

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

EDUARDO LOVERA HIRANO

**INFLUENCIA DA TAXA DE ARMADURA TRANSVERSAL NA RESISTÊNCIA AO
CISALHAMENTO DIRETO DOS CONCRETOS CONVENCIONAL E
AUTOADENSÁVEL**

TOLEDO

2021

EDUARDO LOVERA HIRANO

**INFLUENCIA DA TAXA DE ARMADURA TRANSVERSAL NA RESISTÊNCIA AO
CISALHAMENTO DIRETO DOS CONCRETOS CONVENCIONAL E
AUTOADENSÁVEL**

**Influence of the transverse reinforcement ratio on direct shear strength of
conventional and self-compacting concretes**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador: Prof. Dr. Gustavo Savaris

TOLEDO

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

EDUARDO LOVERA HIRANO

**INFLUENCIA DA TAXA DE ARMADURA TRANSVERSAL NA RESISTÊNCIA AO
CISALHAMENTO DIRETO DOS CONCRETOS CONVENCIONAL E
AUTOADENSÁVEL**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 02 de Dezembro de 2021

Gustavo Savaris (Orientador)
Doutor em Engenharia Civil
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Toledo

Rodny Jesus Mendoza Fakhye
Doutor em Métodos Numéricos para Engenharia
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Toledo

Fúlvio Natércio Feiber
Doutor em Engenharia de Produção
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Toledo

TOLEDO

2021

Dedico este trabalho àqueles que persistem.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu pai que sempre batalhou muito para que eu pudesse seguir meus estudos.

Um agradecimento especial ao meu sócio, amigo e irmão, Éric. Obrigado por não desistirem de me incentivar. Sem vocês não teria acontecido.

Mãe, obrigado por me ouvir e me ajudar nos meus dias mais escuros.

À pessoa mais parceira que tive ao meu lado na graduação. Sisti, você é mais que um irmão pra mim. Sempre lembrarei das noites em claro, dos perrengues que a faculdade nos proporcionou e que sempre, de alguma forma, juntos nos divertimos.

Para a minha pessoa favorita e meu amor, Isadora, eu deixo aqui marcado o quanto você me ajudou a me curar. Obrigado pelo carinho, atenção e por todo o apoio que você me deu.

Agradeço também ao professor Dr. Gustavo Savaris por ter me auxiliado em toda essa jornada.

Aos integrantes da banca Dr. Rodnny e MSc. Fulvio, meus agradecimentos pelas considerações e contribuições ao trabalho.

À todos aqueles que apoiam as pessoas que estão passando por tempos escuros em sua volta, continuem. Aos que fizeram comigo e não coloquei aqui, pode ter certeza que eu sei e me recordo. Muito obrigado.

“No tree, it is said, can grow to heaven unless its
roots reach down to hell.”
— Carl G. Jung.

RESUMO

HIRANO, Eduardo L.. INFLUÊNCIA DA TAXA DE ARMADURA TRANSVERSAL NA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DIRETO DOS CONCRETOS CONVENCIONAL E AUTOADENSÁVEL. 44 f. Trabalho de Conclusão de Curso – COECI - COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo - PR, 2021.

O Concreto Autoadensável (CAA) veio como uma solução para a demanda por tecnologias de concreto que conseguissem atender integralmente aos elementos de concreto com alta taxa de armadura sem ocorrência de segregação, a qual é um problema muito visto em concretagem com o Concreto Convencional (CC). Em paralelo, com o advento de metodologias ágeis de construção, como a adoção de estruturas pré-moldadas e pré-fabricadas, os projetistas e pesquisadores atentaram ao estudo do cisalhamento direto nos planos de descontinuidade dos elementos, pelo fato da ruptura nessas interfaces se tratar de um comportamento frágil e muitas vezes catastrófica. Vários estudos foram conduzidos para entender o comportamento e dimensionar adequadamente tais interfaces do concreto armado convencional. Os mecanismos de resistência ao cisalhamento direto se dividem em três: resistência pelo intertravamento dos agregados e forças intermoleculares, atrito cisalhamento e efeito de pino. As duas parcelas iniciais são dadas pela literatura como as mais relevantes quanto à resistência última ao cisalhamento direto da interface (V_u). Quanto ao concreto autoadensável, seu comportamento deve ser avaliado por contar com agregados graúdos com menor graduação e até em menor volume na sua composição. Tal diferença pode influenciar principalmente na parcela de resistência causada pelo intertravamento dos agregados. O presente trabalho teve como objetivo comparar as resistências ao cisalhamento direto últimas de concreto convencional e concreto autoadensável, utilizando corpos de prova de concreto armado em ensaios do tipo *push-off* com taxas variáveis de armadura transversal. Os resultados demonstram que o CAA apresenta uma resistência última ao cisalhamento em média 13,51% inferior ao CC, o que pode ser explicado pela menor presença de agregados graúdos, diminuindo a parcela de resistência pelo intertravamento dos agregados. Porém foi observado uma certa tendência a maiores resistências conforme o aumento da taxa de armadura, chegando a valores muito aproximados para ambos os concretos. Este fenômeno pode ser explicado pela melhor aderência entre o concreto CAA e a armadura em comparação com o CC. Quando comparado às equações da literatura, conclui-se que as estimativas das normas ACI 318 (2019) e Eurocode 2 (2004) são conservadoras, assim como indicado pela literatura.

Palavras-chave: Cisalhamento direto; Resistência ao Cisalhamento; Concreto autoadensável; Atrito cisalhamento; Taxa de armadura.

ABSTRACT

HIRANO, Eduardo L.. INFLUENCE OF THE TRANSVERSE REINFORCEMENT RATIO ON DIRECT SHEAR STRENGTH OF CONVENTIONAL AND SELF-COMPACTING CONCRETES. 44 f. Trabalho de Conclusão de Curso – COECI - COORDENACÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo - PR, 2021

Self-Compacting Concrete (SCC) came as a solution for the demand of concrete technologies that could fill up the entirety of the concrete elements even with high reinforcement ratios without the occurrence of segregation, which is a problem widely seen when working with Conventional Concrete (CC). In parallel, with the advent of agile construction methodologies, such as the adoption of precast and pre-fabricated structures, designers and researchers paid attention to the study of direct shear in the discontinuity plans of elements. The rupture mode in these interfaces is known as fragile and often lead to catastrophic behavior. Several studies were carried out to understand the behavior and adequately design such interfaces of conventional reinforced concrete. The mechanisms of shear resistance are divided into three: resistance by interlocking aggregates and intermolecular forces (cohesion), friction and dowel action. The first two are given by the literature as the most relevant regarding the ultimate strength to direct interface shear (V_u). As for self-compacting concrete, its behavior must be evaluated since it has coarse aggregates with lesser gradation and even smaller volume in its composition. Such difference can mainly influence the portion of resistance caused by the interlocking of the aggregates. This paper aims to compare the ultimate direct shear strengths of conventional concrete and self-compacting concrete, using *push-off* specimens with variable transverse reinforcement ratios. The results demonstrate that the CAA presents an ultimate shear strength on average 13.51% lower than the CC, which can be explained by the lesser presence of coarse aggregates, reducing the resistance made by aggregate interlock. However, a certain tendency to greater strength was observed as the reinforcement ratio increased, reaching very approximate values for both concretes. This phenomenon may be explained by the improved bond between the CAA concrete and the reinforcement when in comparison with the CC. Comparing the results found to the equations in the literature, it can be concluded that the estimates of the ACI 318 (2019) and Eurocode 2 (2004) normatives are conservative, as pointed in the literature.

Keywords: Direct Shear; Shear Strength; Self-Compacting Concrete; Shear Friction; Reinforcement ratio.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Exemplos mais comuns de planos de cisalhamento onde são aplicados a teoria do atrito cisalhamento.	16
Figura 2 - Diagrama de Corpo Livre do Mecanismo de Cisalhamento Direto – “Saw-tooth Model”	17
Figura 3 - Teoria de transferência de esforço de cisalhamento para concretos não pré fissurados.	20
Figura 4 - Intertravamento dos Agregados - Estrutura geral de um plano fissurado	21
Figura 5 - Efeito de Pino - “Dowel Action”	21
Figura 6 - Modelo “Z” de corpo de prova utilizado no ensaio de cisalhamento direto - Push-of	23
Figura 7 - Resistência última e residual pela quantidade armadura transversal	30
Figura 8 - Dimensões dos corpos de prova e detalhamento da armadura	31
Figura 9 - Armaduras nos corpos de prova do ensaio de cisalhamento direto.	32
Figura 10 - Disposição dos corpos de prova no ensaio de cisalhamento direto	35
Figura 11 - Corpo de prova do concreto convencional CC0 após ensaio.....	37
Figura 12 - Corpos de prova do concreto convencional CC1 após ensaio.....	37
Figura 13 - Corpos de prova do concreto convencional CC2 após ensaio.....	38
Figura 14 - Corpo de prova do concreto convencional CC3 após ensaio.....	38
Figura 15 - Fissura causada pela flexão da aba superior	40
Figura 16 - Gráfico comparativo da resistência última ao cisalhamento direto do concreto convencional e concreto autoadensável.	41
Figura 17 - Gráfico comparativo da resistência última ao cisalhamento direto do concreto convencional e concreto autoadensável com a literatura	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficiente de atrito especificados em ACI 318 (ACI, 2019).	Erro!
Indicador não definido.	4
Tabela 2 - Porcentagem de armadura nos corpos de prova... 3	Erro! Indicador não definido.
Tabela 3 - Materiais para a execução dos corpos de prova - concreto convencional.	33
Tabela 4 - Composição do traço do concreto autoadensável por metro cúbico.	34
Tabela 5 - Propriedades do CAA no estado fresco e testes de compressão axial.	34
Tabela 6 - Resistências últimas ao cisalhamento obtidas experimentalmente para o concreto convencional com variação na porcentagem de armadura transversal	39
Tabela 7 - Resistências últimas ao cisalhamento obtidas experimentalmente para o concreto autoadensável com variação na porcentagem de armadura transversal	39
Tabela 8 - Estimativa de resistência ao cisalhamento por equações de normas e literatura	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAA	Concreto Autoadensável
CC	Concreto Convencional
a/c	Relação água/cimento
s	Deslocamento paralelo das interfaces
w	Separação da fissura causada pelo cisalhamento
τ_u	Tensão última de cisalhamento
V_n	Resistência nominal ao cisalhamento
A_{vf}	Area de armadura de atrito cisalhamento
f_c	Resistência à compressão do concreto
λ	Fator de modificação para refletir as propriedades mecânicas reduzidas do concreto leve em relação ao concreto normal de mesma resistência à compressão
V_u	Tensão de cisalhamento longitudinal última
c	Coeficiente de coesão
σ_n	Tensão normal na interface concreto-concreto
ρ	Taxa geométrica de armadura perpendicular ao plano de transferência de cisalhamento
η	Fator de redução de resistência
f_y	Resistência ao escoamento da armadura
K_1	Coeficiente de resistência ao cisalhamento do concreto relativo à resistência a compressão, proposto por Mattock (2001)
c_a	Características da superfície da interface no cenário 1, segundo fib (2010)
f_{ctd}	Resistência de projeto do concreto à tração
μ	Coeficiente de atrito
f_{cd}	Resistência de projeto do concreto à compressão
v	Fator de redução para resistência da biela de concreto diagonal
f_{ck}	Resistência característica à compressão do concreto
k_1	Coeficiente de eficiência da força de tração que pode ser ativado na armadura
k_2	Coeficiente de resistência à flexão da armadura (efeito de pino)
β	Coeficiente angular permitido da biela diagonal de concreto
FRC	Fator de resistência ao cisalhamento proposto por Lachemi
MDF	Medium Density Fiberboard

LISTA DE SÍMBOLOS

τ	Tensão cisalhante
V_{cr}	Magnésio
δ	Deslocamento vertical

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos Erro! Indicador não definido.4	
1.1.1	Objetivo Geral Erro! Indicador não definido.	
1.1.2	Objetivos Específicos Erro! Indicador não definido.	
1.2	Justificativa Erro! Indicador não definido.4	
2	DESENVOLVIMENTO	145
2.1	Concreto convencional e concreto autoadensável Erro! Indicador não definido.5	
2.2	Teoria do atrito cisalhamento Erro! Indicador não definido.6	
2.3	Mecanismos de resistência durante o atrito cisalhamento e suas interações Erro! Indicador não definido.22	
2.4	Ensaio de resistência ao cisalhamento por atrito Erro! Indicador não definido.22	
2.5	Equações da bibliografia e normas técnicas Erro! Indicador não definido.23	
2.5.1	ACI 318 Erro! Indicador não definido.	
2.5.2	Mattock (1974) Erro! Indicador não definido.25	
2.5.3	Eurocode 2 Erro! Indicador não definido.25	
2.5.4	Mattock (2001) Erro! Indicador não definido.26	
2.5.5	Fib (2010) Erro! Indicador não definido.26	
2.6	Cisalhamento direto no concreto autoadensável Erro! Indicador não definido.28	
3	MATERIAIS E MÉTODOS ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.31	
3.1	Configuração dos corpos de prova <i>Push-off</i> Erro! Indicador não definido.31	

- 3.2 Traço dos concretos**
Erro! Indicador não definido.32
- 3.3 Procedimento e instrumentação do ensaio de cisalhamento direto**
Erro! Indicador não definido.34
- 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**
ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.36
- 4.1 Ensaio de cisalhamento direto – concreto convencional**
Erro! Indicador não definido.36
- 4.2 Ensaio de cisalhamento direto – concreto autoadensável**
Erro! Indicador não definido.39
- 4.3 Análise comparativa dos resultados de concreto convencional e concreto autoadensável**
Erro! Indicador não definido.40
- 4.4 Análise comparativa com equações da literatura**
Erro! Indicador não definido.41
- 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**
ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.44
- 5.1 Principais conclusões**
Erro! Indicador não definido.44
- 5.2 Sugestões para trabalhos futuros**
Erro! Indicador não definido.44

REFERÊNCIAS

1 INTRODUÇÃO

A constante evolução do setor da construção civil exige a concepção de estruturas cada vez mais complexas, que resistam a cargas elevadas e com velocidade e qualidade de execução. Desta forma, o concreto autoadensável (CAA) foi desenvolvido. Além disso, o compósito se destaca como uma solução para o problema da falta de mão de obra qualificada no setor de construção civil, onde tal inabilidade acaba por comprometer a qualidade das estruturas de concreto. Essa solução tecnológica permite que o concreto, através da redução do diâmetro dos agregados utilizados, adição de super plastificantes e redução da relação água/cimento (a/c), se torne mais fluído preenchendo o molde na sua totalidade através da ação do seu próprio peso e conseqüentemente garantindo um acabamento de melhor qualidade (OKAMURA; OUCHI, 2003).

Em paralelo, com o advento de metodologias ágeis de construção, como por exemplo a adoção de estruturas pré-moldadas e pré-fabricadas, os projetistas e pesquisadores atentaram ao estudo do cisalhamento direto nos planos de descontinuidade dos elementos, normalmente encontradas nas interfaces das conexões. Pelo fato da ruptura nessas interfaces se tratar de um comportamento frágil e muitas vezes catastrófica (BIRKELAND; BIRKELAND, 1966), vários estudos foram conduzidos para encontrar meios de se dimensionar adequadamente tais interfaces, visto que a falta de dados sobre o comportamento real fez com que os projetistas adotassem concepções de projetos com estimativas conservadoras (MATTOCK, 1974). Surge então em 1966, descrita por Birkeland e Birkeland (1966), a teoria do atrito cisalhamento proposta para explicar tal comportamento por meio da extensa aplicação e estudos de estruturas pré-fabricadas.

Basicamente, três mecanismos de resistência do concreto armado ao cisalhamento direto são apontados pela literatura: coesão, atrito e efeito de pino (SANTOS; JÚLIO, 2012).

Por mais que sejam observados benefícios em se utilizar do CAA em estruturas pré-moldadas e/ou em estruturas com alta taxa de armadura Ozawa et al. (1989), a diminuição dos agregados pode influir diretamente em um dos mecanismos de resistência mais importantes para o atrito cisalhamento: o intertravamento do agregado (DESNERCK; SCHUTTER; TAERWE, 2009).

Embora estudos tenham sido realizados para avaliar a diferença de resistência última ao cisalhamento entre interfaces de CC e de CAA, a literatura diverge nos resultados. Por se tratar de um fenômeno com diversas variáveis, este estudo busca avaliar o comportamento e comparar as resistências últimas ao cisalhamento de ambos os concreto por meio de ensaios de cisalhamento direto *Push-off*.

1.1 Objetivos

O objetivo geral e os objetivos específicos são descritos a seguir.

1.1.1 Objetivo Geral

Comparar à resistência ao cisalhamento direto último do concreto convencional (CC) e concreto autoadensável (CAA) por meio de ensaios *Push-off*, variando a taxa de armadura.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Descrever o comportamento do CAA e CC frente ao ensaio *Push-off*, com exemplares de dimensões propostas por Savaris (2016).
- Descrever os mecanismos de falha de ambas as misturas.
- Comparar os resultados obtidos de cisalhamento último de CC e de CAA com as equações da bibliografia e normas.

1.2 Justificativa

Embora estudos tenham sido realizados para avaliar a diferença de resistência última ao cisalhamento entre interfaces de CC e de CAA, a literatura diverge nos resultados e mais estudos precisam ser realizados para avaliar os efeitos das propriedades do CAA na resistência ao cisalhamento direto, variando-se a taxa de armadura (RAHAL; KHALEEFI; AL-SANEE, 2016).

2 DESENVOLVIMENTO

Essa seção do trabalho busca descrever a literatura sobre o funcionamento do cisalhamento nas interfaces de CAA e suas diferenças com relação ao CC.

2.1 Concreto Convencional e Concreto Auto-adensável

O concreto convencional, é o produto da reação entre cimento hidráulico e água, utilizando agregados (miúdos e graúdos), e que pode conter adições e/ou aditivos, o compósito resultante é resistente à compressão, e atualmente considerado como o material mais utilizado na construção civil, fazendo parte da composição do concreto armado convencional (NEVILLE; BROOKS, 2010).

Com o passar dos anos, as estruturas de concreto armado não só aumentaram sua complexidade de concepção estrutural dos elementos como aumentaram consideravelmente as cargas as quais são submetidas. Juntamente a isso, encontrar mão de obra qualificada para a execução das estruturas se tornou mais difícil. Visto que tal fator pode comprometer diretamente a qualidade e durabilidade dos elementos estruturais, no final década de 1980 no Japão, foi desenvolvido o concreto autoadensável (OZAWA et al., 1989). Este compósito consegue alcançar qualidades reológicas de liquidez ao ponto de assumir o formato do molde ao qual é colocado, por meio da ação do próprio peso.

O aumento da fluidez da mistura no CAA é alcançada através diminuição significativa da utilização de agregados graúdos (britas) na mistura, diminuição da relação a/c e utilização de aditivos superplastificantes, assim diminuindo a energia necessária para o assentamento e melhorando a fluidez por dentre obstáculos (OKAMURA; OUCHI, 2003).

Como discutido anteriormente, o intertravamento agregado ao longo das fissuras é um dos mecanismos básicos que contribui para a resistência ao cisalhamento de elementos de concreto armado. A diminuição da quantidade de agregados graúdos no CAA pode ter uma influência no intertravamento e conseqüentemente apresentar menor resistência ao cisalhamento na interface (DESNERCK; SCHUTTER; TAERWE, 2009). Portanto, estudos sobre a capacidade de resistência são de suma importância para estimar se as equações atualmente utilizadas estão de acordo para o cálculo de elementos utilizando tal tecnologia de concreto (KIM et al., 2010).

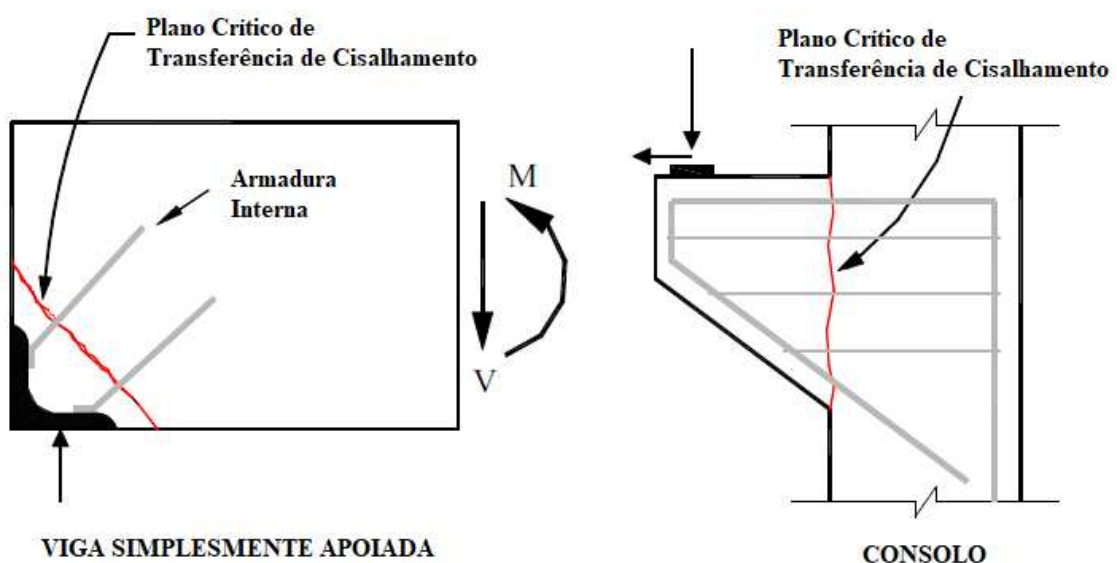
2.2 Teoria do atrito cisalhamento

A teoria do atrito cisalhamento é utilizada para quantificar a resistência ao cisalhamento de interfaces de concreto onde a falha ocorre ao longo de um plano preferencial de ruptura (HOFBECK; IBRAHIM; MATTOCK, 1969), sujeito simultaneamente às forças de cisalhamento e compressão. Interfaces desse tipo são vistas em conexões de estruturas de concreto pré-moldado, em casos como (BIRKELAND; BIRKELAND, 1966; SANTOS; JULIO, 2012):

- Nas interfaces entre um elemento pré-moldado e um elemento concretado in-loco.
- Entre concretos de idades diferentes.
- Entre um elemento e um suporte.
- Entre uma camada reparadora e um elemento pré existente.
- Entre duas partes de um elemento geradas por uma fissura.

A Figura 1 demonstra os casos mais comuns dos planos de cisalhamento em concreto pré-moldado, no plano crítico de uma viga simplesmente apoiada e no consolo de pilares pré-moldados.

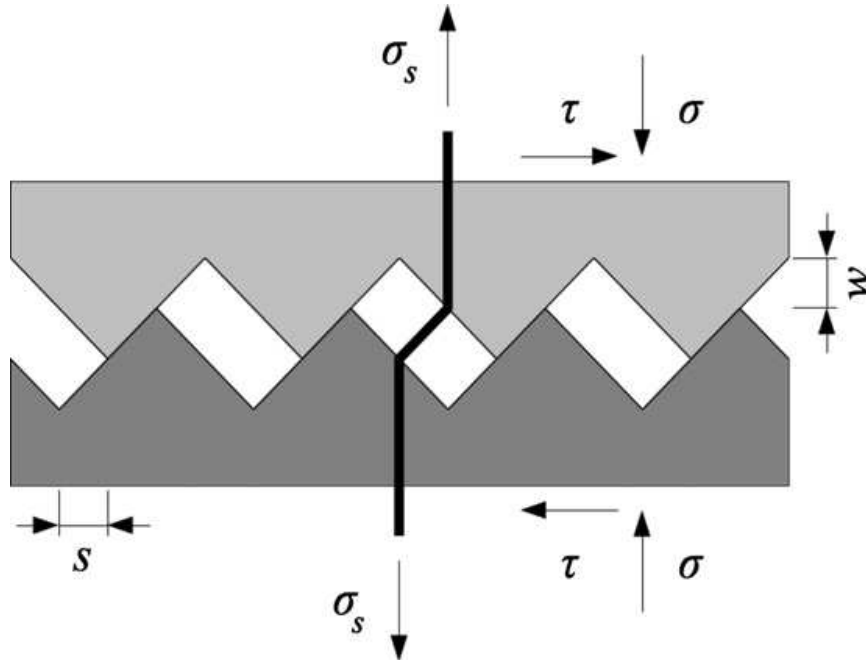
Figura 1 - Exemplos mais comuns de planos de cisalhamento onde são aplicados a teoria do atrito cisalhamento.



Fonte: Adaptado de Rahal, Khaleefi e Al-Sanee (2016)

O modelo proposto por Birkeland e Birkeland (1966) para explicar o comportamento do atrito cisalhamento é demonstrado pelo diagrama da Figura 2.

Figura 2 - Diagrama de Corpo Livre do Mecanismo de Cisalhamento Direto – “Saw-tooth Model”



Fonte: Birkeland e Birkeland (1966), adaptado por Santos e Júlio (2012)

O esforço de cisalhamento (τ) no plano em questão, gera um deslizamento relativo das interfaces. Por se tratar de uma superfície áspera, não somente gera o deslocamento paralelo das interfaces (s), como também uma separação da fissura (w). Essa separação gera como resultante uma tensão nas barras (σ_n) que por sua vez gera uma tensão resultante normal à interface (σ). De forma geral, essa tensão σ é devida à protensão e/ou aos esforços gerados pela restrição das armaduras (RANDL, 2013).

O atrito cisalhamento é a parcela de resistência relativa ao coeficiente de atrito da superfície e proporcional ao esforço de compressão externo aplicado perpendicular à superfície (RANDL, 2013). Pode-se afirmar que a rugosidade do substrato de concreto possui uma influência muito significativa na resistência, sendo considerada nas equações na forma de coeficientes de coesão e/ou atrito. Tais coeficientes são avaliados qualitativamente por meio de uma inspeção visual da superfície preparada e são relativos ao método de preparação da superfície (SANTOS; JÚLIO, 2012). A norma da ACI 318 (2019), por exemplo, considera somente essa parcela de

resistência efetiva para o dimensionamento das peças/interfaces, não levando em conta o efeito de pino, como proposto por Birkeland e Birkeland (1966).

A Equação 1 demonstra a primeira expressão linear para dimensionar a tensão última de cisalhamento longitudinal de interfaces de concreto desenvolvida por Birkeland e Birkeland (1966).

$$\tau_u = \rho f_y \tan \varphi = \rho f_y \mu \quad (1)$$

Onde:

- τ_u : tensão última de cisalhamento (MPa).
- ρ : taxa de armadura transversal.
- f_y : resistência ao escoamento da armadura (MPa).
- μ : coeficiente de atrito, definido em função do material empregado, do peso específico e condição da superfície.

Porém, por mais que a resistência por atrito tenha uma participação proeminente, utilizar-se somente deste fator de resistência para explicar o comportamento complexo dos mecanismos de resistência ao cisalhamento nas interfaces de concreto é considerado simplista (HARRIES; ZENO; SHAHROOZ, 2012; XIA et al., 2021) e conservador (HWANG; YU; LEE, 2000; RAHAL; KHALEEFI; AL-SANEE, 2016).

De acordo com Santos e Julio (2012), durante o cisalhamento direto, duas situações diferentes podem ser consideradas:

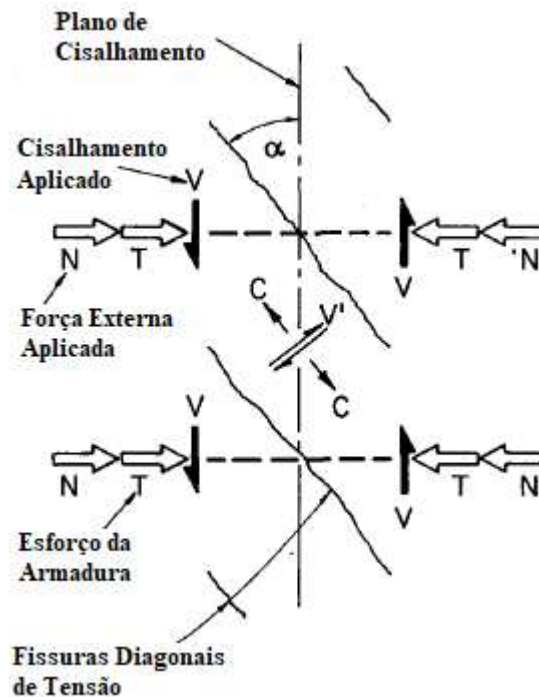
- O cisalhamento da interface ocorre sem perda de coesão do concreto, ou seja, concreto sem pré fissuração.
- Resistência ao cisalhamento da interface com deslizamento relativo entre ambas as interfaces do concreto.

Deve ser destacado que a teoria do atrito cisalhamento só se aplica ao segundo caso, onde o comportamento interfacial é assumido como controlado pelos seguintes mecanismos de resistência (SANTOS; JULIO, 2012; ZILCH; REINECKE, 2000; RANDL, 2013):

- Intertravamento dos agregados e forças intermoleculares (MATTOCK; HAWKINS, 1972);
- Atrito cisalhamento (BIRKELAND; BIRKELAND, 1966);
- Efeito de Pino ("*Dowel Action*") (WALRAVEN; REINHARDT, 1981; WAIRAVEN; FRENAY; PRUIJSSERS, 1987);

A distinção dos comportamentos do cisalhamento nas interfaces de concreto pré fissurado e não fissurado foi explorada no trabalho de Hofbeck, Ibrahim e Mattock (1969). A partir de ensaios laboratoriais utilizando concreto com resistência a compressão média de 28 MPa e barras de aço com resistência ao escoamento de 345 MPa, demonstraram que a existência de uma fissura diminui a resistência ao cisalhamento e aumentam a abertura de fissura (w). Em relação ao concreto não fissurado, Mattock e Hawkins (1972) apresentaram a teoria das bielas de compressão (Figura 3) que passam a existir após o surgimento de fissuras diagonais, tais fissuras formam um ângulo α com o plano de cisalhamento, o esforço gerado é resistido por bielas de concreto que tendem a girar e conseqüentemente geram esforço na armadura. Como as bielas de compressão estão contínuas em ambos os lados do plano de cisalhamento, é gerado ao mesmo tempo compressão e cisalhamento. O elemento então só irá falhar quando o suporte não resistir à ação simultânea do esforço de compressão e cisalhamento gerados, regido pela envoltória de Mohr-Coulomb, causando escoamento da armadura. Vale destacar que tal afirmação é válida para concretos de baixa resistência, esta é vista como uma parcela significativa de resistência representada pelas ligações químicas da matriz do concreto regidas pelas forças de *Van der Waals* (RANDL, 2013).

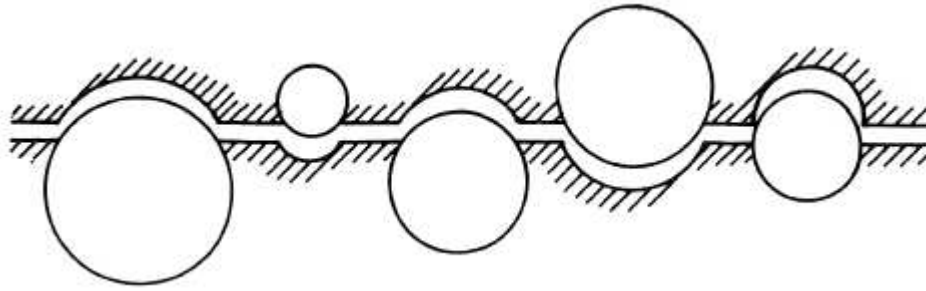
Figura 3 - Teoria de transferência de esforço de cisalhamento para concretos não pré-fissurados.



Fonte: Mattock e Hawkins (1972)

Posteriormente, o efeito do intertravamento dos agregados foi descrito por Walraven e Reinhardt (1981), Wairaven, Frenay e Pruijssers (1987), onde os autores concluem que a fissura ocorre na área de contato entre a matriz e o agregado graúdo, interface essa que normalmente é a área mais fraca do sistema. Dessa forma, a partir do momento da fissura, ocorre o deslizamento e os agregados intertravam entre os próprios agregados e entre a matriz. De forma a simplificar a análise, as partículas dos agregados foram representadas como em esferas (Figura 4), sendo possível assim, observar transferência dos esforços. Apesar de ser inicialmente uma parcela considerável de resistência, após a fissuração, até mesmo com valores baixos de afastamento das interfaces, a adesão já não contribui mais para a resistência (RANDL, 2013).

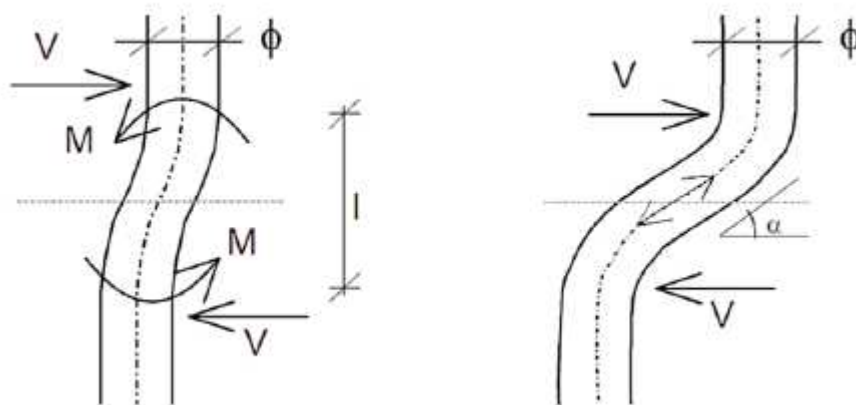
Figura 4 - Intertravamento dos Agregados - Estrutura geral de um plano fissurado.



Fonte: Walraven e Reinhardt (1981)

O efeito de pino ocorre a partir da separação das duas interfaces após a fissuração do concreto, onde o deslocamento relativo das interfaces devido ao esforço cortante faz com que a armadura dobre (WALRAVEN; REINHARDT, 1981). A resistência à dobra da armadura, sendo ela em função da quantidade de reforço, inclinação, diâmetro das barras, pré tensionamento e cobertura do concreto, gera como resultante um esforço normal às superfícies (XIA et al., 2021; RANDL, 2013) (Figura 5).

Figura 5 - Efeito de Pino – “Dowel Action”.



Fonte: Randl (2013)

Conforme o aumento da taxa de armadura transversal no plano de cisalhamento (ρf_y), maior é resistência última ao cisalhamento, sendo uma resposta atribuída ao efeito de pino (HOFBECK; IBRAHIM; MATTOCK, 1969; WAIRAVEN; FRENAY; PRUIJSSERS, 1987; INCE; YALCIN; ARSLAN, 2007).

2.3 Mecanismos de resistência durante o atrito cisalhamento e suas interações

Harries, Zeno e Shahrooz (2012) estudaram os mecanismos do atrito cisalhamento e como eles se desenvolvem ao decorrer da aplicação da carga, dividido em três estágios:

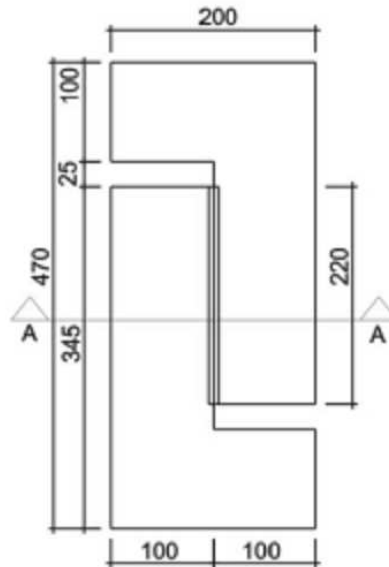
- Comportamento pré fissura: O comportamento em cargas abaixo da tensão de cisalhamento de fissuração (V_{cr}) é muito semelhante para todos os corpos de prova. É caracterizado por uma relação relativamente linear entre a carga aplicada (V) e o deslocamento vertical de cisalhamento (δ), abertura de fissuras (w) e deformações na armadura transversal mínimas. Antes da fissuração, a carga aplicada é resistida pelo cisalhamento do concreto associado à resistência da ligação entre as duas interfaces. A pesquisa aponta que abaixo de V_{cr} , a armadura não oferece nenhuma participação na resistência por não ser ativada.
- Comportamento pós-fissura: A tensão aplicada fica entre V_{cr} e V_u , enquanto que o deslocamento vertical (δ) e a abertura da fissura (w) exibem uma relação relativamente linear em função da carga de cisalhamento aplicada. Nesse estágio, o mecanismo de resistência por atrito cisalhamento é ativado, ao qual a capacidade da interface agora fissurada de resistir ao cisalhamento é atribuída principalmente ao atrito que se origina da rugosidade das duas superfícies de concreto que formam a interface, que são unidas pela armadura de aço da interface.
- Comportamento pós esforço último: V_u é alcançada quando é visto aumento de δ , w e deformações no aço sem incremento na carga aplicada.

2.4 Ensaios de resistência ao cisalhamento por atrito

Os ensaios de cisalhamento direto apresentam diversas configurações. Dentre as mais utilizadas está o corpo de prova tipo "Z", apresentado na Figura 6 de Harries, Zeno e Shahrooz (2012). Porém, configurações diferentes que conseguem

abstrair o mesmo conceito ainda são comumente vistas na literatura, como por exemplo os corpos de prova de cisalhamento direto prismáticos de Xia et al. (2021).

Figura 6 - Modelo "Z" de corpo de prova utilizado no ensaio de cisalhamento direto - *Push-off*



Fonte: Adaptado de Savaris (2016)

O ensaio consiste na aplicação de uma carga axial incremental e constante no corpo de prova até a falha. A forma do corpo de prova garante que a falha ocorra simplesmente pelo cisalhamento gerado na interface, sem a atuação de esforços de momento e ao longo do plano. As armaduras, dispostas transversalmente ao plano, tem formato de estribos e são ancoradas às armaduras longitudinais (HOFBECK; IBRAHIM; MATTOCK, 1969).

2.5 Equações da bibliografia e normas técnicas

2.5.1 ACI 318

As primeira equações lineares propostas para avaliar a tensão de cisalhamento longitudinal última de interfaces de concreto foram dispostas na pesquisa de Birkeland e Birkeland (1966), onde é considerada que a resistência última é dada somente pela contribuição do atrito. Deve-se ressaltar que a tensão de escoamento das armaduras que cruzam a interface tem variado nos últimos 50 anos.

Nos primeiros estudos de Birkeland e Birkeland (1966), Hofbeck, Ibrahim e Mattock (1969), foram realizados com barras de aço com tensão de escoamento de aproximadamente 275 MPa. Já nos estudos de Mattock (1974) e Hawkins (1974), a

tensão de escoamento mais comum para a armadura era de 475 MPa. As pesquisas mais recentes já apresentam barras de reforço com tensão de escoamento em torno de 550 MPa (SANTOS; JÚLIO, 2012). A norma americana ACI 318 (2019) utiliza como base de dimensionamento uma equação similar à equação de Birkeland e Birkeland (1966), como apresentado na Eq. 2.

$$V_n = \mu A_{vf} f_y \leq \begin{cases} 0.2f_c \\ 3.3 + 0.08f_c \\ 11MPa \end{cases} \quad (2)$$

Onde:

V_n : resistência nominal ao cisalhamento.

μ : coeficiente de atrito, definido em função do material empregado, do peso específico e condição da superfície, como apresentado na Tabela \ref{coefat}.

f_y : resistência ao escoamento da armadura (MPa).

A_{vf} : área de armadura de atrito cisalhamento.

f_c : resistência à compressão do concreto (MPa).

O coeficiente de atrito utilizado na Eq. 2 é estipulado através da Tabela 1.

Tabela 1 - Coeficiente de atrito especificados em ACI 318 (2019)

Condição da superfície de contato	μ
Concreto aplicado monoliticamente	$1,4 \lambda$
Concreto aplicado sobre concreto endurecido e limpo, com superfície rugosa intencionalmente	$1,0 \lambda$
Concreto aplicado sobre concreto endurecido e limpo, sem superfície rugosa intencionalmente	$0,6 \lambda$
Concreto aplicado sobre aço laminado e limpo com conectores metálicos	$0,7 \lambda$

Fonte: ACI 318 (2019)

Onde $\lambda = 1,0$ para concreto com agregado de peso específico normal e $\lambda = 0,85$ para concreto com agregado leve.

2.5.2 Mattock (1974)

Mattock (1974) propôs uma expressão utilizado a média das resistências dos estudos experimentais propostos em (MATTOCK; HAWKINS, 1972). A Equação 3 apresenta a expressão que representa as médias dos resultados experimentais. O coeficiente de atrito na expressão é de 0,8 e a parcela mínima de resistência a coesão para concretos monolíticos (não fissurados) é estipulada pelo coeficiente 2,76. A resistência ao escoamento da armadura longitudinal que cruzam a interface foi de aproximadamente 345 MPa. A tensão de cisalhamento longitudinal última para essa equação não deve ser maior que $0,3f_c$ nem 10,34 MPa e o limite mínimo para a expressão é de 1,38 MPa.

$$V_u = 2,76 + 0,8(\rho f_y + \sigma_n) \quad (3)$$

Onde:

V_u : resistência nominal ao cisalhamento.

ρ : taxa geométrica de armadura perpendicular ao plano de transferência de cisalhamento.

f_y : resistência ao escoamento da armadura (MPa).

σ_n : tensão normal à interface.

2.5.3 Eurocode 2

Já a norma europeia Eurocode 2 (2004) é considerada a resistência do concreto como uma variável, sendo esta multiplicada por um coeficiente de coesão relativo a equação é dada da seguinte forma (Eq. 4):

$$\tau = c f_{ctd} + \mu \sigma_n + \mu \rho f_y \leq 0.5 \eta f_{cd} \quad (4)$$

Onde:

c : coeficiente de coesão.

f_{ctd} : resistência a tração de projeto do concreto.

f_y : resistência ao escoamento da armadura (MPa).

ρ : taxa geométrica de armadura perpendicular ao plano de transferência de cisalhamento.

σ_n : tensão normal na interface concreto-concreto.

η : fator de redução de resistência igual a $0,6(1-f_{ck}/250)$.

v : fator de redução para resistência, onde $v = 0,6(1-f_{ck}/250)$.

2.5.4 Mattock (2001)

Com o avanço das tecnologias e o aumento na resistência dos concretos propostos nos projetos, Mattock (2001) propôs novas equações devido a ineficiência das normas da época em predizer o comportamento em concretos de alta resistência, principalmente quando pré fissurado, sendo que há alteração significativa do comportamento dependendo da taxa de armadura transversal na resistência última. O autor compilou dados da literatura contando com um espectro de resistência à compressão entre 16,45 e 98,99 MPa. A Equação 5 do autor simplifica a relação da resistência à compressão do concreto na tensão de cisalhamento última.

$$\tau_u = K_1 + 0,8(\rho f_v f_y + \sigma_n) \quad (5)$$

Onde:

K_1 : igual a $0,1.f_c$, mas não superior à 5,52 MPa.

2.5.5 Fib (2010)

Randl (2013), buscando aprimorar a aplicação da fib (2010), dispõe em sua equação as três contribuições de coesão, atrito e ação de pino discriminadas. O autor também divide o fenômeno em dois cenários principais que dependem principalmente do grau de armadura que cruza a interface em combinação com um a característica de rugosidade da mesma:

- Cenário 1: comportamento frágil (ligação forte) - deslizamento rígido. Ocorre quando uma forte ligação adesiva do concreto é alcançada, geralmente em combinação com um baixo grau de armadura cruzando a interface ($0 \leq \rho \leq 0,05\%$)(Eq. 6):

$$\tau_{Rd} = c_a f_{ctd} + \mu \sigma_n \leq 0,5v f_{cd} \quad (6)$$

Onde:

c_a : características da superfície da interface, que para o concreto, para superfícies.

f_{cta} : resistência de projeto do concreto à tração.

μ : coeficiente de atrito.

σ_n : tensão compressiva devido à força normal externa (valor mínimo garantido).

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

v : fator de redução para resistência da biela de concreto diagonal, onde $v = 0,55(30/f_{ck})^{1/3} \leq 0,55$.

- Cenário 2: comportamento bastante dúctil, onde a adesão substituída por outros mecanismos - aderência "não rígida". Esse cenário é visto quando a quantidade de armadura transversal à interface é maior que 0,05%. Logo, um comportamento mais dúctil é esperado (Eq. 7):

$$\tau_{Rd} = c_r f_{ck}^{1/3} + \mu(\sigma_n + \rho k_1 f_{yd}) + k_2 \rho (f_{yd} f_{cd}) \leq \beta_c v f_{cd} \quad (7)$$

Onde:

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

ρ : taxa geométrica de armadura perpendicular ao plano de transferência de cisalhamento.

k_1 : coeficiente de eficiência da força de tração que pode ser ativado na armadura.

k_2 : coeficiente de resistência à flexão da armadura (efeito de pino).

β : coeficiente angular permitido da biela diagonal de concreto.

Vale ressaltar também que o fator de característica da superfície c_a no cenário 1 é maior do que o c_r do cenário 2 pelo motivo de que no primeiro cenário a capacidade de resistência pela parcela de atrito é mais preponderante (RANDL, 2013).

2.6 Cisalhamento direto no concreto autoadensável

Os concretos de menor resistência tendem a ter menos fraturas através dos agregados graúdos, levando a uma maior quantidade de absorção de energia pelo mecanismo de intertravamento dos agregados (KIM et al., 2010). Kim et al. (2010) confirmaram que o tipo e o volume de agregado são fatores que influenciam diretamente no mecanismo de intertravamento dos agregados e conseqüentemente na capacidade de cisalhamento, tanto em misturas de CAA quanto CC. Menores fatores de redução de fratura e coeficiente de atrito são vistos para as amostras de CAA, o que corresponde a menores tensões de cisalhamento máximas em uma dada largura de fissura em comparação com as amostras de CC. Essa redução se deve ao menor volume de agregados graúdos das misturas de CAA.

Quando à diferença de rugosidade, fator que influencia diretamente no intertravamento de agregado, Huber, Huber e Kollegger (2019) demonstram que a substituição do agregado graúdo por pó de rocha nas misturas CAA testadas não teve influência significativa em seus índices de rugosidade quando comparado com o CC.

Lachemi, Hossain e Lambros (2005) realizaram um estudo experimental contendo dezoito vigas de concreto sem armadura de cisalhamento, somente com a transversal, para compreender os mecanismos e contribuição de resistência tanto do CC quanto do CAA ao cisalhamento. O estudo mostrou que um aumento no tamanho do agregado graúdo de 12 mm para 19 mm no CAA diminui a capacidade de cisalhamento do concreto τ_{cr} e aumenta a resistência ao cisalhamento última (τ_u) em até 12,8%. No geral, é visto um aumento no Fator de Resistência ao Cisalhamento (FCR) de 25% no simples aumento da dimensão do agregado. Tal fator, proposto pelos pesquisadores consegue analisar e comparar o comportamento pós-fissura, sendo ele dado pela razão do valor de τ_u por τ_{cr} . O aumento de 25% indica que o uso de tamanhos maiores e maior quantidade de agregado graúdo melhora os mecanismos de transferência de cisalhamento pós-fissuração e aumentam a resistência ao cisalhamento final das vigas.

No mesmo estudo de Lachemi, Hossain e Lambros (2005), foi comparado a resistência o CAA e o CC com o mesmo tamanho máximo de agregado graúdo, mas com um volume de agregado graúdo inferior (caso típico para um CAA), ambos apresentaram características semelhantes de resistência ao cisalhamento do concreto no estágio de pré-fissurados. Ambos os estudos de Helincks et al. (2013),

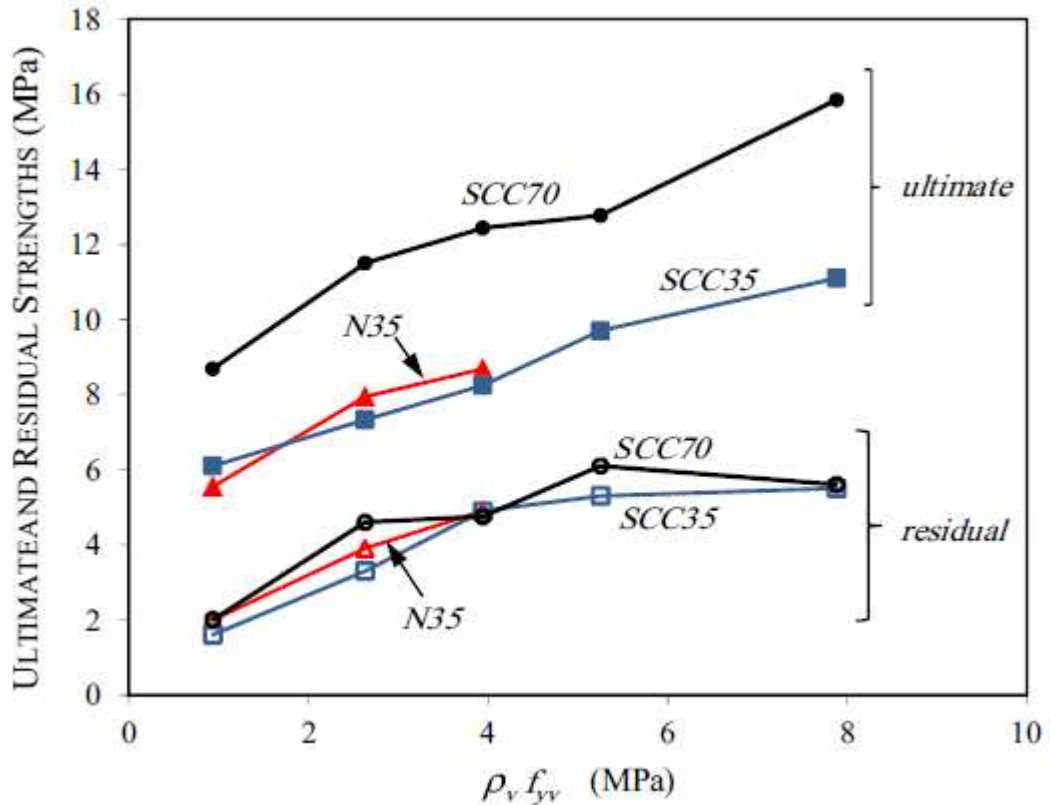
Lachemi, Hossain e Lambros (2005) revelaram o desenvolvimento de menor resistência ao cisalhamento final no CAA, sendo esta 5%-6,9% menor do que o CC. Tal fator é atribuído ao menor intertravamento do agregado e ação do pino, como consequência da presença de menor quantidade de agregado graúdo em comparação com o CC.

Savaris e Pinto (2021) compararam a resistência última ao cisalhamento do CC e CAA, porém com resistências a compressão diferentes, sendo elas 36,3 MPa e 41,2 MPa respectivamente. Os resultados demonstraram que o CAA apresenta uma resistência superior, porém quando levado em conta a diferença da resistência a compressão dos concretos, pode-se considerar não haver diferenças significativas. Os pesquisadores também evidenciam que os traços de CAA podem apresentar maior resistência ao cisalhamento em relação ao concreto convencional quando utilizado maior taxa de armadura transversal. Este possível aumento na resistência ao cisalhamento pode ser devido à maior aderência do CAA à armadura, aumentando a força de compressão perpendicular ao plano de cisalhamento e aumentando o atrito entre as superfícies da fissura.

Helincks et al. (2013), por meio de 72 testes de aderência *Pull-out*, demonstraram que a força de aderência do CAA à armadura transversal é tão alta ou superior à força de aderência do concreto normal vibrado, representando aumento de até 68%. A melhora na aderência do CAA pode ser atribuída à maior quantidade de agregados finos e maior trabalhabilidade, visto que a vibração adicionada no CC faz com que seja criada uma interface de menor resistência entre a matriz de concreto e o entorno da armadura, representada pela nata do cimento (ZHU; SONEBI; BARTOS, 2004; HELINCKS et al., 2013).

Rahal, Khaleefi e Al-Sanee (2016) investigaram, mediante a confecção de 15 espécimes de cisalhamento direto não pré fissurados, a diferença dos comportamentos de transferência de atrito entre interfaces de concreto de CC e CAA. A Figura 7 representa a resistência final V_u e a resistência residual V_r pela quantidade de armadura transversal ($\rho_v f_{yv}$).

Figura 7 - Resistência última e residual pela quantidade armadura transversal.



Fonte: Rahal, Khaleefi e Al-Sanee (2016)

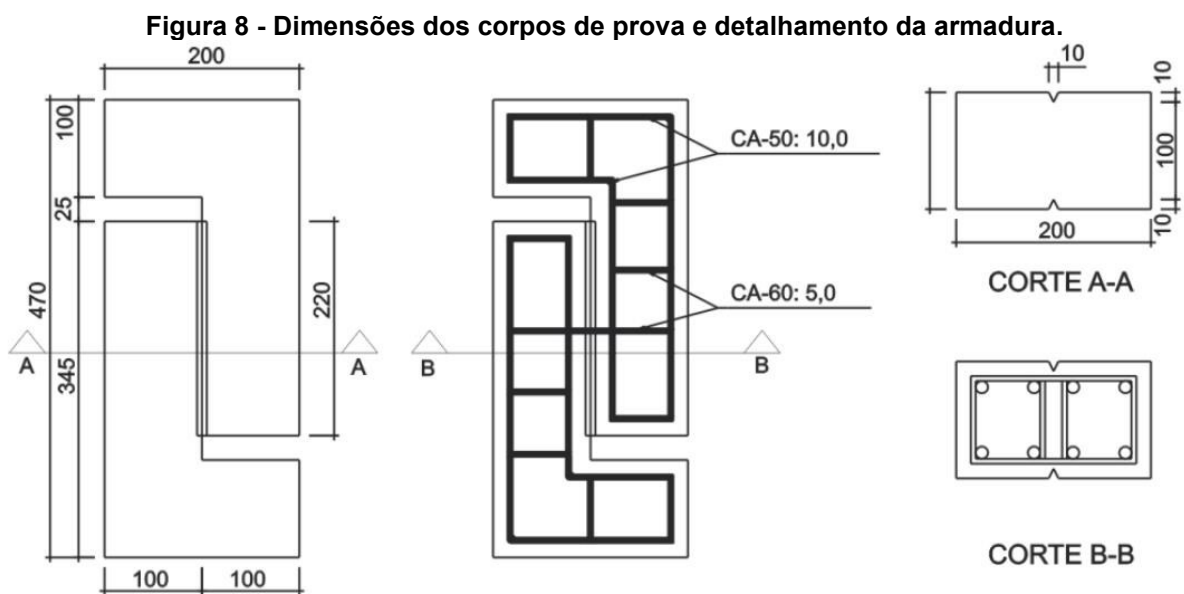
Nota-se no gráfico que o aumento de taxa de armadura transversal aumenta a resistência última. Ambos os tipos de concretos de resistência de 35 MPa (no gráfico CAA35 e CC35) apresentavam a mesma dimensão de agregado máximo, porém com gradações granulométricas diferentes. Foi observado uma diferença na faixa de 8% a 11% entre as resistências últimas e de 14% a 20% para as resistências residuais. Também é notável no gráfico a relevância da resistência à compressão como fator de resistência última ao cisalhamento quando comparado os resultados para CAA70 e CAA35.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os materiais e métodos utilizados para a confecção e ensaio dos corpos de prova de cisalhamento direto de CC e de CAA.

3.1 Configuração dos corpos de prova Push-off

Na presente pesquisa, foram moldados 4 corpos de prova de modelo "Z" para os ensaios de cisalhamento direto do tipo Push-off, com dimensões propostas por Savaris (2016), como disposto na Figura 8.



Em todos os corpos de prova foram utilizadas barras de aço CA 50 com 10 mm de diâmetro como armadura de flexão. No total 8 corpos de prova foram analisados, sendo 4 deles de CC e 4 de CAA confeccionados no trabalho de Ribeiro e Savaris (2019). Para o concreto convencional adotou-se a nomenclatura "C" e para o concreto autoadensável a nomenclatura "A". A única variável nos corpos de prova, em cada um dos grupos, é a taxa de armadura. As barras que transpassam ortogonalmente o plano de cisalhamento utilizadas eram de aço CA 60 com diâmetro de 5.0 mm. A Tabela 2 demonstra a porcentagem de armadura nos corpos de prova.

Tabela 2 - Coeficiente de atrito especificados em ACI 318 (2019)

Corpo de Prova	Porcentagem de armadura (%)
C0 e A0	0
C1 e A1	0,177
C2 e A2	0,354
C3 e A3	0,532

Fonte: ACI (2019)

Da esquerda para a direita C0, C1, C2 e C3, são apresentados na Figura 9 as armaduras dos corpos de prova.

Figura 9 - Armaduras nos corpos de prova do ensaio de cisalhamento direto.

Fonte: Autor (2018)

Para a concretagem, as armaduras foram dispostas em formas de MDF, onde foram utilizados espaçadores plásticos para garantir o cobrimento da armadura. A fim de assegurar que a ruptura ocorresse no plano de cisalhamento reduziu-se a seção nesta região com a colocação de dois filetes de madeira nas paredes do molde, resultando em uma área de 22.000 mm².

3.2 Traço dos concretos

Quanto ao CC produzido foi utilizado o traço do estudo realizado por Pufal (2017), 1:2,43:2,80 (cimento:areia:brita), com relação água/cimento (a/c) de 0,52, visando uma resistência à compressão próxima a 40 MPa (PUFAL, 2017). Como

aglomerante foi utilizado o cimento Portland CP V ARI e como agregados miúdo e graúdo foram utilizadas areia natural quartzosa e rocha basáltica britada, respectivamente.

Para moldagem de 4 corpos de prova prismáticos para ensaios de cisalhamento direto e 8 corpos de prova cilíndricos, com diâmetro de 100 mm e altura de 200 mm, para determinação da resistência à compressão axial e tração por compressão diametral foram produzidos 60 litros de concreto, utilizando as quantidades de materiais apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Materiais para a execução dos corpos de prova - concreto convencional

Cimento (kg)	Areia (kg)	Brita (kg)	Água (l)
23,09	49,07	61,91	12

Fonte: Autor (2018)

Os corpos de prova cilíndricos foram desmoldados 24 horas após a concretagem e submetidos ao processo de cura durante 28 dias submersos em água à temperatura $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Os corpos de prova prismáticos permaneceram em cura à temperatura ambiente, em torno de 20°C , até os 28 dias, data em que foram ensaiados na máquina universal de ensaios.

O concreto convencional confeccionado atingiu uma resistência média de 40,63 MPa pelo ensaio de compressão axial, conforme estabelecido pela NBR 5739 (ABNT, 2018).

Para o CAA, utilizou-se como base o estudo realizado por Ribeiro e Savaris (2019), segundo a dosagem apresentada em Savaris (2016). Para a confecção do concreto, foi utilizada a proporção de materiais apresentados na Tabela 4. Como aglomerante foi utilizado cimento Portland tipo CP-V ARI, areia natural de rio como agregado miúdo com massa específica de $2589,41 \text{ kg/m}^3$ e módulo de finura 2,08 e rocha britada de origem basáltica como agregado graúdo com massa específica de $2779,82 \text{ kg/m}^3$ e dimensão máxima característica igual a 19 mm. A complementação de materiais finos foi realizada com fíler calcário, sendo necessária a utilização de aditivo super plastificante para garantir a fluidez e viscosidade da mistura.

Tabela 4 - Composição do traço do concreto autoadensável por metro cúbico

Material	Massa (kg)
Cimento	384,00
Brita 1 (basáltica)	605,34
Areia natural de rio	997,96
Filer calcário	201,78
Água	200,00
Aditivo super plastificante	1,518

Fonte: Savaris (2016)

Na Tabela 5 são apresentadas as propriedades do concreto no estado fresco, determinadas conforme as normas NBR 15823-4 e NBR 15823-5 (ABNT, 2017a, 2017b) e a resistência à compressão axial obtida aos 28 dias. O CAA atingiu resistência de 39,85 MPa, conforme estabelecido pela ABNT (2018).

Tabela 5 - Propriedades do CAA no estado fresco e testes de compressão axial

Ensaio	Resultado
Slump flow (mm)	585
Caixa L	0,81
Funil V (s)	3,96
Fcm 28 dias (MPa)	39,85

Fonte: Ribeiro (2019)

3.3 Procedimento e instrumentação do ensaio de cisalhamento direto

O carregamento foi aplicado verticalmente nos corpos de prova, com incremento dado pelo deslocamento do prato superior com velocidade de 0,5 mm/min, até a ruptura ou decréscimo de carga em 20%, indicando o escoamento da armadura. A Figura 10 apresenta a disposição de alguns dos corpos de prova no ensaio, respectivamente são apresentados: CC0, CC1, CC2 e CC3.

Figura 10 - Disposição dos corpos de prova (CC) no ensaio de cisalhamento direto.



Fonte: Autor (2018)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dos ensaios e as análises comparativas dos dados são descritos a seguir.

4.1 Ensaios de cisalhamento direto – concreto convencional

Nas Figuras 11, 12, 13 e 14, são apresentados alguns dos corpos de prova após o rompimento, respectivamente CC0, CC1, CC2 e CC3. Em vermelho, destaca-se as fissuras que ocorreram nos corpos de prova durante a realização do ensaio.

Figura 11 - Corpos de prova do concreto convencional CC0.



Fonte: Autor (2018)

Figura 12 - Corpos de prova do concreto convencional CC1.



Fonte: Autor (2018)

Figura 13 - Corpos de prova do concreto convencional CC2.



Fonte: Autor (2018)

Figura 14 - Corpos de prova do concreto convencional CC3.



Fonte: Autor (2018)

Pode ser observado que a inexistência de armadura transversal somente a parcela de resistência de coesão do concreto ao cisalhamento, como visto no corpo de prova CC0 após o teste. Esse corpo de prova não configura como atrito cisalhamento de fato.

Na Tabela 6, são apresentadas as resistências últimas obtidas experimentalmente para o CC. Constata-se a existência de uma parcela de resistência ao cisalhamento no exemplar sem armadura transversal (CC0) atribuída à adesão entre as partículas do concreto. A presença da armadura transversal resultou em maior resistência ao cisalhamento, por restringir a separação das interfaces, permitindo com que ocorra a transferência do esforço do cisalhamento direto através do atrito entre as interfaces e pelo efeito de pino. Verifica-se também um aumento da resistência relativo ao aumento da taxa de armadura transversal.

Tabela 6 - Resistências últimas ao cisalhamento obtidas experimentalmente para o concreto convencional com variação na porcentagem de armadura transversal.

Corpo de Prova	V_u (MPa)	ρ (%)
CC0	4,64	0
CC1	6,35	0,177
CC2	7,13	0,354
CC3	8,56	0,532

Fonte: Autor (2018)

4.2 Ensaios de cisalhamento direto – concreto autoadensável

Os resultados dos ensaios realizados por Ribeiro e Savaris (2019) estão dispostos na Tabela 7.

Tabela 7 - Resistências últimas ao cisalhamento obtidas experimentalmente para o concreto autoadensável com variação na porcentagem de armadura transversal.

Corpo de Prova	V_u (MPa)	ρ (%)
CAA0	3,85	0
CAA1	5,39	0,177
CAA2	6,96	0,354
CAA3	6,89	0,532

Fonte: Ribeiro e Savaris (2019)

Ribeiro e Savaris (2019) destacam que para o corpo de prova CAA3 houve a formação de uma fissura na lateral do corpo de prova causado pela flexão da aba

superior do corpo de prova, como demonstrado na Figura 15. Tal comportamento alterou o mecanismo de cisalhamento direto do ensaio, como pode ser visto em resultados semelhantes de cisalhamento último para CAA2 e CAA3 apesar do aumento de aproximadamente 50% da taxa de armadura. Devido a isto, o exemplar CAA3 foi desconsiderado na equação de tendência dos dados.

Figura 15 - Fissura causada pela flexão da aba superior.

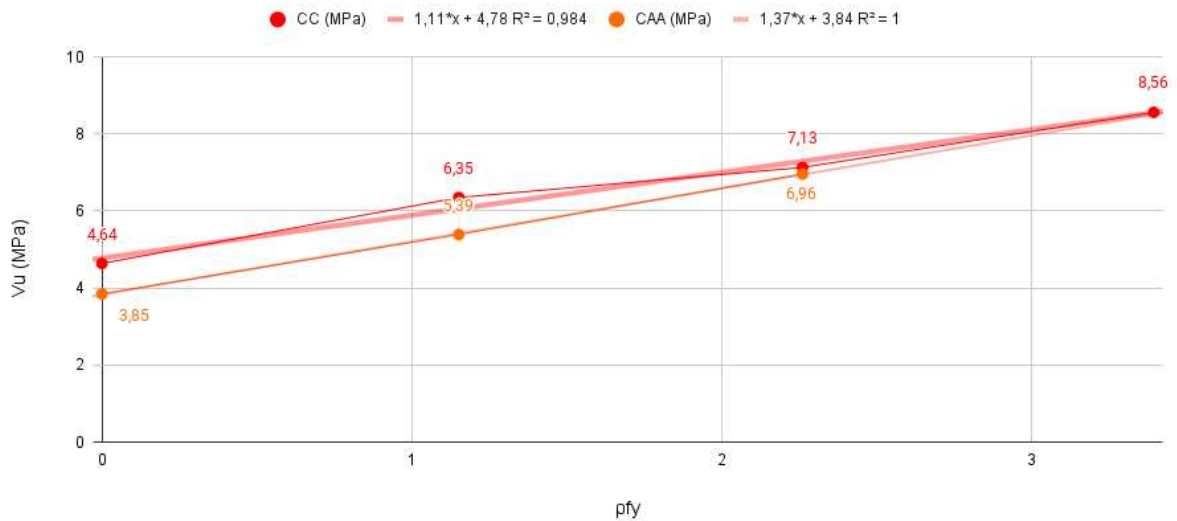


Fonte: Ribeiro e Savaris (2019)

4.3 Análise comparativa dos resultados de concreto convencional e concreto autoadensável

A Figura 16 apresenta a comparação entre as resistências últimas ao cisalhamento pela proporção de armadura transversal dos corpos de prova de CC e CAA.

Figura 16 - Gráfico comparativo da resistência última ao cisalhamento direto do concreto convencional e concreto autoadensável.



Fonte: Autor (2021)

A resistência última ao cisalhamento dos exemplares de CAA apresentaram valores inferiores, sendo a redução da resistência na faixa de 2,38% e 19,51% (redução média de 13,51%) em relação ao CC. Os resultados encontrados demonstram concordância com a bibliografia de Kim et al. (2010), Lachemi, Hossain e Lambros (2005), Helincks et al. (2013), onde o comportamento pode ser explicado pela diminuição da parcela de resistência por intertravamento dos agregados no CAA, devido a diminuição do volume de agregados graúdos na matriz.

O CAA2 indica uma tendência de aumento na resistência, quase se igualando à do CC2 (diferença de 2,38%), o que pode ser explicado pela melhora na aderência do CAA à armadura, aumentando a contribuição da parcela de resistência pelo atrito (HELINCKS et al., 2013; ZHU; SONEBI; BARTOS, 2004; SAVARIS; PINTO, 2021).

4.4 Análise comparativa com equações da literatura

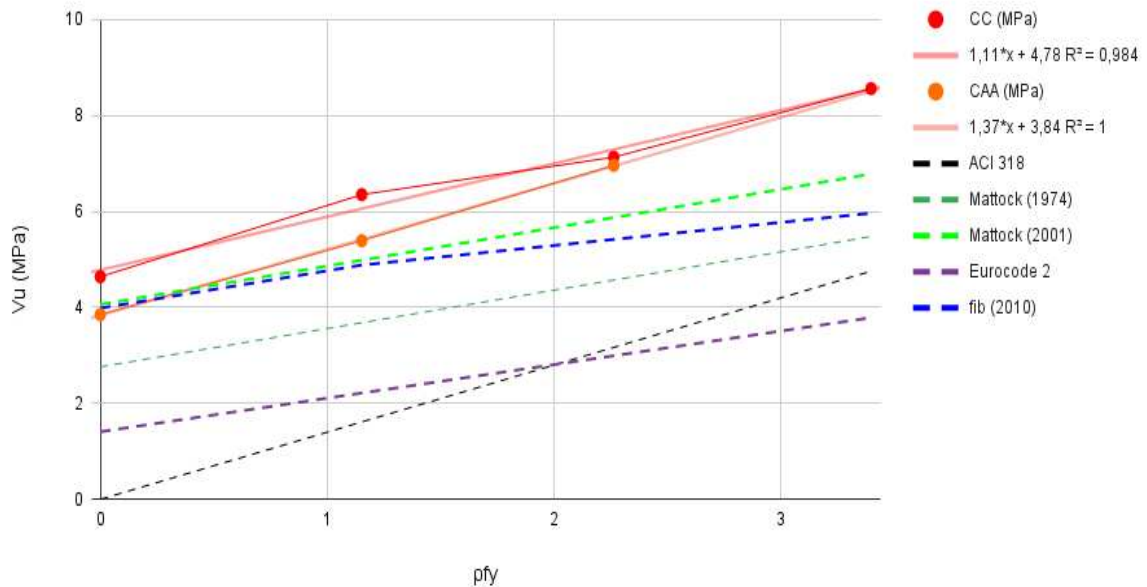
Utilizando as equações das normas e literatura apresentadas no trabalho, os dados dos ensaios foram comparados com os resultados das estimativas das equações, disposto na Tabela 8.

Tabela 8 - Estimativa de resistência ao cisalhamento por equações de normas e literatura.

ρf_y	ACI 318 (MPa)	Mattock (1974)	Eurocode 2	Mattock (2001)	Randl (2013)
0	0,0	2,76	1,41	4,06	3,99
1,15	1,61	3,68	2,22	4,98	4,88
2,26	3,17	4,57	2,99	5,87	5,42
3,40	4,75	5,48	3,79	6,78	5,96

Fonte: Autor (2021)

O gráfico da Figura 17 dispõe o comparativo entre os resultados dos exemplares do estudo com as equações da literatura. Para tal, foram utilizadas as linhas de tendência das equações formadas utilizando os dados dos testes de cisalhamento direto feitos para o CC e o CAA.

Figura 17 - Gráfico comparativo da resistência última ao cisalhamento direto do concreto convencional e concreto autoadensável com a literatura.

Fonte: Autor (2021)

Tanto para o CC quanto para o CAA, as estimativas da ACI 318 (2019) são conservadoras, como anteriormente apontado pela literatura (MATTOCK, 2001; RAHAL; KHALEEFI; AL-SANEE, 2016). A norma Eurocode 2 (2004) considera uma parcela de resistência inicial, atribuída a resistência do concreto, como disposto inicialmente por Walraven e Reinhardt (1981). É possível notar a diferença entre as equações de Mattock (1974) e Mattock (2001), sendo essas atribuídas as diferenças nas resistências à compressão e resistência ao escoamento do aço disponíveis nas diferentes épocas dos estudos.

As equações propostas por fib (2010), por discriminar melhor os fatores que caracterizam o fenômeno, discriminando os mecanismos e apresentando os coeficientes calibrados para as resistências atuais, representa melhores estimativas para a resistência última ao cisalhamento. É possível notar que o corpo de prova CAA0, espécime sem armadura transversal, fica abaixo das curvas de Randl (2013), Mattock (2001). As equações referentes aos estudos são calibradas para interfaces de CC, o que indica a necessidade de calibrar as equações para interfaces de CAA.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na presente pesquisa, foram comparados os resultados das resistências ao cisalhamento direto último de dois traços de concreto, sendo um convencional e outro autoadensável.

5.1 Principais conclusões

As principais conclusões são descritas a seguir:

1. A resistência última ao cisalhamento dos exemplares de CAA apresentaram valores inferiores para baixas taxas de armadura, sendo a redução da resistência na faixa de 2,38% e 19,51% (redução média de 13,51%) em relação ao CC. Esse fenômeno pode ser explicado pela menor resistência pelo intertravamento dos agregados do CAA.
2. Devido a uma melhor aderência da matriz do CAA à armadura, aumentando a tensão normal à interface e conseqüentemente a parcela de resistência de atrito cisalhamento, comparando ao resultado obtido na presente pesquisa é notado uma aproximação das resistências últimas ao cisalhamento quanto maior a taxa de armadura.
3. As normativas ACI 318 (2019), Eurocode 2 (2004) apresentam estimativas conservadoras.
4. As equações propostas por fib (2010), por discriminar melhor os componentes do mecanismo de resistência ao atrito cisalhamento, exibem valores mais próximos da realidade.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, são sugeridos:

- Utilizar extensômetros e medidores de tensão na armadura para avaliar melhor a evolução das deformações mecânicas e os esforços nos corpos de prova.
- Estudar o efeito com concretos de maiores resistências, como por exemplo concretos de ultra alto desempenho (CUAD) ou com adição de fibras.
- Aumentar as dimensões do corpo de prova ou estabilizar o plano de cisalhamento para evitar flexão da aba superior.
- Analisar para maiores taxas de armadura para averiguar se a aderência do CAA à armadura pode resultar em maiores resistências ao cisalhamento.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318-19**: Building code requirements for structural concrete. Farmington Hills, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR 15823-4**: Concreto autoadensável parte 4: Determinação da habilidade passante métodos da caixa L e da caixa U. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR 15823-5**: Concreto autoadensável parte 5: Determinação da viscosidade método do funil V. Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR 5739**: Concreto — ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018
- BIRKELAND, P. W.; BIRKELAND, H. W. **Connections in precast concrete construction**. ACI JOURNAL, Proceedings, v. 63, p. 345–368, doi:10.14359/10146, Março 1966.
- COMITE EUROPEEN DE NORMALISATION. **Eurocode 2: Design of concrete structures** n1992-1-1. Bruxelas, 2004.
- DESNERCK, P.; SCHUTTER, G. D.; TAERWE, L. **Shear friction of reinforced self-compacting concrete members**. Materials Science, v. 261, p. 133–144, doi:10.14359/51663206, 2009.
- FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY - FIB. **fib Model Code 2010**. Lausanne, Suíça, Março 2010. 318 p.
- HARRIES, K. A.; ZENO, G.; SHAHROOZ, B. **Toward an improved understanding of shear-friction behavior**. Structural Journal, v. 109, p. 835–844, Novembro 2012.
- HAWKINS, N. M. **Shear strength of slabs with shear reinforcement**. Shear in Reinforced Concrete, 318Reference, v. 11, p. 785–815, Janeiro 1974.
- HELINCKS, P. et al. **Structural behaviour of powder-type self-compacting concrete: Bond performance and shear capacity**. Engineering Structures, v. 48, p. 121 – 132, doi:10.1016/j.engstruct.2012.08.035, 2013.
- HOFBECK, J. A.; IBRAHIM, I. O.; MATTOCK, A. H. **Shear transfer in reinforced concrete**. Journal Proceedings, v. 66, p. 119–128, doi:10.14359/7349, Fevereiro 1969.
- HUBER, T.; HUBER, P.; KOLLEGGER, J. **Influence of aggregate interlock on the shear resistance of reinforced concrete beams without stirrups**. Engineering Structures, v. 186, p. 26–42, doi:10.1016/j.engstruct.2019.01.074, Janeiro 2019.
- HWANG, S.-J.; YU, H.-W.; LEE, H.-J. **Theory of interface shear capacity of reinforced concrete**. Journal of Structural Engineering, v. 126, p. 700–707, doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:6(700), Junho 2000.

INCE, R.; YALCIN, E.; ARSLAN, A. **Size-dependent response of dowel action in r.c. members.** *Engineering Structures*, v. 29, p. 955–961, doi:10.1016/j.engstruct.2006.07.006, Junho 2007.

KIM, Y. H. et al. **Shear characteristics and design for high-strength self-consolidating concrete.** *Journal of Structural Engineering*, v. 136, p. 989–1000, doi:10.1061/(ASCE)ST.1943–541X.0000194, 2010.

LACHEMI, M.; HOSSAIN, K. M. A.; LAMBROS, V. **Shear resistance of self-consolidating concrete beams — experimental investigations.** *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 32, p. 1103–1113, doi:10.1139/105–066, 2005.

MATTOCK, A. H. **Shear transfer in concrete having reinforcement at an angle to the shear plane.** *American Concrete Institute Publication SP-42*, v. 11, p. 17–42, Abril 1974.

MATTOCK, A. H. **Shear friction and high-strength concrete.** *ACI Structural Journal*, v. 98, p. 50–59, doi:10.14359/10146, Fevereiro 2001.

MATTOCK, A. H.; HAWKINS, N. M. **Shear transfer in reinforced concrete - recent research.** *PCI Journal*, v. 17, p. 55–75, doi:10.15554/pcij.03011972.55.75, Abril 1972.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Concrete Technology. [S.l.]:** Prentice Hall, 2010. ISBN 9780273732198.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. **Shear friction capacity of self-consolidating concrete.** *Journal of Advanced Concrete Technology*, v. 1, n. 1, p. 5–15, doi:10.3151/jact.1.5, Março 2003.

OZAWA, K. et al. **Development of high performance concrete based on the durability design of concrete structures.** *Proceedings 2nd East-Asia and Pacific Conference in Structural Engineering and Construction (EASEC-2)*, v. 1, p. 445–450, Janeiro 1989.

PUFAL, K. M. **COMPARATIVO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DIRETO ENTRE CONCRETOS AUTOADENSÁVEL E CONVENCIONAL.** 2017. 69 p. Trabalho de Conclusão de Curso, Bacharel em Engenharia Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

RAHAL, K.; KHALEEFI, A.; AL-SANEE, A. **An experimental investigation of shear-transfer strength of normal and high strength self-compacting concrete.** *Engineering Structures*, v. 109, p. 16–25, doi:10.1016/j.engstruct.2015.11.015, 2016.

RANDL, N. **Design recommendations for interface shear transfer in fib model code 2010.** *Structural Concrete*, v. 14, p. 230–241, doi:10.1002/suco.201300003, Março 2013.

RIBEIRO, W. V. de M.; SAVARIS, G. **Self-compacting concrete direct shear strength by push-off tests.** XXIV Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR, 2019. Disponível em: <<https://eventos.utfpr.edu.br//sicite/sicite2019>>.

SANTOS, P. M.; JULIO, E. N. B. S. **A state-of-the-art review on shear-friction.** Engineering Structures, v. 45, p. 435–448, doi:10.1016/j.engstruct.2012.06.036, Agosto 2012.

SAVARIS, G. **ESTUDO DA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL.** 207 p. Tese (Doutorado) — Tese Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

SAVARIS, G.; PINTO, R. C. de A. **Shear friction capacity of self-consolidating concrete.** Rev. IBRACON Estrut. Mater., v. 24, n. 01, p. e14102, doi:10.1590/S198341952021000100002, 2021.

WALRAVEN, J.; FRENAY, J.; PRUIJSSERS, A. **Influence of concrete strength and load history on the shear friction capacity of concrete members.** PCI Journal, Springer Nature, v. 44, n. 3, p. 66–84, doi:10.15554/pcij.01011987.66.84, Fevereiro 1987.

WALRAVEN, J. C.; REINHARDT, H. W. **Theory and experiments on the mechanical behaviour of cracks in plain and reinforced concrete subjected to shear loading.** HERON, v. 26, Janeiro 1981. Disponível em: <<http://resolver.tudelft.nl/uuid:3d68bd1a-465d4590-b33c-7ede99bbc251>>.

XIA, J. et al. **Shear-friction behavior of concrete-to-concrete interface under direct shear load.** Engineering Structures, v. 238, p. doi:10.1016/j.engstruct.2021.112211, Abril 2021.

ZHU, W.; SONEBI, M.; BARTOS, P. J. M. **Bond and interfacial properties of reinforcement in self-compacting concrete.** Cement and Concrete Research, v. 37, n. 7, p. 442–448, doi:10.1007/BF02481580, Agosto 2004.

ZILCH, K.; REINECKE, R. **Shear strength of slabs with shear reinforcement.** Fib International symposium on high performance concrete., p. 25–27, Setembro 2000.