

Experimental investigation on shear resistance of self-consolidating concrete beams

Análise experimental da resistência ao cisalhamento de vigas de concreto autoadensável

G. SAVARIS ^a

gsavaris@utfpr.edu.br

<https://orcid.org/0000-0002-3311-2426>

R. C. A. PINTO ^b

r.pinto@ufsc.br

<https://orcid.org/0000-0002-0479-080X>

Abstract

Self-consolidating concrete stands out for its high fluidity and stability, which are obtained by the reduction of the coarse aggregate dimensions and content in the mixture and also by the addition of superplasticizer and viscosity modifiers. An experimental test program was carried out to evaluate the influence of these particularities of self-consolidating concrete mixtures on the shear capacity of beams with shear reinforcement. Four mixtures of self-compacting concrete and two mixtures of conventionally vibrated concrete with different coarse aggregate size and volume were used for the production of beams to be tested under flexure. The experimental results were compared to those estimated by the ACI-318, CAN A23.3, EC-2 and NBR 6118 design codes. The results demonstrated that the reduction of coarse aggregate dimensions and content in self-compacting concrete mixture did not significantly influence the ultimate shear strength. The shear strengths obtained experimentally were considered adequate to codes estimates, for both concrete types.

Keywords: self-consolidating concrete, shear resistance, aggregate interlock, beams.

Resumo

O concreto autoadensável se destaca pela alta fluidez e estabilidade, sendo estas propriedades obtidas com a redução da granulometria e volume de agregado graúdo da mistura, adição de materiais finos e a utilização de aditivos superplastificantes e modificadores de viscosidade. Um programa experimental foi realizado para avaliar a influência destas particularidades de dosagem do concreto autoadensável na resistência ao cisalhamento de vigas de concreto com armadura transversal. Quatro misturas de concreto auto adensável e duas misturas de concreto convencionalmente vibrado com dimensão máxima e volume de agregado graúdo diferenciados foram utilizados para produção de vigas a serem ensaiadas a flexão com o intuito de comparar os resultados obtidos com os os estimados pelas normas de dimensionamento de estruturas ACI-318, CAN A23.3, EC-2 e NBR 6118. Os resultados demonstraram que a redução da granulometria e volume de agregado graúdo no concreto autoadensável não influenciaram significativamente na resistência última ao cisalhamento. Entretanto, verificou-se um aumento da parcela de resistência atribuída ao concreto e mecanismos alternativos nas vigas de concreto autoadensável em relação ao concreto convencionalmente vibrado. As resistências ao cisalhamento obtidas experimentalmente foram consideradas adequadas às estimativas das normas, tanto para o concreto convencional quanto para o autoadensável.

Palavras-chave: concreto autoadensável, resistência ao cisalhamento, engrenamento de agregados, vigas.

^a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Toledo, Toledo, PR, Brasil;

^b Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.

1. Introdução

No final da década de 80, a escassez de mão de obra qualificada e a necessidade de aumentar a durabilidade das estruturas de concreto armado levaram os pesquisadores da Universidade de Tóquio a desenvolver um concreto de alto desempenho, caracterizado pela capacidade de fluir pelas fôrmas e entre as armaduras sem a necessidade de adensamento mecânico, denominado concreto autoadensável [1]. A alta fluidez deste concreto é obtida pela utilização de aditivos superplastificantes, pela redução do volume e da dimensão máxima do agregado graúdo e pelo aumento do volume de agregado miúdo. Além disso, a viscosidade e a coesão são garantidas pela complementação da dosagem com adições de materiais finos, tais como, cinza volante, cinza da casca de arroz, escória de alto forno, sílica ativa e os fíleres de calcário e quartzo [2].

Devido a estas particularidades na dosagem e por se tratar de um material relativamente novo existe certa restrição em seu uso, justificada pela necessidade de mão de obra qualificada para produção e principalmente pela ausência de dados a respeito do desempenho estrutural deste material [3].

Segundo Domone [4], as resistências à tração e compressão no concreto autoadensável são similares às do concreto convencional, entretanto o módulo de elasticidade pode ser até 40% menor no concreto autoadensável para concretos de baixas resistências à compressão, próximo a 20 MPa, e 5% menor em concretos de alta resistência, acima de 90 MPa, em relação ao concreto convencional. Esta redução do módulo de elasticidade no concreto autoadensável é ocasionada pelo menor volume de agregados graúdos e aumento do volume de pasta do concreto, acarretando em maiores deformações nas estruturas no estado limite de serviço [5][6].

Além disso, algumas incertezas sobre a resistência ao cisalhamento do concreto autoadensável e a falta de especificação do concreto autoadensável nas normas atuais de dimensionamento de estruturas de concreto armado geram certo desconforto aos projetistas quanto ao seu emprego [3].

Estudos com concretos convencionais demonstram que a dimensão máxima do agregado graúdo influencia diretamente no engrenamento dos agregados entre as faces das fissuras. Dependendo da mistura a resistência ao cisalhamento pode ser maior em concretos produzidos com agregados de maior dimensão [7] [8]. Devido ao concreto autoadensável requerer em sua dosagem menor quantidade de agregado graúdo e menor dimensão destes agregados, este material pode apresentar uma redução na resis-

tência ao cisalhamento em relação ao concreto convencional [3]. Porém, esta redução da resistência ao cisalhamento no concreto autoadensável não é de consenso entre os pesquisadores.

Realizando ensaios de cisalhamento direto, Desnerck et al. [5] constataram nos concretos autoadensáveis resistência superior ao concreto convencional, sendo esta atribuída às melhorias na matriz do concreto providas pela utilização de uma quantidade maior de materiais finos, acarretando maior atrito entre as faces das fissuras, e conseqüentemente suprimindo a redução da parcela de engrenamento dos agregados. Entretanto, Kim et al. [9] constataram um maior engrenamento dos agregados no concreto convencional em relação ao autoadensável, sendo também verificado um aumento da resistência ao cisalhamento, independente do tipo de agregado, com o acréscimo do volume de agregado graúdo na dosagem do concreto.

Constata-se assim que, apesar do concreto autoadensável existir a cerca de três décadas, não há uma definição exata quanto ao seu comportamento frente a tensões cisalhantes, havendo, portanto, a necessidade de se avaliar a influência das particularidades da dosagem do concreto autoadensável, tais como a utilização de agregados graúdos de menores dimensões e em volume reduzido, na resistência ao cisalhamento de vigas empregando este material. Neste sentido, este trabalho pretende contribuir para reduzir as incertezas sobre o desempenho estrutural do concreto autoadensável quanto às solicitações tangenciais, através da formação de um banco de dados de ensaios experimentais e comparação destes resultados com valores calculados empregando as equações normativas vigentes.

2. Materiais e programa experimental

O programa experimental foi idealizado para comparar a resistência ao cisalhamento de vigas de concreto convencional vibrado e autoadensável, com armadura transversal, através de ensaios de flexão a quatro pontos.

2.1 Composição dos concretos e moldagem das vigas

A partir de um traço de concreto convencional foram definidas seis misturas de concreto, tendo como variáveis duas dimensões máximas de agregados graúdos e dois volumes de agregado graúdo na composição, identificadas por siglas constituídas pelo tipo de concreto, convencional (CC) ou autoadensável (CA), pela

Tabela 1

Proporções de materiais das dosagens para produção de 1 m³ de concreto

Concreto	Cimento (kg)	Filer (kg)	Areia natural (kg)	Areia artificial (kg)	Brita 0 (kg)	Brita 1 (kg)	Água (kg)	Aditivo (kg)
CC1	385,18	—	418,54	417,41	—	964,59	200,29	—
CC0	385,18	—	418,54	417,41	961,10	—	200,29	—
CA1N	385,18	214,77	312,88	312,04	—	964,59	200,29	0,87
CA0N	385,18	214,77	312,88	312,04	961,10	—	200,29	0,77
CA1R	385,72	215,08	456,45	455,23	—	676,02	200,57	1,15
CA0R	385,72	215,08	456,45	455,23	673,58	—	200,57	1,11

Tabela 2

Propriedades dos concretos no estado fresco e resistência média à compressão no estado endurecido

Concreto	Abatimento (mm)	Espalhamento (mm)	Massa específica (kg/m ³)	Funil V (s)	Caixa L (mm)	f _{cm} (MPa)
CC1	90	—	2424	—	—	47,0
CC0	85	—	2391	—	—	41,2
CA1N	—	73,5	2391	19,63	0,87	48,2
CA0N	—	70,5	2391	21,52	0,81	42,7
CA1R	—	79,5	2367	11,94	0,87	47,7
CA0R	—	78,5	2421	10,42	0,83	47,4

dimensão máxima do agregado, 9,5 mm (0) ou 19,0 mm (1), e volume de agregado graúdo, normal (N) ou reduzido em 30% (R). Nos concretos com redução do volume de agregado graúdo a mistura foi complementada com agregado miúdo, além disso, os concretos autoadensáveis receberam adição de fíler calcário, para promover maior viscosidade, e aditivo superplastificante à base de policarboxilato, para aumentar a trabalhabilidade.

Para produção dos concretos utilizou-se Cimento Portland de Alta Resistência Inicial Resistente a Sulfatos, CP V-ARI-RS, permitindo a desforma das vigas após 24 horas da moldagem. O agregado miúdo utilizado era composto de 50% de areia quartzosa, com módulo de finura igual a 2,23 e massa específica de 2,67 kg/dm³, e 50% de areia de britagem de rocha granítica, com módulo de finura igual a 3,8 e massa específica de 2,68 kg/dm³. Os agregados graúdos utilizados eram provenientes de rocha granítica, britadas com dimensão máxima característica de 9,5 mm e 19,0 mm e massa específica iguais a 2,67 kg/dm³. O fíler calcário calcítico, oriundo da região metropolitana de Curitiba-PR, composta em sua maioria de CaO, apresentou acima de 90% de material passante na peneira de 74µm. Na Tabela 1 são apresentadas as proporções de materiais em massa para produção de 1 m³ de concreto.

Todos os concretos foram produzidos com relação água cimento

igual a 0,52, sendo a dosagem do aditivo superplastificante fixada inicialmente em 0,3% da massa de cimento, porém durante a produção dos concretos este valor foi corrigido de acordo com a necessidade de cada traço, ficando entre 0,2% e 0,3% da massa de cimento.

Nos concretos autoadensáveis com volume normal de agregado graúdo houve a substituição de 25% da massa de agregado miúdo seco por fíler calcário, sendo utilizada a mesma quantidade de fíler nos concretos com volume de agregado graúdo reduzido, mantendo assim a proporção de materiais finos em torno de 600 kg/m³ de concreto em todos os concretos autoadensáveis. Os concretos CA0N, CA1N, CC0 e CC1 apresentam 56% de teor de argamassa, enquanto que nos concretos CA1R e CA0R este teor passou para 69% devido à redução do volume de agregado graúdo em 30% e complementação com agregados miúdos.

Durante o estudo de definição das misturas o concreto foi avaliado no estado fresco quanto à sua trabalhabilidade através do ensaio de abatimento do tronco de cone, conforme especificado pela norma ABNT NBR NM 67 [10], para o concreto convencional, e ensaios de espalhamento, habilidade passante e viscosidade plástica aparente para o concreto autoadensável, conforme ensaios definidos pela norma ABNT NBR 15823 [11]. As resistências à compressão axial dos concretos utilizados para moldagem das vigas foram obtidas utilizando corpos de prova cilíndricos (10 cm de diâmetro e 20 cm de altura), conforme ensaio definido pela norma ABNT NBR 5739 [12], sendo os resultados destes ensaios apresentados na Tabela 2.

Para produção dos concretos foi utilizada uma betoneira com capacidade de mistura de 150 litros, de forma que com cada betoneira foram moldadas três vigas e três corpos de prova cilíndricos. As formas foram confeccionadas com chapas de MDF (*Medium density fiberboard*) plastificado e o lançamento do concreto foi realizado de forma manual em toda a extensão das vigas, utilizando um vibrador de imersão com agulha de 25 mm de diâmetro para adensamento apenas das vigas de concreto convencional.

Após 24 horas da concretagem, as vigas e os corpos de prova foram desmoldados e armazenados sob uma lona plástica, umedecidos diariamente durante os sete primeiros dias e permanecendo nas condições do laboratório, com temperatura média de 22,5 °C e umidade relativa do ar em torno de 75,4%, até a idade de 28 dias, quando foram realizados os ensaios de flexão e resistência à compressão axial.

2.2 Características das vigas ensaiadas e instrumentação dos ensaios

O dimensionamento das vigas levou em consideração a ruptura por

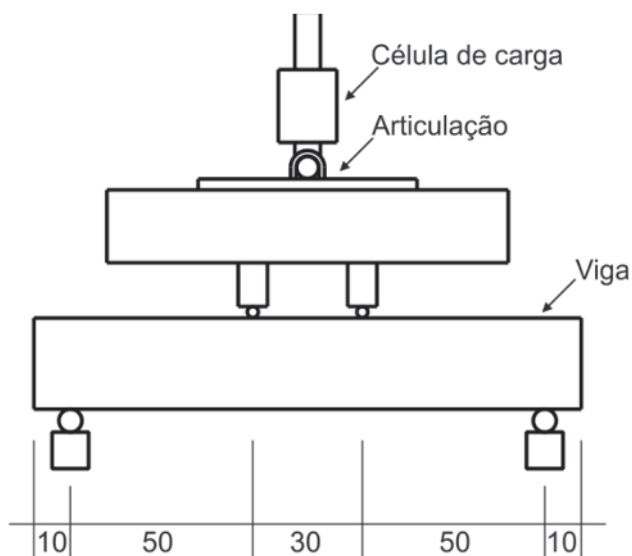


Figura 1
Esquema do ensaio de flexão a quatro pontos (medidas em cm)

cisalhamento, quando esgotada a resistência da armadura transversal. As vigas apresentavam seção transversal retangular de 10 cm x 25 cm e comprimento total de 150 cm, sendo a distância entre os apoios igual a 130 cm. Os ensaios de flexão nas vigas biapoia-das foram realizados com carregamento aplicado através de duas cargas pontuais distando 50 cm dos apoios, com relação entre o vão cisalhante e a altura efetiva da seção transversal (a/d) próximo a 2,25, conforme esquema de ensaio apresentado na Figura 1.

Todas as vigas possuíam armadura longitudinal composta por duas barras de aço CA-50, com 16 mm de diâmetro, posicionadas na parte inferior da seção transversal, correspondente a uma taxa de armadura longitudinal de 1,61%, além de duas barras longitudinais de aço CA-60 (5.0 mm) posicionadas na parte superior da seção transversal. A armadura transversal era composta por estribos retangulares espaçados em 20 cm ao longo de toda a viga, conforme apresentado na Figura 2.

A aplicação da carga foi realizada utilizando um macaco hidráulico acoplado a uma célula de carga com capacidade de 200 kN, através de incremento de carga de 500 N/s até se alcançar a ruptura. Durante o carregamento foram realizadas três paradas para demarcação e anotação da quantidade de fissuras, quando a carga aplicada atingiu 30 kN, 60 kN e 90 kN. Estes valores foram definidos a partir da capacidade de carga teórica das vigas, visando avaliar o comportamento das vigas nos estádios I e II.

Para medir o deslocamento vertical no centro da viga foram utilizados dois transdutores de deslocamento (LVDTs), com capacidade de medição de 10 mm, fixados em barras de alumínio instaladas nas laterais das vigas, apoiadas em roldanas parafusadas nas extremidades das vigas e tendo como referência do deslocamento cantoneiras de aço parafusadas na altura da linha neutra. As aberturas das fissuras inclinadas de cisalhamento foram medidas nos dois vãos cisalhantes utilizando LVDTs instalados distantes 15 cm dos pontos de aplicação da carga, fixados com parafusos na parte superior da face lateral da viga e em um perfil de aço parafusado na face inferior da viga, a posição dos LVDTs são demonstradas na Figura 3.

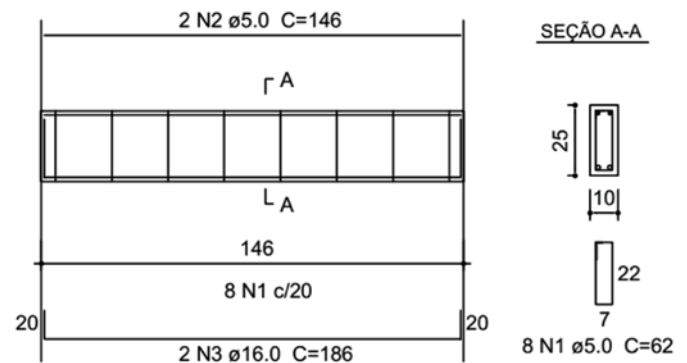


Figura 2
Detalhamento da armadura das vigas

3. Resultados e discussões

3.1 Modo de fissuração e resistência ao cisalhamento

As vigas apresentaram comportamento semelhante quanto à fissuração, iniciando com a formação de fissuras de flexão na parte central, antes da parada de 30 kN, e a formação de fissuras de cisalhamento em valores de força cortante próxima a 35 kN, ocorrendo a ruptura com abertura da fissura de cisalhamento superior a 1,0 mm.

Na Figuras 4 a 6 são detalhadas as fissuras apresentadas pelas vigas após ruptura, sendo indicada a carga, em kN, correspondente à etapa em que a fissura foi demarcada e com a letra R a fissura que ocorreu entre a carga de 90 kN e a ruptura. A linha pontilhada corresponde à inclinação da fissura de cisalhamento, sendo seu valor anotado na parte superior da viga. A inclinação das fissuras de cisalhamento apresentou valores entre 26,0° e 54,1°, não havendo uma relação direta entre a inclinação da

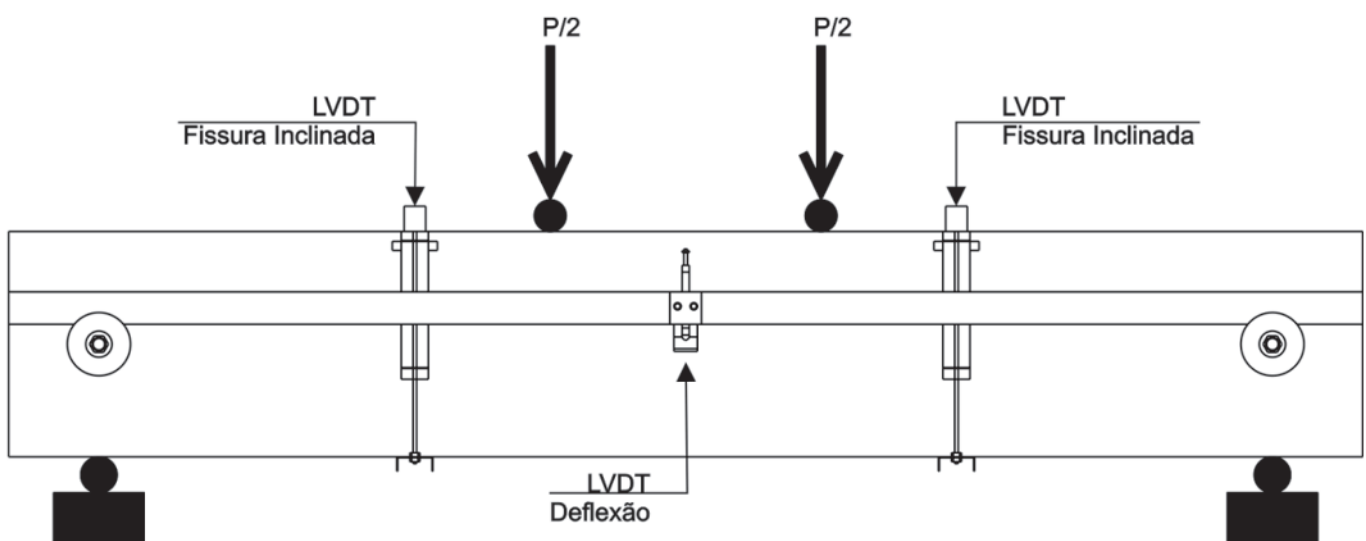


Figura 3
Instrumentação das vigas

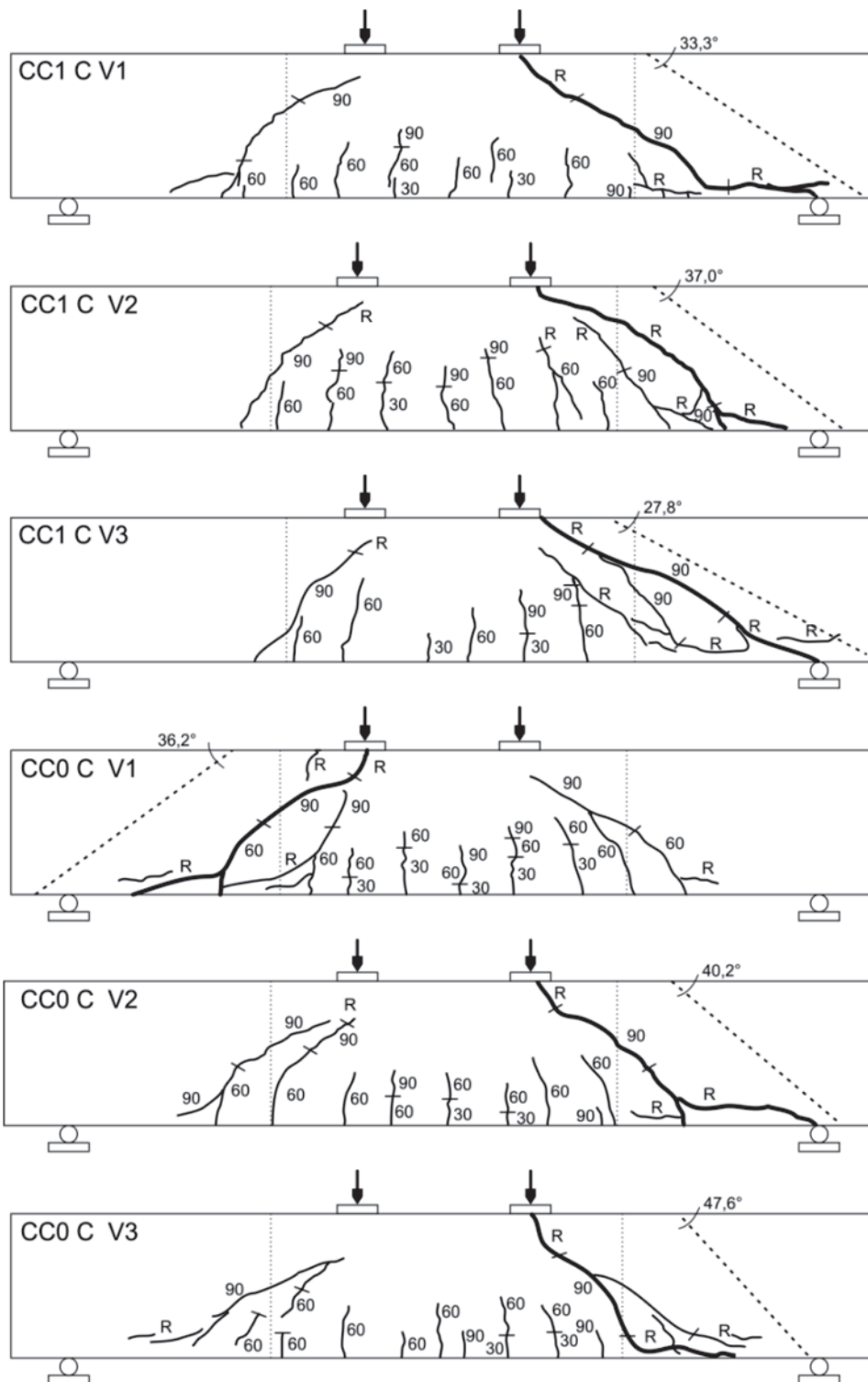


Figura 4
Fissuração das vigas de concreto convencional

fissura e a resistência última das vigas, como ocorrido em vigas sem armadura transversal apresentadas em Savaris e Pinto [13]. Durante a realização dos ensaios de duas vigas, CA1N V1 e CA1R V3, ocorreram falhas na aplicação da carga e na aquisição de dados, sendo então estes exemplares descartados. Dentre as misturas estudadas não houve distinção na fissuração das vigas, com quantidade de fissuras semelhantes entre as misturas e grande variação na inclinação da fissura de cisalhamento. Nas vigas CC0 V3 e CA0N V2 a ruptura da armadura transversal ocorreu na extremidade da fissura principal de cisalhamento junto à armadura longitudinal e esta fissura apresentou inclinação superior a 45° ,

não sendo atravessada pela armadura transversal. Devido a este comportamento diferenciado os resultados obtidos para estas vigas foram desconsiderados.

Na Tabela 3 são apresentadas as forças cortantes últimas (V_u) resistidas pelas vigas e as médias destes valores para cada mistura de concreto.

Considerando que os concretos utilizados apresentaram pequena variação na resistência à compressão axial, com valores entre 41,2 MPa e 48,2 MPa, verifica-se que as composições dos concretos pouco influenciaram na resistência ao cisalhamento última das vigas. A redução da granulometria do agregado graúdo de

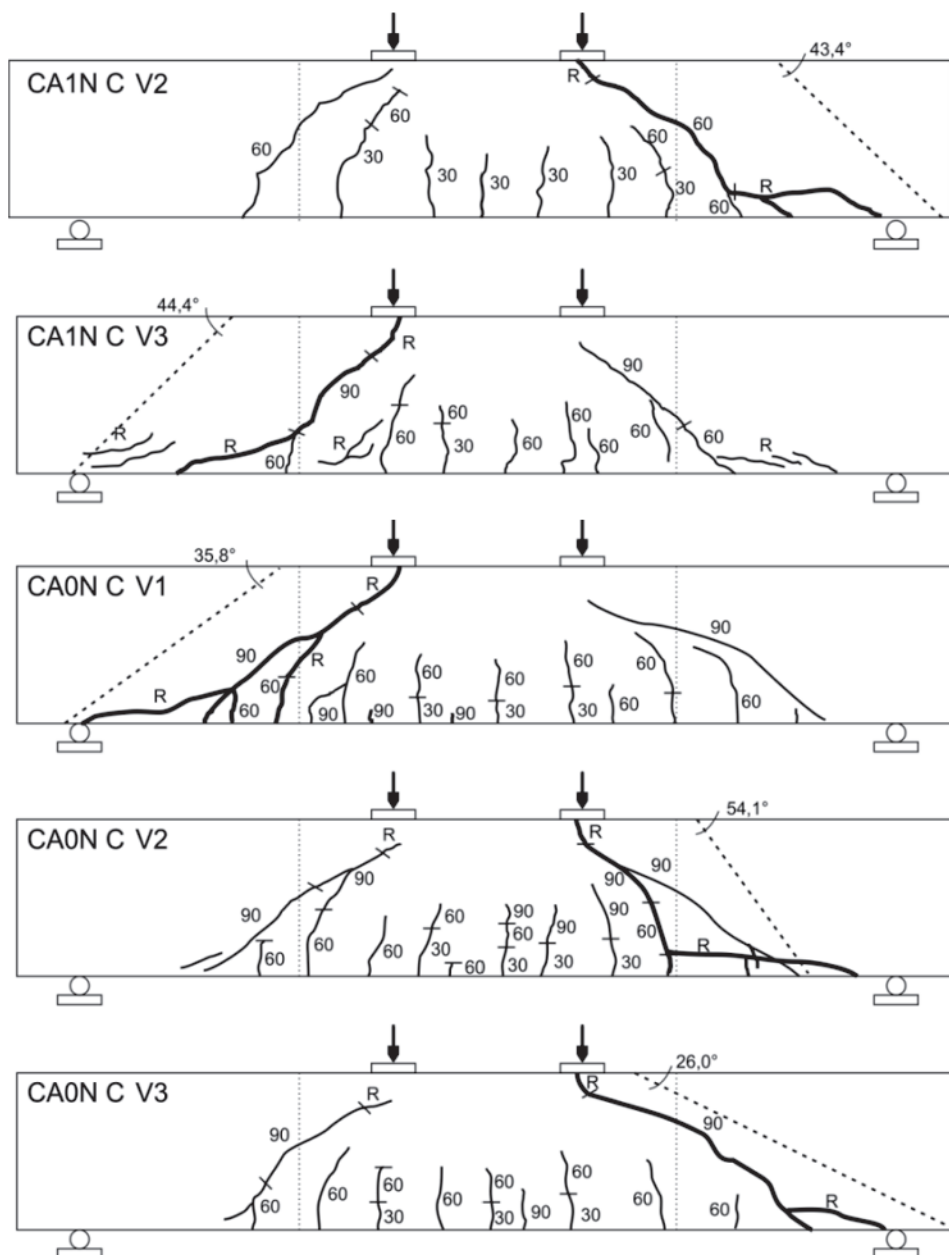


Figura 5

Fissuração das vigas de concreto autoadensável com volume normal de agregado

19 mm para 9,5 mm apresentou maior influência na resistência ao cisalhamento dos concretos convencionais, com redução de 10,2%, enquanto nos concretos autoadensáveis esta variação foi inferior a 5%. A redução do volume de agregado nos concretos autoadensáveis não apresentou efeito significativo na resistência ao cisalhamento, com variações inferiores a 3%.

3.2 Efeito da armadura transversal na resistência ao cisalhamento

Em ensaios experimentais de vigas sem armadura transversal,

Savaris e Pinto [13] verificaram que as vigas produzidas com concretos convencionais apresentaram maior resistência ao cisalhamento em relação aos concretos autoadensáveis, sendo a redução da resistência nos concretos autoadensáveis atribuída ao maior teor de materiais finos em sua composição e menor volume de agregado graúdo, reduzindo o efeito de engrenamento entre os agregados.

Para avaliar o efeito da presença da armadura transversal na resistência ao cisalhamento das vigas ensaiadas neste trabalho, os resultados obtidos foram comparados com os resultados de Savaris e Pinto [13], visto que estas vigas apresentavam as

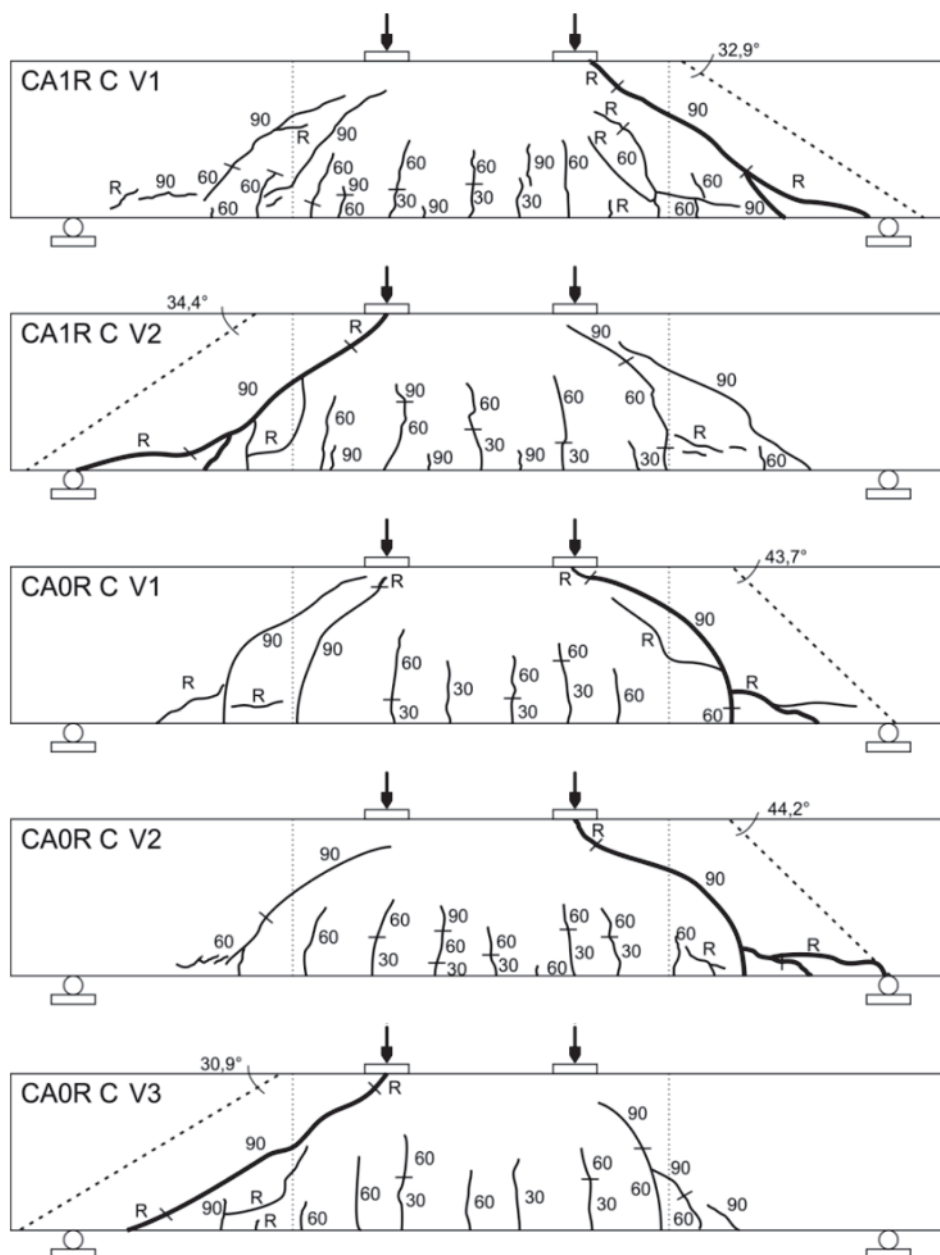


Figura 6
Fissuração das vigas de concreto autoadensável com volume reduzido de agregado

mesmas características geométricas, taxa de armadura longitudinal e composições nos concretos. Para isto, a parcela de força cortante resistida pela armadura transversal (V_{sw}), calculada empregando a Equação (1) e resultando 25,64 kN, foi subtraída da força cortante última obtida experimentalmente (Tabela 3), resul-

tando na parcela de resistência ao cisalhamento atribuída ao concreto e mecanismos alternativos (V_c).

$$V_{sw} = f_{yw} A_{sw} \quad (1)$$

onde:

V_{sw} : força cortante resistida pela armadura transversal;

f_{yw} : tensão de escoamento do aço da armadura transversal, obtida nos ensaios de tração para caracterização do material igual a 658 MPa;

A_{sw} : área de aço da armadura transversal, igual a 38,96 mm².

Para levar em consideração a variação da resistência à compressão dos concretos utilizados nas vigas com e sem armadura

Tabela 3

Forças cortantes últimas das vigas com armadura transversal

Concreto	V_u (kN)	$V_{u,m}$ (kN)	Desvio padrão (kN)
CC1 - V1	72,6		
CC1 - V2	70,5	72,6	2,05
CC1 - V3	74,6		
CC0 - V1	63,6		
CC0 - V2	66,7	65,1	2,19
CA1N - V2	71,8		
CA1N - V3	77,3	74,5	3,89
CA0N - V1	76,5		
CA0N - V3	65,1	70,8	8,06
CA1R - V1	70,4		
CA1R - V2	74,5	72,5	2,90
CA0R - V1	68,5		
CA0R - V2	68,4	70,6	3,78
CA0R - V3	75,0		

Tabela 4

Parcela de resistência atribuída ao concreto normalizada das vigas com e sem armadura transversal

Concreto	$V_{c,c,n}$ (kN.MPa ^{0.5})	$V_{c,s,n}$ (kN.MPa ^{0.5})	$V_{c,c,n}/V_{c,s,n}$ (kN.MPa ^{0.5})
CC1	6,84	6,71	1,02
CC0	6,15	5,95	1,04
CA1N	7,04	5,39	1,31
CA0N	6,91	5,22	1,32
CA1R	6,78	5,34	1,27
CA0R	6,53	5,37	1,22

Tabela 5

Equações das normas para estimativa da resistência ao cisalhamento de vigas

Norma	Parcela resistida pelo concreto	Parcela resistida pela armadura
ACI 318	$V_c = \frac{\sqrt{f_c} b_w d}{6}$	$V_s = \frac{A_{sw} f_{yw} d}{s}$
CAN A23.3	$V_c = \beta \sqrt{f_c} b_w d_v$ $\beta = \frac{0.4}{(1 + 1500 \varepsilon_x)} \frac{1300}{(1000 + S_{ze})}$ $\varepsilon_x = \frac{M/d_v + V}{2 E_s A_{sl}}$ $d_v \geq \begin{cases} 0.9 d \\ 0.72 h \end{cases}$	$V_s = \frac{A_{sw} f_{yw} d_v \cot \theta}{s}$ $\theta = 29 + 7000 \varepsilon_x$
	Em elementos sem armadura transversal:	
	$s_{ze} = \frac{35 d_v}{15 + a_g}$	
	Em elementos com armadura transversal:	
	$s_{ze} = 300$	
EC-2	$V_c = 0.18 k (100 \rho_l f_c)^{1/3} b_w d$ $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}}$	$V_s = \frac{A_{sw} z f_{yw} \cot \theta}{s}$ $21.8^\circ \leq \theta \leq 35^\circ$
NBR 6118 Modelo I	$V_c = V_{c0} = 0.6 f_{ct} b_w d$ $f_{ct} = 0.21 f_c^{2/3}$	$V_s = \frac{A_{sw} f_{yw} 0.9 d}{s}$
NBR 6118 Modelo II	$V_c = V_{c0} \frac{V_{Rd2} - V_{Sd}}{V_{Rd2} - V_{C0}}$ $V_{Rd2} = 0.54 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) f_{ck} b_w d \sin^2 \theta \cot \theta$	$V_s = \frac{A_{sw} f_{yw} 0.9 d \cot \theta}{s}$

transversal, normalizou-se a parcela de força cortante V_c , dividindo-a pela raiz quadrada da resistência à compressão do concreto. A Tabela 4 apresenta a parcela de força cortante última normalizada resistida pelo concreto e mecanismos complementares das vigas com armadura transversal ($V_{c,c,n}$), das vigas sem armadura transversal ($V_{c,s,n}$) e a relação entre estes valores, para cada mistura de concreto estudada.

A Tabela 4 indica que a resistência ao cisalhamento apresentou valores semelhantes nas vigas produzidas com concreto convencional com e sem armadura transversal. Entretanto, nas vigas de concreto autoadensável com armadura transversal as parcelas de resistência $V_{c,c,n}$ foram entre 22% e 32% superiores à resistência das mesmas vigas sem esta armadura. Este aumento da parcela V_c foi responsável por reduzir a variação das resistências últimas nas vigas com armadura transversal, suprimindo a menor resistência observada nas vigas de concreto autoadensável sem esta armadura anteriormente apresentadas por Savaris e Pinto [13].

Estes resultados podem ser atribuídos à maior aderência do concreto autoadensável às armaduras, ocasionada pelo uso de filer, como demonstrado nos estudos de Almeida Filho et al. [14], Desnerck et al. [5] e Helinckx et al. [15], acarretando em menor abertura da fissura de cisalhamento e conseqüente maior engrenamento entre os agregados. Ressalta-se que as vigas ensaiadas neste trabalho apresentavam taxa de armadura transversal próxima à mínima exigida por norma, indicando que pode ocorrer um maior aumento resistência ao cisalhamento em vigas de concreto autoadensável em relação às vigas de concreto convencional quando empregada elevada taxa de armadura transversal.

3.3 Comparação entre resistência experimental e estimada por normas

As expressões apresentadas pelas normas para estimar a resistência ao cisalhamento das vigas de concreto são empregadas no dimensionamento das estruturas, devendo apresentar valores apro-

ximados aos obtidos experimentalmente, de forma que com a introdução de coeficientes de ponderação da resistência dos materiais nestas equações seja garantida a segurança das edificações.

Os resultados obtidos experimentalmente nos ensaios de vigas foram comparados com os valores estimados pelas equações das normas americana ACI 318:2011 [16], canadense CAN3 A23.3:2004 [17], europeia EN 1992-1-1:2004 [18] e brasileira ABNT NBR 6118:2014 [19], calculados utilizando as equações apresentadas na Tabela 5, considerando os coeficientes de minoração das resistências unitários.

A resistência última de vigas com armadura transversal é obtida pela soma das parcelas resistidas pelo concreto e mecanismos complementares (V_c) e pelo aço (V_{sw}), com exceção da norma EN 1992-1-1:2004 [18] onde a contribuição do concreto e mecanismos complementares à treliça são desconsiderados, admitindo que a armadura transversal absorve integralmente o esforço cisalhante, considerando-se somente a parcela V_{sw} .

Na Tabela 6 são apresentadas as forças cortantes últimas obtidas experimentalmente, calculadas pelas equações normativas e a relação entre estes valores, para vigas com armadura transversal. No cálculo da parcela de força cortante resistida pela armadura nas equações da norma EN 1992-1-1:2004 [18] e Modelo II da norma ABNT NBR 6118:2014 [19] adotou-se os ângulos de 21,8° e 30°, respectivamente, resultando em valores mais elevados.

A relação entre as forças cortantes últimas experimentais e estimadas pelas normas apresentou valores entre 0,61 e 1,08. Apesar da diferenciação dos concretos quanto à trabalhabilidade, volume e dimensão máxima de agregado graúdo das composições não se constata influência destes fatores em relação à segurança das equações normativas no dimensionamento de vigas.

Nos concretos produzidos com agregado graúdo de menor granulometria verifica-se, na maioria dos casos, estimativas menos conservadoras, devido a estas vigas terem apresentado menor resistência ao cisalhamento, entretanto a variação não pode ser considerada significativa.

Tabela 6

Estimativas das normas para resistência ao cisalhamento de vigas

Viga	$V_{u,exp}$ (kN)	$V_{u,exp,m}$ (kN)	Estimativa força cortante última - $V_{u,teo}$ (kN)					Relação $V_{u,teo}/V_{u,exp}$				
			ACI 318	CAN A23.3	EC 2	NBR 6118 MI	NBR 6118 MII	ACI 318	CAN A23.3	EC 2	NBR 6118 MI	NBR 6118 MII
CC1 - V1	72,6											
CC1 - V2	70,5	72,6	53,6	46,2	63,5	61,8	72,3	0,74	0,64	0,87	0,85	1,00
CC1 - V3	74,6											
CC0 - V1	63,6	65,1	51,9	47,6	63,5	58,8	70,1	0,80	0,73	0,98	0,90	1,08
CC0 - V2	66,7											
CA1N - V2	71,8	74,5	53,9	45,8	63,5	62,4	72,6	0,72	0,61	0,85	0,84	0,97
CA1N - V3	77,3											
CA0N - V1	76,5	70,8	52,4	46,1	63,5	59,6	69,8	0,74	0,65	0,90	0,84	0,99
CA0N - V3	65,1											
CA1R - V1	70,4	72,5	53,8	46,4	63,5	62,2	72,8	0,74	0,64	0,88	0,86	1,00
CA1R - V2	74,5											
CA0R - V1	68,5	70,6	53,7	46,9	63,5	62,0	73,0	0,76	0,66	0,90	0,88	1,03
CA0R - V2	68,4											
CA0R - V3	75,0											

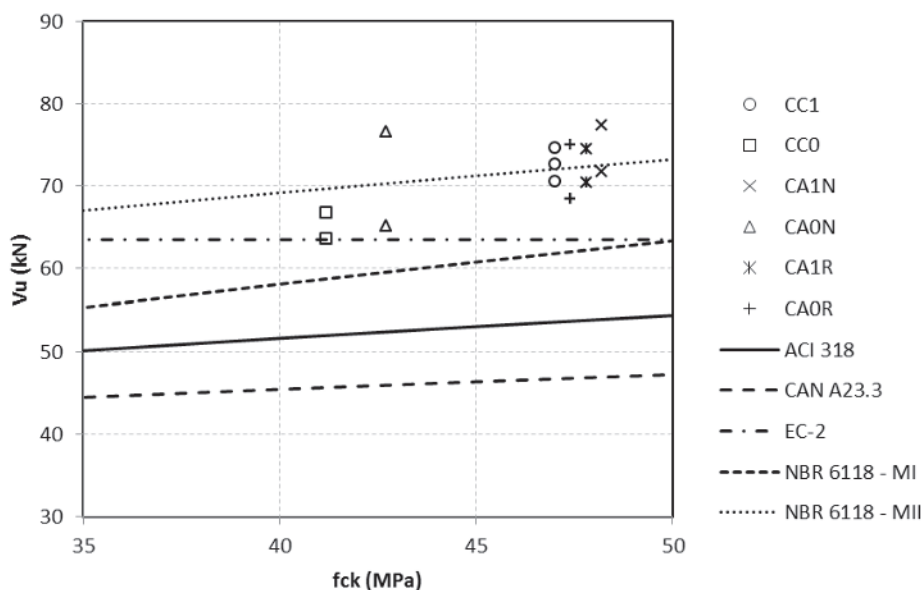


Figura 7

Forças cortantes últimas estimadas pelas normas e obtidas experimentalmente vs. resistência à compressão do concreto

Apesar de adotar um modelo teórico mais refinado, baseado em campos de compressão, que leva em consideração uma série de fatores, tais como a área de aço da armadura longitudinal, a magnitude do momento fletor e da força cortante e o espaçamento entre as fissuras, os resultados da norma CAN3 A23.3:2004 [17] são conservadores em relação às demais, com estimativas de resistência ao cisalhamento 0,61 e 0,73 da resistência obtida experimentalmente.

Apesar de desconsiderar a força cortante resistida pelo concreto, a norma EN 1992-1-1:2004 [18] apresentou resultados próximos aos estimados pelo modelo I da norma ABNT NBR 6118:2014 [19], em torno de 90% da força cortante última obtida experimentalmente.

Os valores estimados pela norma brasileira apresentaram maior aproximação com os resultados experimentais, principalmente quando utilizado o modelo II com ângulo de inclinação da biela igual a 30°, com estimativas entre 0,97 e 1,08 da carga última.

Ressalta-se que, apesar de algumas estimativas terem apresentado valores semelhantes ou superiores aos valores obtidos experimentalmente, isto não reflete insegurança por parte das normas, visto que nas normas americana e canadense a tensão de escoamento da armadura transversal é limitada em 400 MPa enquanto nas normas europeia e brasileira este valor é de 435 MPa e para os cálculos utilizou-se o valor obtido nos ensaios de tração do aço, igual a 658 MPa, havendo portanto uma margem de segurança na resistência do aço em torno de 50%.

Na Figura 7 são apresentadas as estimativas de força cortante última das normas em função da resistência à compressão axial do concreto, sendo indicados os valores correspondentes à força cortante de ruptura das vigas ensaiadas de cada composição de concreto. As equações da norma CAN3 A23.3:2004 [17] e do Modelo II da norma ABNT NBR 6118:2014 [19] necessitam de parâmetros referentes à força cortante atuante, desta forma foram consideradas para norma canadense os valores de β e θ , iguais

a 0,12 e 40°, respectivamente obtidos pela média aritmética dos valores calculados para as vigas ensaiadas, e no modelo II da norma brasileira, que considera uma redução da parcela V_c quando a força cortante atuante aproxima-se da resistência das diagonais comprimidas de concreto, foi considerada V_c igual à 77% de V_{c0} .

Em relação às normas ACI 318:2011 [16], CAN3 A23.3:2004 [17], EN 1992-1-1:2004 [18] e o modelo I da ABNT NBR 6118:2014 [19], observa-se que todas as vigas ensaiadas apresentaram força cortante última superior às estimativas das normas. O modelo II da ABNT NBR 6118:2014 [19] apresentou uma melhor aproximação dos resultados, ocorrendo, para o concreto CC0, estimativas em torno de 8% superiores aos valores obtidos experimentalmente. Apesar disso, esta variação não representa falta de segurança do modelo, visto que esta norma determina que seja considerada para o dimensionamento a resistência do aço igual a 435 MPa, como discutido anteriormente.

Dentre as normas verifica-se uma relação direta entre a força cortante última e a resistência à compressão do concreto semelhante ao comportamento dos resultados experimentais, exceto para norma EN 1992-1-1:2004 [18], que apresenta uma estimativa de resistência constante, devido a sua formulação considerar somente a resistência da armadura, tornando-se mais conservadora em concretos mais resistentes.

4. Conclusões

Neste trabalho a resistência ao cisalhamento de vigas de concreto com armadura transversal foi avaliada comparando concretos convencionais e autoadensáveis, visando contribuir para reduzir as incertezas sobre o desempenho estrutural do concreto autoadensável. Os resultados obtidos demonstraram que a redução do volume e dimensão máxima característica do agregado graúdo para

produção do concreto autoadensável não resultou em redução significativa na resistência ao cisalhamento deste tipo de concreto. Comparando a resistência das vigas com armadura transversal aos resultados de vigas sem esta armadura, obtidos na literatura, verificou-se um aumento da parcela de resistência atribuída ao concreto e mecanismos alternativos nas vigas de concreto autoadensável em relação ao concreto convencionalmente vibrado, provavelmente devido a uma melhor aderência do concreto às barras de aço, contudo um número maior de ensaios devem ser realizados para comprovar este efeito.

As estimativas de resistência ao cisalhamento desconsiderando os coeficientes de segurança do modelo II da norma ABNT NBR 6118:2014 [19] apresentaram valores mais próximos dos resultados obtidos experimentalmente que as normas ACI 318:2011 [16], CAN3 A23.3:2004 [17], EN 1992-1-1:2004 [18] e modelo I da ABNT NBR 6118:2014 [19], sendo estas consideradas conservativas, porém todas podem ser empregadas no dimensionamento de vigas de concreto autoadensável.

5. Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Capes, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina e à Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelo auxílio no desenvolvimento deste projeto.

6. Referências bibliográficas

- [1] OKAMURA, H.; OZAWA, K.; OUCHI, M. Self consolidating concrete. *Structural Concrete*, v.1, n° 1, p. 3–17, 2000.
- [2] BARROS, A. R. Avaliação do Comportamento de Vigas de Concreto Auto-Adensável Reforçado com Fibras de Aço. 2009. 155f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2009.
- [3] HASSAN, A. A. A., HOSSAIN, K. M. A., LACHEMI, M. Behavior of full-scale self-consolidating concrete beams in shear. *Cement & Concrete Composites*, 30 (2008) 588-596.
- [4] DOMONE, P. L. A review of the hardened mechanical properties of self consolidating concrete. *Cement & concrete composites*, v.29 p. 1-12, 2007.
- [5] DESNERCK, P., DE SCHUTTER, G., TAERWE, L. Shear friction of reinforced self consolidating concrete members. ACI Special publication 261-9. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan. p. 133-141, 2009.
- [6] BOEL, V.; DE CORTE, W. Reinforced Self consolidating Concrete Beams Subjected to Static and Dynamic Loads. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF CONSOLIDATING CONCRETE, 6., 2010, Montreal. Proceedings... Montreal: 2010, Vol. II, p. 1173-1182.
- [7] SHERWOOD, E. G.; BENTZ, E. C.; COLLINS, M. P. Effect of Aggregate Size on Beam-Shear Strength of Thick Slabs. *ACI Structural Journal*, Title n° 104-S19, p. 180-190, March/April, 2009.
- [8] YANG, K. H., SIM, J. I., CHOI, B. J., LEE, E. T. Effect of Aggregate Size on Shear Behavior of Lightweight Concrete Continuous Slender Beams. *ACI Materials Journal*, V. 108, N° 5, Sep.-Oct. 2011, p. 501-509.
- [9] KIM, Y. H.; HUESTE, M. B. D.; TREJO, D.; CLINE, D. B. H. Shear Characteristics and Design for High-Strength Self-Consolidating Concrete. *Journal of Structural Engineering*, v. 136, n° 8, p. 989 – 1000, August 2010.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 67: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823: Concreto autoadensável. Rio de Janeiro, 2010.
- [12] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.
- [13] SAVARIS, G., PINTO, R. C. A. Influência do agregado graúdo na resistência ao cisalhamento de vigas de concreto autoadensável. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*. Volume 10, Número 1 (Fevereiro 2017) p.30-52.
- [14] ALMEIDA FILHO, F. M.; EL DEBS, M. K.; EL DEBS, A. L. H. C. Bond-slip behavior of self consolidating concrete and vibrated concrete using pull-out and beam tests. *Materials and Structures*, v. 41, p. 1073-1089, 2008.
- [15] HELINCKS, P., BOEL, V., DE CORTE, W., DE SCHUTTER, G., DESNERCK, P. Structural behaviour of power-type self consolidating concrete: Bond performance and shear capacity. *Engineering Structures*, V. 48, p. 121-132, 2013.
- [16] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318: Building code requirements for structural concrete and commentary. Farmington Hills, Michigan, 2011.
- [17] CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. A23.3: Design of concrete structures. Ontario, Canada, 2004.
- [18] COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. Eurocode 2: Design of concrete structures. Brussels, Belgium, 2004.
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2014.