando a influência na moldagem das peças na resistência ao cisalhamento.

Com as equações das normas, serão estimadas as resistências teórica última ao cisalhamento para as peças monolíticas e para as peças compostas, comparando com os resultados experimentais.

4.1. PROPRIEDADES DO CONCRETO

A Tabela 4 apresenta os resultados de trabalhabilidade, resistência característica à compressão (f_{ck}), resistência característica à compressão média ($f_{ck,m}$), resistência característica à tração (f_{ct}) e resistência característica à tração média ($f_{ct,m}$) para cada um dos concretos.

Tabela 4 – Características dos concretos moldados com B0 e B1

Peças	Etapa de concretagem	Trabalhabilidade (cm)	f_{ck} (MPa)	$f_{ck,m}$ (MPa)	f_{ctk} (MPa)	$f_{ctk,m}$ (MPa)
BO-M	Única	8	36,87	41,97	4,86	4,89
			43,53		5,00	
			45,51		4,81	
B1-M	Única	9	45,26	45,40	4,51	4,24
			46,18		4,33	
			44,77		3,88	
BO-C	1ª Etapa	5,5	41,91	42,62	5,18	4,35
			42,31		4,14	
			43,63		3,73	
B1-C	1ª Etapa	7	44,72	46,28	4,57	4,23
			47,38		3,62	
			46,73		4,51	
BO-C	2ª Etapa	13	47,99	47,40	3,57	4,49
			48,11		5,00	
			46,10		4,92	
B1-C	2ª Etapa	17	44,64	43,23	4,18	4,24
			43,81		4,40	
			41,24		4,14	

Pelos resultados, verifica-se uma grande variação na trabalhabilidade dos concretos, principalmente na segunda etapa de concretagem das peças compostas. Essa variação pode ter sido ocasionada pela utilização de areia do fundo do reservatório com maior percentual de finos, tendo um concreto com argamassa mais fina e conseqüentemente maior trabalhabilidade.

Os resultados das resistências características à compressão média dos concretos foram todos superiores a 40 MPa, como estimado na metodologia.

A resistência à tração apresentou resultados acima da estimativa da norma NBR 6118 (ABNT, 2014), calculada através da Equação 5, com valor máximo igual a 3,93 MPa.

4.2. RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO POR ENSAIO EXPERIMENTAL

A resistência ao cisalhamento das peças de concreto monolíticas e compostas foi determinada através da força máxima obtida nos ensaios dividida por dois, devido à existência de dois planos cisalhantes na peça.

Para a determinação da área de ruptura, as dimensões da área cisalhada da peça foram medidas com o auxílio de um paquímetro, conforme apresentado na Figura 22. Com as informações da área cisalhada e da carga de ruptura, foi possível calcular a tensão de ruptura de cisalhamento das peças.

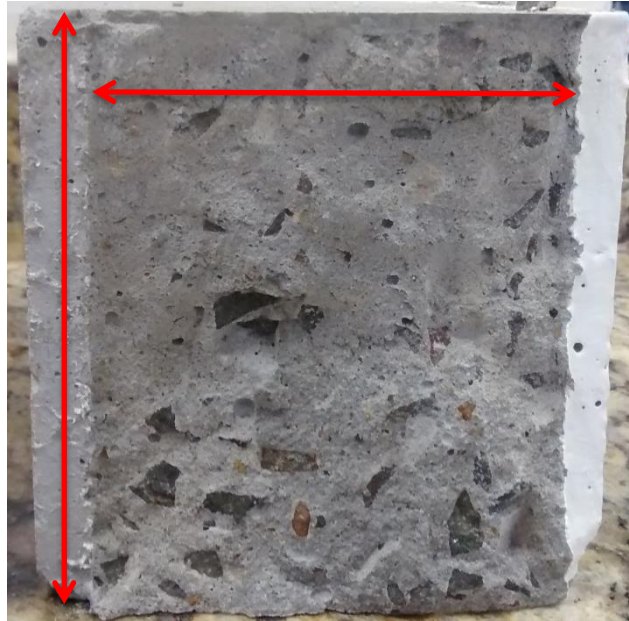


Figura 22 - Área da interface concreto-concreto da peça cisalhada
Fonte: O autor

A partir das tensões de cisalhamento obtidas experimentalmente, foram calculadas as tensões de cisalhamento normalizadas, visto que houve variação das resistências características dos concretos, dividindo a tensão de cisalhamento pela raiz quadrada do f_{ck} , como apresentado na Equação 9.

$$\tau_n = \frac{\tau}{\sqrt{f_{ck}}} \quad (9)$$

Onde:

τ_n : tensão normalizada.

A seguir, serão apresentados os resultados dos ensaios de cisalhamento para as peças de B0-M, B1-M, B0-CL, B1-CL, B0-CR e B1-CR.

4.2.1. Peças monolíticas

Na Tabela 5 são apresentados os resultados da resistência característica do concreto ($f_{ck,m}$), força de ruptura (F_u), área cisalhada, tensão de cisalhamento (τ), tensão de cisalhamento média (τ_m), tensão normalizada (τ_n) e tensão normalizada média ($\tau_{n,m}$) das peças monolíticas. Devido a uma falha durante o ensaio da terceira peça de B0-M os resultados foram comprometidos, sendo eliminada esta amostra.

Tabela 5 - Resultados dos ensaios das peças de B0-M e B1-M

Peças	$f_{ck,m}$ (MPa)	F_u (KN)	Área (cm ²)	τ (MPa)	τ_m (MPa)	τ_n (MPa)	$\tau_{n,m}$ (MPa)
B0-M	41,97	106,15	79,43	13,36	12,45	2,06	1,92
		93,90	81,43	11,53		1,78	
		108,85	79,28	13,73		2,04	
B1-M	45,40	89,86	78,80	11,40	12,85	1,69	1,91
		105,41	78,61	13,41	1,99		

Verifica-se que não houve variação significativa na resistência ao cisalhamento das peças de concreto monolíticas, sendo as tensões normalizadas média de ruptura iguais a 1,92 MPa e 1,91 MPa para as peças de B0-M e B1-M, respectivamente.

4.2.2. Peças compostas

4.2.2.1. Peças compostas com interface concreto-concreto lisa

Durante o processo de desforma das peças monolíticas com interface lisa houve a ruptura das peças na interface, como apresentado na Figura 23. Assim, verifica-se que a resistência ao cisalhamento das peças de B0-CL e B1-CL são muito baixas.

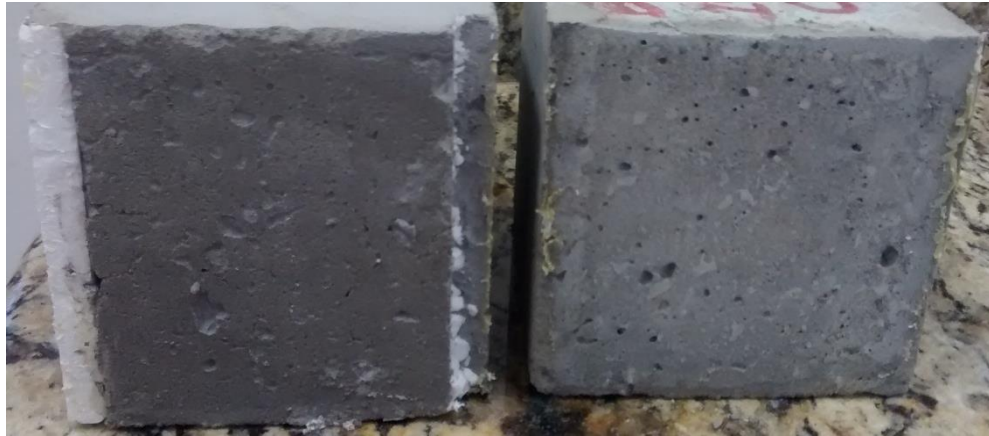


Figura 23 - Ruptura da ligação entre as superfícies de contato das peças de B0-CL e de B1-CL após a desforma

Fonte: O autor

De acordo com Araújo (1997), a aderência é um dos fatores que interferem na resistência ao cisalhamento da peça, e havendo a ausência da mesma, ocorrerá uma significativa diminuição da resistência última da peça.

4.2.2.2. Peças compostas com interface concreto-concreto rugosa

Os resultados da resistência característica do concreto, força de ruptura, área cisalhada, tensão de cisalhamento, tensão de cisalhamento média, tensão normalizada e tensão normalizada média das peças compostas com interface concreto-concreto rugosa são apresentados na Tabela 6. De acordo com Araújo (1997), em uma ligação composta, a resistência ao cisalhamento será dada pelo concreto de menor resistência, sendo adotado, portanto, o menor f_{ck} da peça para o cálculo da tensão normalizada.

Tabela 6 - Resultados dos ensaios das peças de B0-CR e B1-CR

Peças	$f_{ck,m}$ (MPa)	Fu (KN)	Área (cm ²)	τ (MPa)	τ_{m} (MPa)	τ_n (MPa)	$\tau_{n,m}$ (MPa)
B0-CR	42,62	12,09	81,21	1,49	1,82	0,23	0,28
		14,66	83,91	1,75		0,27	
		18,46	82,61	2,23		0,34	
B1-CR	43,23	22,75	85,61	2,66	3,32	0,40	0,51
		28,01	83,59	3,35		0,51	
		33,49	84,47	3,96		0,60	

Analisando os resultados, verifica-se que a tensão normalizada de ruptura das peças de B0-CR equivale a 55% da tensão de ruptura normalizada das peças de B1-CR.

Essa resistência superior pode ser explicada pela maior granulometria do agregado graúdo, que segundo Araújo (1997), é responsável pela maior rugosidade na interface concreto-concreto, aumentando a resistência ao cisalhamento, e de acordo com Mendonça (2002), a maior resistência ao cisalhamento ocorre pelo maior atrito e pelo maior engrenamento das partículas das peças.

4.3. COMPARAÇÃO DAS PEÇAS MONOLÍTICAS COM AS PEÇAS COMPOSTAS COM INTERFACE CONCRETO-CONCRETO RUGOSAS

Com os resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento das peças monolíticas e das peças compostas com interface concreto-concreto rugosas, foi possível comparar suas resistências últimas, apresentando as análises das peças de B0-M com as peças de B0-CR e das peças de B1-M com as peças de B1-CR na Tabela 7.

Tabela 7 - Comparativo dos resultados das peças monolíticas com as peças compostas com interface concreto-concreto rugosa

Descrição	$\tau_{n,m}$ (MPA)	τ_c / τ_m
B0-M	1,92	14,54%
B0-CR	0,28	
B1-M	1,91	26,52%
B1-CR	0,51	

Verifica-se que a resistência última ao cisalhamento das peças compostas apresentou resultados inferiores às peças monolíticas, correspondentes à 14,54% para peças de B0 e 26,52% para peças de B1.

A resistência das peças de B1-CR são quase duas vezes superior a resistência das peças de B0-CR e a resistência das peças compostas são muito inferiores às peças monolíticas.

Analisando a maneira de ruptura das peças, as Figuras 24 e 25 apresentam, respectivamente, uma peça de B0-M e uma peça de B1-M após o ensaio de cisalhamento direto, onde ocorreu a ruptura na região de diminuição da seção transversal da peça. Observa-se pelas imagens que as rupturas não foram lineares, tendo variação da fissura ao longo da largura da região de menor seção transversal, podendo-se verificar que essa diminuição da seção transversal teve influência significativa no plano de corte da peça.



Figura 24 - Região de corte na peça de B0-M
Fonte: O autor

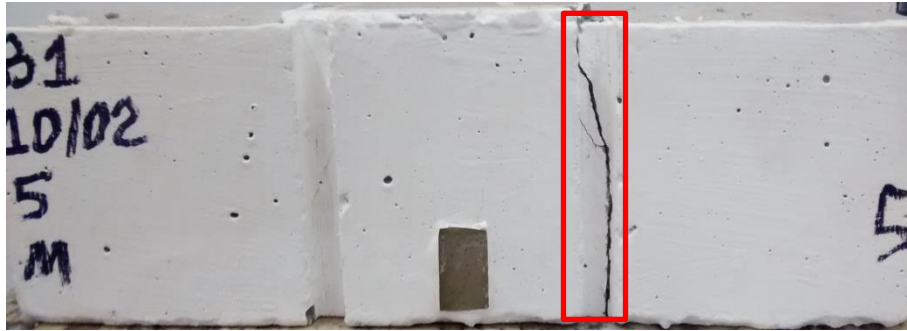


Figura 25 - Região de corte na peça de B1-M
Fonte: O autor

As Figuras 26 e 27 apresentam, respectivamente, uma peça de B0-CR e uma peça de B1-CR após o ensaio de cisalhamento direto, onde ocorreu a ruptura na ligação entre os terços da peça, podendo-se analisar que a diminuição da seção transversal da peça não influenciou na ruptura, como ocorreu nas peças monolíticas.



Figura 26 - Região de corte na peça de B0-CR
Fonte: O autor



Figura 27 - Região de corte na peça de B1-CR
Fonte: O autor

Analisando as interfaces das peças de B0-M com B0-CR e B1-M com B1-CR após a ruptura por cisalhamento, verifica-se nas Figuras 28 e 29 que nas peças

monolíticas ocorreu a ruptura do concreto enquanto nas peças compostas ocorreu o descolamento da superfície de contato.



Figura 28 - Área cisalhada das peças: a) B0-M; b) B0-CR
Fonte: O autor

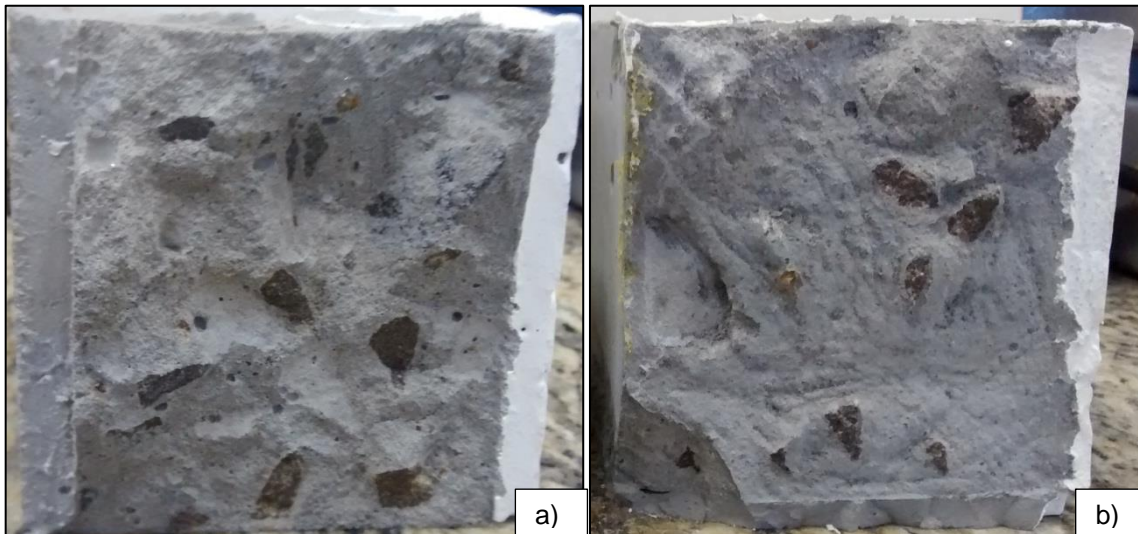


Figura 29 - Área cisalhada das peças: a) B1-M; b) B1-CR
Fonte: O autor

4.4. RESISTÊNCIA TEÓRICA AO CISALHAMENTO

4.4.1. Resistência teórica ao cisalhamento para peças compostas

Os resultados de tensão de cisalhamento foram comparados com as estimativas da norma NBR 9062 (ABNT, 2006), adotando coeficiente de minoração igual a 1,0 e utilizando os valores da resistência a tração média do concreto, $f_{ct,m}$, obtidos pela Equação 5, e da resistência à tração característica do concreto, $f_{ct,k}$ obtida experimentalmente.

$$\tau_{Rd} = \beta_c f_{ct} \quad (8)$$

Onde:

β_c : coeficiente de minoração aplicado ao concreto, adotado igual a 0,3;

$f_{ct,m}$: 3,66 MPa para B0 e 3,70 MPa para B1;

$f_{ct,k}$: 4,35 MPa para B0 e 4,23 MPa para B1.

A Tabela 8 apresenta os valores da resistência ao cisalhamento experimental e os calculados pela Equação 8 utilizando os valores de $f_{ct,m}$ e $f_{ct,k}$.

Tabela 8 - Tensões de cisalhamento resistente para as peças compostas

Descrição	Método de cálculo	Unidade	Brita 0	Brita 1
τ_{Rd}	$f_{ct,m}$	MPa	1,10	1,11
τ_{Rd}	$f_{ct,k}$	MPa	1,31	1,27
τ_{m}	experimental	MPa	1,82	3,32

Como pode ser observado nos resultados acima apresentados, ocorre a variação da resistência ao cisalhamento obtidos pela Equação 8 devido ao valor de $f_{ct,m}$ ser uma estimativa da resistência à tração do concreto, estando a favor da segurança quando se calcula a resistência ao cisalhamento adotando os valores de $f_{ct,m}$ ao invés dos valores de $f_{ct,k}$.

As resistências das peças do ensaio experimental são superiores às resistências calculadas pela norma, sendo a resistência das peças de B0-CR superior a 65% da resistência de cálculo pela B0- $f_{ct,m}$ e de 39% para a resistência adotando B0- $f_{ct,k}$. Pode ser analisado na Tabela 6 que a menor resistência de ensaio

para as peças de B0-CR foi de 1,49 MPa, a qual é superior à resistência teórica apresentada na tabela acima. Observa-se que a resistência de cálculo sempre se portou inferior à resistência de ensaio, ou seja, a peça resiste para aquilo que foi calculada.

Para as peças de B1 observa-se que os resultados experimentais tiveram resistência superior a 2,5 vezes em comparação com o resultado de $B1-f_{ct,k}$ e de 3 vezes para $B1-f_{ct,m}$. A menor resistência ao cisalhamento das peças de B1-CR apresentada na Tabela 6 é de 2,66 MPa, sendo superior a 2 vezes a resistência ao cisalhamento calculada pela norma, para ambas as resistências a tração.

Analisa-se que a grande margem de segurança garantida pela norma para as peças de B1 acontece pela equação não ter nenhuma variável que envolve a granulometria do agregado graúdo, o qual aumenta a rugosidade da interface concreto-concreto e, segundo Araújo (1997), conseqüentemente aumenta a resistência ao cisalhamento das peças.

4.4.2. Resistência teórica ao cisalhamento para peças monolíticas

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), a tensão de cisalhamento resistente das peças monolíticas pode ser calculada pela Equação 2 a partir de valores de resistência característica do concreto.

$$\tau_{Rd} = 0,3 f_{ct} \quad (2)$$

Onde:

τ_{Rd} : tensão de cisalhamento resistente de cálculo;

$f_{ct,m}$: 3,62 MPa para B0 e 3,82 MPa para B1;

$f_{ct,k}$: 4,89 MPa para B0 e 4,24 MPa para B1.

Observa-se que, ao adotar o coeficiente $\beta_c=0,3$ nos cálculos das peças compostas, a equação para a determinação das tensões de cisalhamento resistente se torna a mesma equação para o cálculo das peças monolíticas.

A Tabela 9 apresenta os valores da resistência ao cisalhamento experimental e os calculados pela Equação 2 utilizando os valores de $f_{ct,m}$ e $f_{ct,k}$.

Tabela 9 – Tensões de cisalhamento resistente para as peças monolíticas

Descrição	Método de cálculo	Unidade	Brita 0	Brita 1
τ_{Rd}	$f_{ct,m}$	MPa	1,09	1,15
τ_{Rd}	$f_{ct,k}$	MPa	1,47	1,27
$\tau_{,m}$	experimental	MPa	12,45	12,85

Da mesma maneira como apresentado para as peças compostas, nas peças monolíticas ocorreu a variação da resistência ao cisalhamento calculado pelas normas, sendo a resistência calculada adotando os valores de $f_{ct,m}$ mais segura do que se fossem adotados os valores de $f_{ct,k}$.

Observa-se que a resistência ao cisalhamento das peças monolíticas por experimento são, no mínimo, 8 vezes mais resistentes do que a resistência considerada no cálculo, percebendo-se que a margem de segurança para os cálculos é muito elevada.

5. CONCLUSÕES

Com este estudo, ao fim das análises realizadas, pode-se chegar a algumas conclusões a respeito dos resultados obtidos:

- a granulometria do agregado graúdo não apresentou influência na resistência ao cisalhamento direto do concreto para as peças monolíticas;
- comparando a resistência ao cisalhamento de cálculo estimada pelas normas brasileiras à resistência ao cisalhamento obtida experimentalmente, nota-se que a primeira apresentou resultados inferiores, o que garante a segurança do dimensionamento;
- a resistência ao cisalhamento nas peças compostas com interface concreto-concreto lisas foi praticamente nula;
- a resistência ao cisalhamento das peças compostas com interface concreto-concreto rugosas foi inferior à resistência ao cisalhamento das peças monolíticas, tendo resistência inferior a 27% para as peças de B1 e de 15% para as peças de B0;
- a resistência ao cisalhamento das peças de B1-CR foi superior à resistência ao cisalhamento das peças de B0-CR, sendo a resistência das peças de B0-CR em torno de 55% da resistência das peças de B1-CR;
- a resistência ao cisalhamento experimental é superior à resistência de cálculo para as peças compostas de B0, sendo assim garantida a resistência da peça;
- a resistência ao cisalhamento de cálculo para as peças de B1-CR é mais conservativa do que para as peças de B0-CR.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com este trabalho, pode-se chegar a algumas sugestões para trabalhos futuros, que são:

- utilizar armadura entre as interfaces de concreto-concreto adotando peças compostas com interface lisa e rugosa, comparando-as com peças monolíticas;
- trabalhar com peças compostas com interface concreto-concreto rugosa variando o volume de brita no traço do concreto;
- trabalhar com peças compostas com interface concreto-concreto rugosa, com variação na granulometria dos agregados dos concretos dentro da mesma peça.

7. REFERÊNCIAS

ARAÚJO, Daniel de Lima. **Cisalhamento entre viga e laje pré-moldadas ligadas mediante nichos preenchidos com concreto de alto desempenho**. 2002. 319 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

ARAÚJO, Daniel de Lima. **CISALHAMENTO NA INTERFACE ENTRE CONCRETO PRÉ-MOLDADO E CONCRETO MOLDADO NO LOCAL EM ELEMENTOS SUBMETIDOS À FLEXÃO**. 1997. 229 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

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

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto: Especificação**. Rio de Janeiro, 2009.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9062: Projeto e Execução de Estruturas de Concreto Pré-Moldado**. Rio de Janeiro, 2006.

DA SILVA, I. M. et al. **Aderência entre superfícies de concreto de peças executadas em duas etapas**. IBRACOM, Curitiba, v. 51, 2009.

EL DEBS, M. K. **Concreto pré-moldado: fundamentos e aplicações.** São Carlos: EESC-USP, 2000.

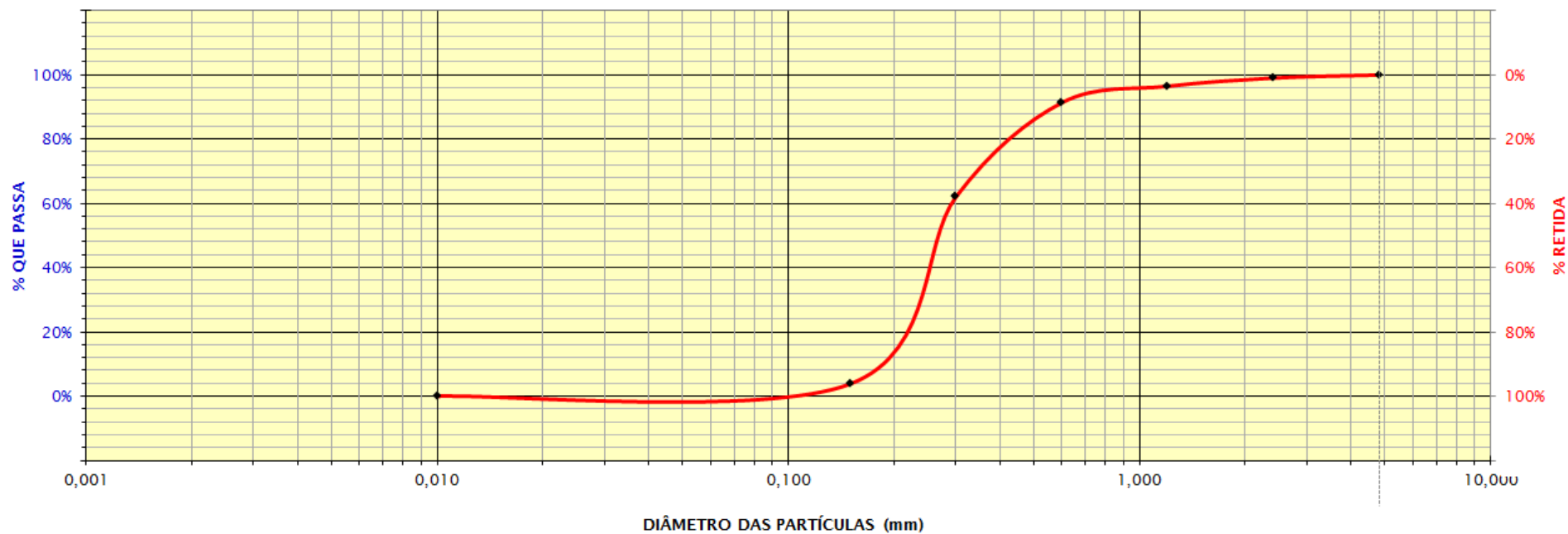
JUDICE, Flávia Moll de Souza. **COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO ENTRE LAJES E VIGAS PRÉ-FABRICADAS FEITA COM NICHOS PREENCHIDOS NO LOCAL.** 2002. 413 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

MENDONÇA, Emílio César Gonçalves de. **RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE NICHOS DE CONCRETO UTILIZADOS NA LIGAÇÃO LAJE-VIGA EM ESTRUTURAS PRÉ-MOLDADAS.** 2002. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

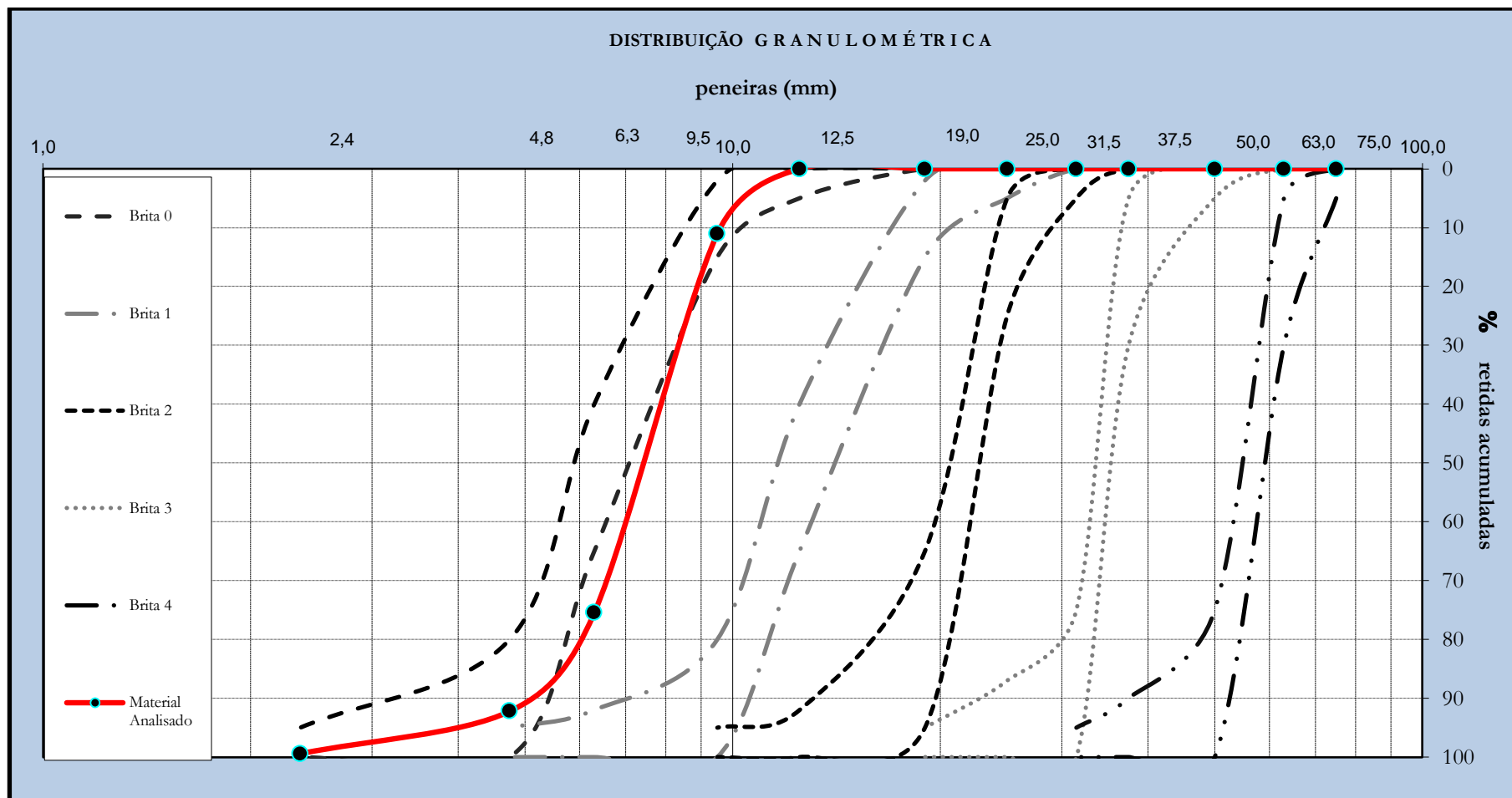
SAVARIS, Gustavo. **ESTUDO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO AUTO ADENSÁVEL.** 2014. Qualificação de Doutorado – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

WIGHT, J.K.; MACGREGOR, J.G. **Reinforced Concrete: mechanics and design.** 6th ed. New Jearsey, Pearson.

APÊNDICE A – CURVA GRANULOMÉTRICA DA AREIA



APÊNDICE B – CURVA GRANULOMÉTRICA DA B0



APÊNDICE C – CURVA GRANULOMÉTRICA DA B1

