



Allan Carvalho Cardoso

**Efeito da Adição de Agregados
Reciclados na Resistência ao
Cisalhamento de Vigas de Concreto
Armado**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

Dissertação orientada pelo Professor Maurício de Pina Ferreira

Universidade Federal do Pará
Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



Allan Carvalho Cardoso

**Efeito da Adição de Agregados Reciclados na Resistência
Cisalhamento de Vigas de Concreto Armado**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Maurício de Pina Ferreira

Belém
Julho de 2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Biblioteca do ITEC/UFPA-Belém-PA

C268

Cardoso, Allan Carvalho, 1993 -
Efeito da adição de agregados reciclados na
resistência ao cisalhamento de vigas de concreto
armado/ Allan Carvalho Cardoso. - 2018.

Orientador: Maurício de Pina Ferreira
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto
de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil, Belém, 2018.

1.Concreto armado - Reaproveitamento. 2.
Cisalhamento. 3.Construção Civil Sustentável. I.
Título.

CDD 23. ed. – 6 2 0 . 1 3 7

Elaborado por Kelren Cecília dos Santos Lima da Mota – CRB-2/1461



EFEITO DA ADIÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS NA RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO

AUTOR:

ALLAN CARVALHO CARDOSO

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL NA ÁREA DE ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO EM: 31/07/2018

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Maurício de Pina Ferreira
Orientador (UFPA)

Prof. Dr. José Márcio Fonseca Calixto
Membro Externo (UFMG)

Prof. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro
Membro Externo (UFPA)

Prof. Dr. Bernardo Nunes de Moraes Neto
Membro Interno (UFPA)

Visto:

Prof. Dr. DÊNIO RAMAM CARVALHO DE OLIVEIRA
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

Aos meus pais, João e Maria.

Agradecimentos

As linhas escritas nesta página de papel servem não apenas para demonstrar gratidão pela realização deste trabalho, e sim uma tentativa de evidenciar de alguma forma a influência que cada pessoa representou em minha vida no decorrer da execução da pesquisa. Desta forma, agradeço muito a Deus por ter cuidado de mim e ter colocado pessoas que mesmo de forma indireta colaboraram com esta pesquisa.

Quero agradecer aos meus pais, João Cardoso e Maria do Socorro por sempre fazerem o possível para eu alcançar meus objetivos. Aos meus irmãos Amanda, Alyson e Alessandra, os quais sempre foram essenciais para minha motivação, agradeço em especial ao Alyson, que sempre me ajudou nos momentos necessários.

Agradeço ao meu orientador, Maurício Pina, pela paciência e disponibilidade em me ajudar a evoluir, ao meu migo Manoel Mangabeira, pela contribuição na execução das peças e por sempre se mostrar disponível para ajudar no desenvolvimento deste trabalho. Aos meus amigos Walter Cancela, Matheus Kenji e Karoline Dantas, pela troca de conhecimentos, dificuldades compartilhadas e momentos de descontração. Muito obrigado, vocês fizeram total diferença.

À professora Luciana Cordeiro, a qual se demonstrou muito solícita a melhorar o andamento desta pesquisa. Ao laboratório de engenharia química da UFPA, por disponibilizar o espaço para realização de parte do trabalho, e aos meus companheiros de trabalho da DIESF-UFPA, Ananda, André, Pedro, Antônio e Yasmin, em especial Isaque Guerreiro, o qual contribuiu muito para o desenvolvimento deste trabalho. Obrigado pela parceria e paciência de todos.

Agradeço a Luma Guimarães por não medir esforços em colaborar com o desenvolvimento e conclusão deste trabalho, muito obrigado. Aos meus amigos Henrique Oliveira e Luan Batista, pelo esforço, por apresentarem interesse em ajudar e pelos momentos de descontração vividos.

Por fim, agradeço ao campus UFPa Belém e Tucuruí, pela disponibilização do laboratório para realização dos ensaios, e pelos colaboradores do mesmo, em especial Franci e Lúcio, pelo esforço e atenção prestados a esta pesquisa.

Resumo

CARDOSO, A. C. (2018). **Efeito da Adição de Agregados Reciclados na Resistência ao Cisalhamento de Vigas de Concreto Armado**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil, 96p.

O presente trabalho avalia a influência da incorporação de agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC) na resistência ao cisalhamento de vigas em concreto armado. Será realizada uma análise experimental composta por doze vigas: quatro executadas com concreto convencional (composto por agregados naturais) e oito em concreto com AGRC. O experimento visa avaliar a influência das armaduras transversais (ρ_w) e da variação da taxa de armadura longitudinal (ρ_l), na resistência ao cisalhamento das peças. As vigas de concreto foram divididas em dois grupos, com taxas de substituição de agregado graúdo natural (AGN) por AGRC variando entre 0, 30 e 100%. Adicionalmente foram discutidos três códigos: ACI 318(2014); EUROCODE 2 (2004); NBR 6118 (2014), que foram aplicadas a um banco de dados (BD) de vigas em concreto com AGRC. O desempenho dessas normas será avaliado através do parâmetro λ , por meio da relação entre a carga última experimental (V_{exp}) e a carga última teórica (V_{teo}), $\lambda = V_{exp}/V_{teo}$. Esse parâmetro foi analisado em função do nível de conservadorismo e relacionado com as principais variáveis desta pesquisa: ρ_l , ρ_w e AGRC.

Palavras-chave

Cisalhamento; agregados reciclados de concreto; vigas, armadura transversal, armadura longitudinal, banco de dados.

Abstract

The present work evaluates the influence of the incorporation of recycled concrete aggregate (RCA) on the shear strength of beams in reinforced concrete. An experimental analysis composed of twelve beams will be performed: four executed with conventional concrete (composed of natural aggregates) and eight with RAC. The experiment aims to evaluate the influence of the transverse reinforcement (ρ_w) and the variation of the longitudinal reinforcement ratio (ρ_l), on the shear strength of the parts. The concrete beams were divided into two groups, with RCA rates varying from 0 to 100%. In addition, three codes will be discussed: ACI 318 (2014); EUROCODE 2 (2004); NBR 6118 (2014) and MODEL CODE (2010), which will be applied to a concrete beams database (DB) with RCA. The performance of these codes will be evaluated through the parameter λ , by means of the relation between the ultimate experimental load (V_{exp}) and the theoretical ultimate load (V_{teo}), $\lambda = V_{exp} / V_{teo}$. This parameter was analyzed according to the level of conservatism and related to the main variables of this research: ρ_l , ρ_w and AGRC. The value of λ is analyzed according to the level of conservatism.

Keywords

Shear, recycled concrete aggregates, beams, transverse reinforcement, longitudinal reinforcement, data base.

Sumário

Capítulo	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. JUSTIFICATIVA	5
1.2. OBJETIVOS	6
1.2.1. Objetivo geral	6
1.2.2. Objetivos específicos	6
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	7
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
2.1. AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE CONCRETO (AGRC)	8
2.2. CONCRETO COM AGRC	10
2.2.1. Propriedades no estado fresco	11
2.2.2. Propriedades no estado endurecido	12
2.3. COMPORTAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO SUBMETIDAS AO CISALHAMENTO.	15
2.3.1. Vigas sem armadura transversal	16
2.3.2. Vigas com armadura de cisalhamento	18
2.4. RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS	20
2.4.1. ACI 318 – American Building Code For Reinforced Concrete. (2014)	21
2.4.2. EUROCODE 2 – Design of Concrete Structures. EC2 (2004)	22
2.4.3. NBR 6118 – Projeto De Estruturas De Concreto - Procedimento. (2014)	24
3. METODOLOGIA	26
3.1. PROGRAMA EXPERIMENTAL	26
3.1.1. Concreto	26
3.1.2. Sistema de ensaio	35
3.2. BANCO DE DADOS	39
4. RESULTADOS	41
4.1. ANÁLISE EXPERIMENTAL	41

4.1.1. Propriedades mecânicas do concreto	41
4.1.2. Propriedades mecânicas das armaduras	43
4.1.3. Rugosidade da superfície da fissura crítica.	44
4.1.4. Relação Carga-Deslocamento	45
4.1.5. Deformações na Armadura Longitudinal	47
4.1.6. Deformações da Armadura Transversal	48
4.1.7. Deformações do Concreto	49
4.1.8. Relação V_u x AGRC (%)	51
4.1.9. Relação V_u x V_{teo}	52
4.1.10. Relação λ x AGRC (%)	54
4.1.11. Relação λ x ρl (%)	56
4.1.12. Relação λ x ρw (%)	57
4.1.13. Modos de ruptura	58
4.2. ANÁLISE DO BANCO DE DADOS	61
4.2.1. Relação entre V_u x V_{teo}	61
4.2.2. Para vigas com armadura transversal	61
4.2.3. Para vigas sem armadura transversal	63
4.2.4. Substituição de Agregado Reciclado (ARC)	64
4.2.5. Taxa de armadura longitudinal	66
4.2.6. Taxa de armadura transversal	68
4.2.7. Análise dos códigos de projeto	69
4.2.8. ANOVA e teste de Tukey	71
5. CONCLUSÕES	75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

Lista de Tabelas

Tabela	Página
Tabela 1.1 – Total de RCD coletado pelos municípios no Brasil, ABRELPE (2016).	2
Tabela 3.1 - Características do CP V ARI RS nos limites estabelecidos por norma.	27
Tabela 3.2 - Propriedades e características físicas do agregado miúdo.	27
Tabela 3.3 – Caracterização do agregado graúdo natural.	28
Tabela 3.4 – Caracterização AGRC	29
Tabela 3.5 – Dosagens do concreto para cada percentual de ARGC.	30
Tabela 3.6 - Característica das vigas de concreto.	32
Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas do concreto.	42
Tabela 4.2 – Propriedades mecânicas das armaduras.	44
Tabela 4.3 – Relações experimentais com os códigos de projeto.	52
Tabela 4.4 – Classificação por meio da relação V_u / V_{teo} , segundo COLLINS (2011).	69
Tabela 4.5 – Penalidades segundo COLLINS, vigas com armadura transversal.	70
Tabela 4.6 - Penalidades segundo COLLINS, vigas sem armadura transversal.	70
Tabela 4.7- Resumo do gráfico <i>Box-whiskers</i> a)	74
Tabela 4.8 - Resumo do gráfico <i>Box-whiskers</i> b)	74

Lista de Figuras

Figura	Página
Figura 1.1 - Aterro de elementos de concreto e processo de demolição para descarte	2
Figura 1.2 - Ruptura por cisalhamento de peças com função estrutural	4
Figura 2.1- Seção de uma matriz de concreto com agregado reciclado (Adaptado de G.C. LEE e H.B. CHOI).	9
Figura 2.2 - Absorção de água do AGRC em função da resistência do concreto de origem, KOPERA (2017).	10
Figura 2.3 – Fissuras na superfície de vigas de concreto, GHORBEL e WARDEHQUE (2017).	11
Figura 2.4 - Resistência a compressão de acordo com a origem do agregado graúdo, segundo TABSH e ABDELATAH (2009)	13
Figura 2.5 - Módulo de elasticidade do concreto em função da taxa de substituição de AGRC (Adaptado GOMES e BRITO, 2009)	14
Figura 2.6 - Esforços internos em uma viga fissurada sem armadura transversal (adaptado MACGREGOR e WIGHT, 2012)	16
Figura 2.7- Efeito pino e engrenamento dos agregados em vigas de concreto armado fissurado	18
Figura 2.8 - Comportamento de vigas de concreto armado com armadura de cisalhamento (Adaptado de WIGHT e MACGREGOR, 2012)	18
Figura 2.9 - Relação resistência ao cisalhamento-solicitação (Adaptado de WIGHT e MACGREGOR, 2012)	19
Figura 2.10 - Efeito arco em vigas (adaptado de JEONG & KIM, 2014).	20
Figura 2.11- Relação entre a resistência ao cisalhamento e a/d de vigas de concreto sem armadura transversal (Adaptado de FISHER e HAGSTEN, 2016)	20
Figura 3.1 – Fôrmas utilizadas na produção das vigas.	31
Figura 3.2 – Detalhamento das vigas do grupo A. Cotas em cm.	33
Figura 3.3 – Detalhamento das vigas do grupo B. Cotas em cm.	34
Figura 3.4 – Sistema de ensaio utilizado. Cotas em cm.	36
Figura 3.5 - Monitoramento dos deslocamentos.	37
Figura 3.6 - Extensômetro do concreto e armadura de flexão.	38

Figura 3.7 - Monitoramento dos estribos.	39
Figura 4.1 – Resultados dos ensaios de caracterização.	42
Figura 4.2 – Superfície de ruptura dos corpos de prova.	43
Figura 4.3 – Mudança da rugosidade com o aumento do AGRC.	45
Figura 4.4 – Carga x deslocamento.	46
Figura 4.5 – Carga x deformações da armadura longitudinal.	47
Figura 4.6 - Carga x deformações da armadura transversal.	49
Figura 4.7 - Carga x deformações do concreto.	50
Figura 4.8 – Relação V_u x AGRC (%).	51
Figura 4.9 - Relação V_{uexp} - V_{uteo} .	53
Figura 4.10 – Relação λ x AGRC (%)	55
Figura 4.11 – Relação λ x ρ_1 (%)	56
Figura 4.12 - Relação λ x ρ_w (%).	57
Figura 4.13 – Modo de ruptura das vigas do grupo A.	59
Figura 4.14 – Modo de ruptura das vigas do grupo B.	60
Figura 4.15- Relação V_{uexp} - V_{uteo} .	61
Figura 4.16 - Relação V_{uexp} - V_{uteo} .	63
Figura 4.17 - V_u/V_{teo} x AGRC (%) – Com estribos.	64
Figura 4.18 - V_u/V_{teo} x AGRC (%) – Sem estribos.	65
Figura 4.19 - V_u/V_{teo} x ρ_1 (%) – Com estribos.	66
Figura 4.20 - V_u/V_{teo} x ρ_1 (%) – Sem estribos.	67
Figura 4.21- V_u/V_{teo} x ρ_w (%).	68
Figura 4.22 – Resistências das vigas com armadura transversal e diferentes concentrações de AGRC (%)	71
Figura 4.23 – Resistências das vigas sem armadura transversal e diferentes concentrações de AGRC (%)	72
Figura 4.23 – Resistências das vigas sem armadura transversal e diferentes concentrações de AGRC (%)	
Figura 4.24 – Comportamento da dispersão de V_u/V_{teo} , a) com armadura transversal; b) sem armadura transversal.	73

Lista de Símbolos

Neste item são apresentados alguns dos símbolos utilizados nesta tese, aqueles que não estão aqui apresentados têm seu significado explicado assim que mencionados no texto.

Símbolo	Significado
a	vão de cisalhamento
A_s	área de aço da armadura de flexão na parte tracionada da seção transversal
A_{sw}	área de aço da armadura de cisalhamento por camada
b_w	largura da viga
d	altura útil da viga
f_c	resistência à compressão do concreto
f_{ct}	resistência à tração do concreto
f_{ys}	tensão de escoamento do aço
f_{yw}	tensão de escoamento da armadura de cisalhamento
f_{ywd}	tensão de escoamento de cálculo da armadura de cisalhamento
h	altura da viga
k	efeito de escala
L	comprimento da viga
$LVDT$	transdutor de deslocamento linear variável
s	espaçamento entre as camadas da armadura de cisalhamento
AN	agregado natural
AR	agregado reciclado
ARC	agregado reciclado de concreto
AGRC	agregado graúdo reciclado de concreto
CAR	concreto com agregado reciclado
CAN	concreto com agregado natural
V	resistência ao cisalhamento estimada pelo Eurocode 2 (2004)
V_n	resistência ao cisalhamento estimada pelo ACI 318 (2014)
$V_{R_{csw,I}}$	resistência ao cisalhamento estimada pelo modelo I da ABNT NBR 6118 (2014)
$V_{R_{csw,II}}$	resistência ao cisalhamento estimada pelo modelo II da ABNT NBR 6118 (2014)
$V_{,flex}$	resistência à flexão de vigas de concreto estimada pela NBR 6118 (2018)

VR_c	resistência ao cisalhamento de elementos de concreto armado sem armadura transversal
VR_{cI}	resistência ao cisalhamento de elementos de concreto armado sem armadura transversal estimada pelo modelo I da ABNT NBR 6118 (2014)
VR_{cII}	resistência ao cisalhamento de elementos de concreto armado sem armadura transversal estimada pelo modelo II da ABNT NBR 6118 (2014)
$VR_{sw,I}$	resistência ao cisalhamento de elementos de concreto armado com armadura transversal estimada pelo modelo I da ABNT NBR 6118 (2014)
$VR_{sw,II}$	resistência ao cisalhamento de elementos de concreto armado com armadura transversal estimada pelo modelo II da ABNT NBR 6118 (2014)
VR_{csI}	resistência ao cisalhamento de elementos de concreto armado com armadura transversal estimada pelo modelo I da ABNT NBR 6118 (2014)
VR_{csII}	resistência ao cisalhamento de elementos de concreto armado com armadura transversal estimada pelo modelo II da ABNT NBR 6118 (2014)
$VR_{máxI}$	resistência ao cisalhamento máxima de elementos de concreto armado estimada pelo modelo I da ABNT NBR 6118 (2014)
$VR_{máxII}$	resistência ao cisalhamento máxima de elementos de concreto armado estimada pelo modelo II da ABNT NBR 6118 (2014)
VR_s	contribuição das armaduras transversais na resistência ao cisalhamento de elementos de concreto armado
VR_{sI}	contribuição das armaduras transversais na resistência ao cisalhamento de elementos de concreto armado estimada pelo modelo I da ABNT NBR 6118 (2014)
VR_{sII}	contribuição das armaduras transversais na resistência ao cisalhamento de elementos de concreto armado estimada pelo modelo II da ABNT NBR 6118 (2014)
Vu	resistência última ao cisalhamento
α	ângulo de inclinação da armadura de cisalhamento
ε_c	deformação do concreto
θ	ângulo de inclinação da biela
ρ_l	taxa de armadura longitudinal
ρ_w	taxa de armadura transversal

1. INTRODUÇÃO

O avanço dos grandes centros urbanos traz consigo a utilização de matéria-prima em larga escala. A taxa atual de consumo de recursos, geração de resíduos e as emissões de gases gerados pelo efeito estufa são insustentáveis. A produção mundial de agregados totaliza cerca de 16,5 bilhões de toneladas por ano. Este incrível volume, avaliado em mais de US\$ 70 bilhões, faz a produção de agregados uma das indústrias de mineração mais importantes do mundo, (LANGER *et al.*, 2004).

Segundo PINTO (2009), o Brasil apresenta uma produção média anual de resíduo de construção e demolição (RCD) de 500 kg/habitante. Considerando que pelo IBGE o país possuía em 23 de janeiro de 2017, 206.998.736 de habitantes e que a massa unitária do RCD é de 1200 kg/m³, estima-se que a produção anual de RCD seja de 86.249.473,3 m³. A mesma estimativa foi executada pela ABRECON no relatório de pesquisa setorial 2014/2015, no qual estimaram 84.180.696 m³. Essa comparação mostra um aumento considerável na produção do resíduo nos últimos anos.

Avaliando o panorama atual, é possível observar que as indústrias da construção civil mostram grande produção de resíduos de concreto, o que enriquece o interesse na reutilização deste material em novos elementos. A Figura 1.1 mostra o aterro do laboratório de construção civil da universidade de Brasília e o processo de demolição das peças para posterior descarte. Vale ressaltar que a reciclagem deste resíduo ainda é pouco utilizada na produção de novos elementos de concreto. Contudo, a parcela reciclada deste material é comumente direcionada a aplicações sem funções estruturais, como pavimentos asfálticos, painéis para pisos e blocos de concreto.



Figura 1.1 - Aterro de elementos de concreto e processo de demolição para descarte

ABRELPE (2016) mostra que os municípios coletaram cerca de 45,1 milhões de toneladas de RCD. Os valores apresentados exigem atenção especial, uma vez que os municípios, via de regra, coletam apenas os resíduos lançados ou abandonados nos logradouros públicos. A tabela 1.1 apresenta a quantidade total de RCD coletado pelos municípios no Brasil.

Tabela 1.1 – Total de RCD coletado pelos municípios no Brasil, ABRELPE (2016).

Região	2015	2016	
	RCD coletado (t/dia)/ Índice(kg/hab/dia)	RCD Coletado (t/dia)	Índice (kg/hab/dia)
Brasil	123.721/0,605	123.619	0,600

Tabela 1.2

Segundo LANGER *et al.* (2004), asfalto e concreto produzem mais de 200 milhões de toneladas por ano de agregado reciclado. Com a reciclagem destes resíduos no local de demolição são reduzidos os custos de transporte e o desgaste de estradas e equipamentos. Por exemplo, uma cidade de 100.000 habitantes pode pagar um adicional de US \$ 1,3 milhão por ano para cada 16 quilômetros com transportes de agregados.

Neste sentido, o interesse em transformar esses resíduos em uma fonte de matéria prima tem aumentado devida sua produção em larga escala. Tal medida tem potencial de reduzir a quantidade de resíduos em aterros sanitários, preservar os recursos naturais e fornecer economias de energia e custos. Desta forma, diminui-se o impacto ambiental e torna a produção de agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC) uma aplicabilidade com importância fundamental para a construção sustentável.

MCGINNIS *et al.* (2017) avaliou os aspectos de sustentabilidade do agregado de concreto reciclado e mostra que o material possui aproximadamente metade do impacto ambiental do agregado natural (AN). Além disso, diversas pesquisas (OLONGO e PADAYACHEE N (2002), OMARY *et al.* (2016), TABSH e ABDELFAH, 2009) apresentam diferentes tipos de análises das propriedades físicas e mecânicas deste material.

BUTLER *et al.* (2011) observaram que ao substituir o agregado natural por AGRC, pode ter um impacto significativo na ligação do concreto com as armaduras de aço, segundo DARWIN *et al.* (2001) e J. ZUO e DARWIN (2000) isso pode ser devido à influência do agregado graúdo sobre a energia de fratura do concreto, que tem sido relacionado à resistência da ligação entre o concreto e a armadura de aço.

No que se refere à resistência ao cisalhamento, além das componentes de transferências de esforços transmitidos pelo concreto, existem outros parâmetros, como o efeito pino (*dowel effect*), obtido através das armaduras de flexão, e engrenamento dos agregados (*aggregate interlock*), transmitido através da rugosidade da fissura crítica. Tais parâmetros são essenciais na previsão deste tipo de esforço em vigas, tornando assim indispensáveis as análises dos efeitos que a adição de AGRC podem acarretar nesses elementos.

Além disso, a análise dos esforços de cisalhamento é muito importante no dimensionamento de elementos estruturais, convencionais, pré-moldados ou mistos. A Figura 1.2 - Ruptura por cisalhamento de peças com função estrutural mostra a ocorrência do colapso por cisalhamento de diferentes estruturas, ratificando a real necessidade do conhecimento deste tipo de solicitação, visando o dimensionamento de peças seguras.



a) Ruptura por cisalhamento de pilar no extremo norte da ponte Juan Pablo II, Chile, 2010. Fonte: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/11030/004.cfm>



b) Ruptura por cisalhamento de Pilar de concreto armado, Maekawa e An, (2000).



c) Ruptura por cisalhamento de viga pré-moldada de um viaduto, Chile, 2010. Fonte : <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/11030/004.cfm>

Figura 1.2 - Ruptura por cisalhamento de peças com função estrutural

A maioria das propriedades mecânicas do concreto pode ser qualitativamente relacionada à sua resistência à compressão. Propriedades mecânicas e estruturais, tais como, resistência ao cisalhamento, módulo de elasticidade, módulo de ruptura e capacidade aderente são tipicamente calculados com base na resistência à compressão. o rendimento similar de algumas propriedades mecânicas do concreto com agregado reciclado comparadas com o concreto convencional tem fortalecido ainda mais a possibilidade de utilização deste material em estruturas de concreto armado.

Verificações experimentais feitas por BEHERA *et al.* (2014) e XIAO *et al.* (2012) mostraram que a redução na resistência mecânica não é muito acentuada quando a substituição AGRC é de até 30%. MARTHONG *et al.* (2017) relata que a substituição de até 30% de AN por AGRC pode ser considerada satisfatória em termos de resistência a compressão, resistência à tração e resistência à flexão.

Desta forma, o uso de AGRC em peças de concreto com função estrutural possui grande potencial como forma de construção sustentável, já que a matéria prima necessária para a produção do mesmo é o RCD. Diminuindo os impactos ao meio ambiente e consumo de energia pela indústria de mineração.

1.1. JUSTIFICATIVA

A disponibilidade decrescente de espaço em aterros sanitários, custos de deposição do RCD, e as preocupações ambientais têm contribuído para estimular a reciclagem de agregados. Além disso, as economias consideráveis em recursos naturais e energia alimentam ainda mais o interesse no tema. A investigação das propriedades de concretos com agregados reciclados vem tomando espaço há algumas décadas. Tais estudos são necessários para analisar o real impacto do AGRC nas principais variáveis de determinação da resistência ao cisalhamento de elementos de concreto.

De acordo com RAHAL e ALREFAEI (2017), a resistência ao cisalhamento não sofre nenhum efeito prejudicial para taxas de substituições de até 16% de AGRC. Os modos de ruína ao cisalhamento das vigas sem armadura de cisalhamento não diferem de vigas com AN. Em geral, o comportamento e a resistência ao cisalhamento das vigas com a mesma quantidade de armadura transversal são muito similares, para taxas de substituição de 0, 50 e 100% de AGRC, (IGNJATOVIC *et al.* 2017).

Por esse motivo, é imprescindível a avaliação de diferentes teores de substituição de AGRC, tal medida visa analisar as modificações das propriedades mecânicas do concreto, e por consequência, as influências que as mesmas geram no desempenho de vigas de concreto armado submetidas ao cisalhamento.

Inúmeros trabalhos na literatura têm buscado avaliar o desempenho do concreto com agregado reciclado em estruturas. Contudo, ainda existe uma carência de informação quanto ao impacto gerado pelo uso de AGRC nas parcelas de resistência ao cisalhamento. Neste sentido, estudos adicionais que levam em consideração estas questões precisam ser realizados. Um dos pontos críticos para o dimensionamento de vigas com AGRC é a existência de diferentes considerações dos componentes de transferência de esforço ao cisalhamento nos códigos existentes.

Além disso, devido à ausência de um consenso científico consolidado para a utilização deste material para fins estruturais, as recomendações de utilização do mesmo são muito variadas. Por esse motivo, a correlação de resultados experimentais e teóricos se faz necessária para verificação do desempenho de códigos na previsão da resistência ao cisalhamento de vigas de concreto com agregado reciclado.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo geral

Avaliar experimentalmente o efeito da adição de agregados reciclados de concreto na resistência ao cisalhamento de vigas de concreto armado.

1.2.2. Objetivos específicos

- ✓ Investigar a influência da incorporação do AGRC nas propriedades mecânicas do concreto simples. Foi avaliado o efeito da substituição de AGRC na resistência à compressão, resistência à tração e no módulo de elasticidade do concreto simples;
- ✓ Avaliar o comportamento e a resistência de vigas de concreto armado sob cisalhamento para diferentes taxas de substituição de AGRC. Os ensaios avaliaram a resistência de vigas com 0%, 30% e 100% de substituição de agregado natural por agregado reciclado de concreto;
- ✓ Determinar se a influência da substituição de AGRC na resistência ao cisalhamento de vigas de concreto armado varia como uma função da taxa de armadura de flexão e do uso ou não de armaduras de cisalhamento. Para a taxa de armadura de flexão, foram avaliadas experimentalmente as resistências de vigas com taxa de 1,09% e

2,13%. Em relação ao uso de armaduras de cisalhamento, foram ensaiadas vigas sem armadura de cisalhamento e com armadura composta por estribos fechados com taxa de 0,103%;

- ✓ Comparar os resultados experimentais obtidos com as estimativas teóricas feitas seguindo as recomendações da ABNT NBR 6118 (2014), ACI 318 (2014), EC2 (2004). O desempenho desses códigos é avaliado com base em um banco de dados (BD) coletado na literatura.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação está dividida em 5 *Capítulos* mais as *Referências Bibliográficas*

O *Capítulo 2* é composto por uma revisão de trabalhos experimentais que avaliam a influência da adição de AR nas propriedades mecânicas do concreto, além disso, são apresentados estudos que discutem o desempenho à flexão e ao corte de vigas de AGRC. No mesmo capítulo, são discutidas as recomendações da NBR 6118 (2003), ACI 318 (2008), EC2 (2004), e relativamente à prescrição da resistência última ao cisalhamento de vigas de concreto armado.

No *Capítulo 3* apresenta o programa experimental do estudo, o qual exhibe as características geométricas das vigas, das armaduras utilizadas, da instrumentação seguida, do sistema de ensaio empregado, as características físicas e propriedades mecânicas dos materiais que compuseram as vigas.

No *Capítulo 4* são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios de resistência ao cisalhamento das 12 vigas abordadas no programa experimental. Foram analisados: deslocamento vertical, a deformação das armaduras longitudinais e transversais, modo de ruptura e a carga última. Além disso, são apresentados os resultados teóricos, essa análise foi realizada com auxílio de um banco de dados formado por vigas de CAR, que romperam por cisalhamento, encontradas na literatura.

O *capítulo 5* exhibe as conclusões obtidas pelos resultados da dissertação. Posteriormente, são apresentadas as *Referências Bibliográficas*.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE CONCRETO (AGRC)

BUCK (1977) alega que o início do uso do AGRC é marcado pelo fim da Segunda Guerra Mundial, quando houve demolição excessiva de edifícios e estradas e como consequência uma alta necessidade de se descartar os resíduos e reconstruir a Europa. Segundo BEHERA *et al.* (2014), é considerado agregado reciclado de concreto (ARC), o material tipicamente processado pelo esmagamento de concreto já existente ou antigo.

Tal processo de produção do material acarreta no desenvolvimento de fissuras no agregado final, tornando os agregados mais fracos e mais suscetíveis à permeabilidade, difusão e absorção de fluidos, (OLONGO e PADAYACHEE N, 2002). Quanto à forma e estrutura das partículas destes agregados, BEHERA *et al.* (2014) descreve-as sendo de superfície rugosa, de formas irregulares, devido a presença da antiga argamassa aderida.

OLONGO e PADAYACHEE N (2002) relatam ainda sobre a presença de uma antiga zona de transição interfacial (ZTI), devido à argamassa ou pasta de cimento antiga aderida na superfície dos AGRC. Esta zona de transição é de natureza fraca, em razão das fissuras desenvolvidas dentro do agregado no processo de esmagamento, por conta da presença de pequenos poros na argamassa.

Essas ZTIs funcionam como ponte de transferência de tensão entre a matriz da argamassa e as partículas de agregado graúdo. Mesmo quando esses componentes são de alta rigidez, a rigidez do concreto pode ser afetada devido a rupturas nessas pontes, isto é, vazios e microfissuras na zona de transição interfacial que não permitem transferência de tensão. A figura 2.1 apresenta o posicionamento das ZTIs dos AGRC.

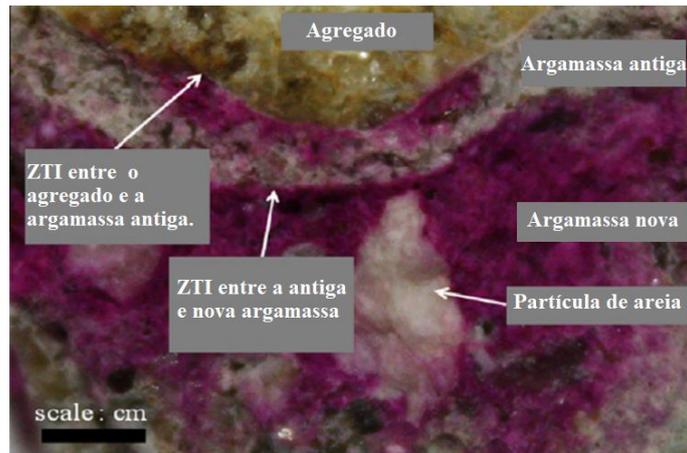


Figura 2.1- Seção de uma matriz de concreto com agregado reciclado (Adaptado de G.C. LEE e H.B. CHOI).

Com relação às propriedades físicas e mecânicas deste agregado, OMARY *et al.* (2016) aponta que a absorção de água e a porosidade do AGRC são maiores do que as de AN, por outro lado, o AGRC possui baixa densidade. Além disso, aponta que a resistência à fragmentação do AGRC é significativamente menor que a do AN, ressalta ainda que a absorção de água tem relação linear com a sua porosidade, densidade das partículas e resistência a abrasão.

O autor também expõe que a resistência à abrasão é uma propriedade importante dos agregados, a qual é frequentemente usada como uma medida geral da qualidade do agregado para resistir ao desgaste e/ou quebra através de fricção, impacto sob carga ou durante o manuseio, armazenamento e mistura. O AGRC tem em média menor resistência à abrasão e ao impacto em relação ao AN, no entanto, os AGRC geralmente estão dentro do limite aceitável de 50% para aplicações estruturais, (TABSH e ABDELFAH, 2009).

A classe de resistência do concreto de origem, a partir da qual o agregado secundário é obtido, tem grande influência tanto nas propriedades mecânicas do agregado, como do concreto produzido com ele. A figura 2.2 apresenta a relação entre absorção de água do AGRC e resistência a compressão do concreto de origem, os resultados demonstram menor absorção de água para agregados obtidos de concretos com maiores resistências à compressão, (KOPERA *et al.* 2017).

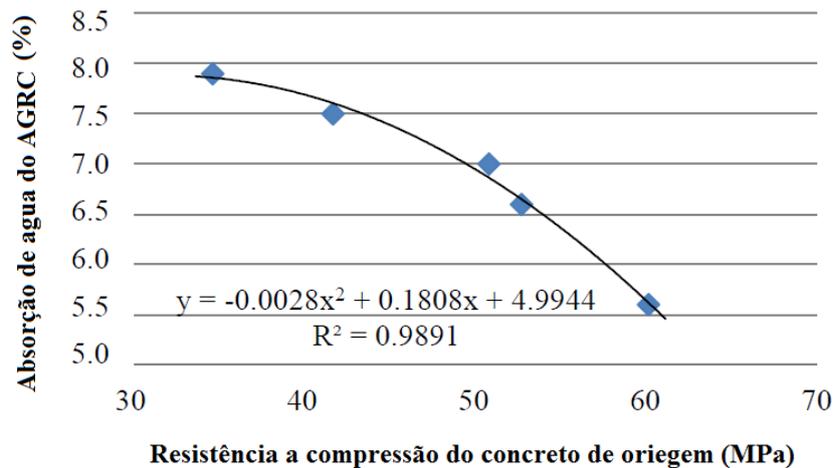


Figura 2.2 - Absorção de água do AGRC em função da resistência do concreto de origem, KOPERA (2017).

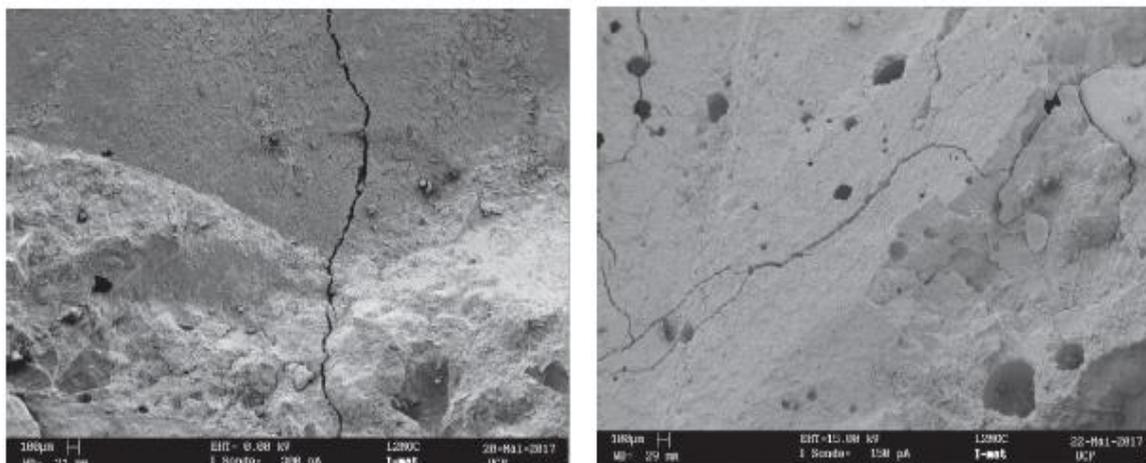
A maior absorção de água e porosidade acarreta na diminuição da resistência e densidade dos agregados. De acordo com AKBARNEZHAD (2013), a presença de uma maior proporção da argamassa intrinsecamente menos densa, em face ao AN, resulta em uma diminuição da densidade aparente e aumento da absorção de água do AGRC.

KUBISSA *et al.* (2015) concluíram que o agregado de concreto reciclado como substituição de no máximo de 50% de agregado natural pode ser utilizado sem nenhum meio tecnológico adicional ou mudanças na composição da mistura de concreto. Além disso, a melhoria da graduação dos agregados com o uso de AGRC permite obter maior resistência à compressão.

2.2. CONCRETO COM AGRC

Concretos com agregados reciclados são mais frágeis que os concretos convencionais, a energia de fratura e a resistência à propagação de fissuras diminuem quando o teor de substituição de agregados reciclados aumenta. Esta diminuição está relacionada ao aumento da porosidade do concreto, (GHORBEL e WARDEHQUE, 2017).

No que concerne tal comportamento, GHORBEL e WARDEHQUE (2017) mostram que a rede de fissuras é mais densa para o CAR comparadas ao CAN, conforme a figura 2.3 Para ambos os materiais, a adesão entre a nova argamassa e os agregados é boa e nenhuma fissura interfacial foi observada.



a) Vigas com agregados naturais

b) Vigas com 100% de AGRC

Figura 2.3 – Fissuras na superfície de vigas de concreto, GHORBEL e WARDEHQUE (2017).

Além do disposto, BUTLER *et al.* (2011) relatam que quanto menor a resistência ao esmagamento do AR, a capacidade aderente em armaduras de aço do concreto produzido com estes diminui, essa relação pode estar ligada à influência da resistência ao esmagamento do agregado graúdo na energia de fratura do concreto. Mostram ainda que em vigas de AN a aderência do concreto às armaduras foi de até 21,3% maior que em vigas de concreto com AR. Isso indica que a substituição de AN por AR pode ter impacto significativo na aderência entre o CAR e as armaduras de aço.

Neste contexto, muitas diretrizes ou especificações no exterior limitam o percentual de substituição do agregado natural por agregado reciclado. Todavia, o concreto de agregado reciclado pode ser fabricado com 100% de substituição de agregado graúdo, quando o processamento do agregado reciclado e a fabricação do concreto são totalmente controlados. No entanto, à medida que as resistências almejadas aumentam, o agregado reciclado pode limitar tal resistência, exigindo uma redução no teor de substituição.

2.2.1. Propriedades no estado fresco

MALEŠEV *et al.* (2010) observaram em seu estudo que aproximadamente a mesma trabalhabilidade foi alcançada para os concretos com 0, 50 e 100% de substituição de AGRC,

usando água adicional para os dois últimos. A mistura de concreto com 50% de substituição requer cerca de 10% a mais da quantidade total de água em comparação com a mistura de AN, e o valor correspondente para a mistura de concreto com 100% de AGCR é cerca de 20%.

Os autores também relatam que a densidade do concreto em massa depende do tipo e da quantidade de agregados. A maior densidade aparente foi observada no concreto com agregado natural, e o menor valor de densidade foi atribuído ao concreto com 100% de agregado reciclado. A diminuição da densidade aparente é cerca de 3%.

TABOADA *et al.* (2017) descrevem que a produção de concreto reciclado (20%, 50% e 100% de AGRC) adicionando água extra para compensar a alta absorção do agregado reciclado não envolve mudanças significativas no comportamento do estado fresco (comparando com 0%) até 45 minutos. Quanto a análise de resultados obtidos para uma idade de mistura de 90 minutos, até 20% de substituição, o comportamento no estado fresco é mantido. Em relação a substituição total, nessa mesma idade, a perda de trabalhabilidade é mais significativa.

De acordo com KOU e POON (2009), no caso do concreto com agregado reciclado, a diminuição da trabalhabilidade é maior do que o concreto de agregado natural. Segundo BARBUDO *et al.* (2013), o efeito de queda na trabalhabilidade pode ser facilmente superado usando misturas de redução de água. PELLEGRINO e FALESCHINI (2016) confirmaram experimentalmente que a perda de trabalhabilidade está diretamente relacionada à alta absorção de água, porosidade e textura áspera dos ARC.

2.2.2. Propriedades no estado endurecido

De forma ampla, diversas pesquisas apontam que a substituição de 100% de AN por AGRC reduz a resistência à compressão em até 30%. BAIRAGI *et al.* (1993) e YANAGIBASHI *et al.* (2005) relataram que a resistência à compressão do concreto com substituição total de AGRC variou entre 60% e 76% quando comparados a concreto convencional.

Segundo MCGINNIS *et al.* (2017), a resistência a compressão das misturas feitas com AGRC diminui em média 16,6% com 50% de substituição e 26,4% com 100% de

substituição. A resistência a compressão do CAR foi cerca de 87% do CAN com proporções de misturas semelhantes, (WANG *et al.*, 2013).

Tal perda de resistência também é observada por TABSH e ABDELFATAH (2009), onde esse desempenho é mais significativo em concretos produzidos com AR de fonte desconhecida. O uso de agregados produzidos através do concreto com resistência igual a 50 MPa resultará em resistências de compressão comparáveis com as alcançadas com o AN. O resultado da pesquisa pode ser verificado na figura 2.4.

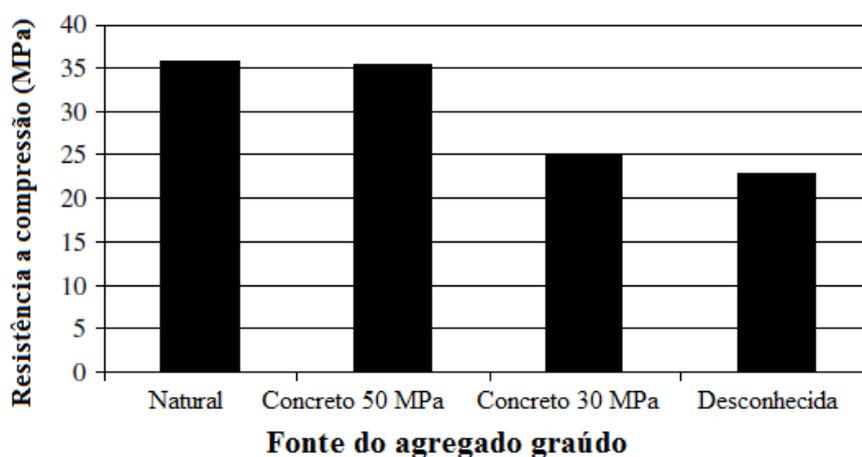


Figura 2.4 - Resistência a compressão de acordo com a origem do agregado graúdo, segundo TABSH e ABDELFATAH (2009)

De maneira análoga, a resistência à tração do concreto com AGRC é influenciada pela quantidade, tamanho, tipo e qualidade de AR. A mesma diminui com o aumento do conteúdo de AR, no entanto, é possível controlar esse efeito selecionando cuidadosamente o AR ao produzir o concreto, (SILVA *et al.* 2015). Contudo, BUTLER *et al.* (2013) e ETXEBERRIA *et al.* (2007) relatam que o concreto com AGRC mostrou desempenho melhor que o concreto convencional em relação à resistência à tração.

Esse desempenho é proporcionado devido à capacidade de absorção de água e da argamassa aderida ao agregado, a qual desenvolve uma ligação adequada entre o agregado e a matriz, ETXEBERRIA *et al.* (2007). Além disso, MATIAS *et al.* (2013) concluíram que o concreto com AR, derivado do concreto de alta resistência, mostra um desempenho a tração melhor em relação ao com AR derivado do concreto de resistência convencional.

Em relação ao módulo de elasticidade, IGNJATOVIC *et al.* (2017) observou que concretos com 50% e 100% de AGRC apresentaram até 13% de diminuição do mesmo. Segundo RAHAL e ALREFAEI (2017) taxas de substituição menores que 20% do uso de AGRC tem efeito similar no módulo de elasticidade e resistência a compressão do concreto. GOMES e BRITO (2009) relatam que concretos com 100% de AGRC podem apresentar redução de 20 a 40% nos resultados de módulo de elasticidade, como pode ser visto na figura 2.5.

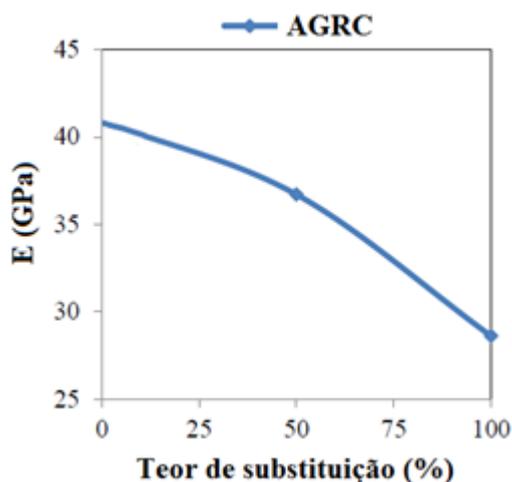


Figura 2.5 - Módulo de elasticidade do concreto em função da taxa de substituição de AGRC (Adaptado GOMES e BRITO, 2009)

De acordo com RAHAL (2007), corpos de prova cilíndricos de concreto com resistência entre 25 e 30 MPa, exibem resultados de módulo de elasticidade de concreto com AGRC apenas 3% menor que o do concreto com AN. Os valores baixos do módulo de elasticidade de CAR podem ser atribuídos às características de resistência do AR e a sua qualidade inferior ao agregado natural. Descreve também que com o uso de 100% de AR, observou-se redução de aproximadamente 35% no módulo de elasticidade, (LIMBACHIYA *et al.*, 2012).

De maneira análoga, CORINALDESI (2010) relatou que a diminuição em 15% no módulo de elasticidade poderia ser alcançada usando apenas 30% AR. A incorporação de AR em concreto reduz a rigidez e aumenta a fragilidade, como resultado, o módulo de elasticidade diminui.

De maneira geral, as propriedades mecânicas citadas acima apresentam influência direta no desempenho do concreto com fins estruturais. De acordo com RAHAL e ALREFAEI (2017),

a resistência ao cisalhamento não sofreu nenhum efeito prejudicial para taxas de substituições de 5% a 16% do teor de AGRC. As substituições de 23% e 35% causaram uma redução de 10% e 21% na resistência ao cisalhamento, respectivamente.

IGNJATOVIC *et al.* (2017) relatam que as primeiras fissuras de cisalhamento em vigas de concreto com AN e AGRC sem reforço de cisalhamento foram formadas em níveis de carga semelhantes. Os modos de ruína ao cisalhamento das vigas com AGRC sem armadura de cisalhamento não diferiram do modo de ruína das vigas de concreto com AN. Todavia, em comparação com as vigas de concreto convencional sem armadura de cisalhamento, uma leve mudança no ângulo e formato das fissuras de cisalhamento foi observada em vigas com 50 e 100% de substituição.

IGNJATOVIC *et al.* (2017) descreve que embora a resistência ao cisalhamento dessas vigas tenha sido praticamente igual, um espécime com 50% de substituição apresentou resistência ao cisalhamento quase 15% menor do que outro de concreto convencional. Em geral, o comportamento e a resistência ao cisalhamento das vigas com a mesma quantidade de armadura transversal foram muito similares, independentemente da quantidade de AGRC.

HASAN KATKHUDA e NASIM SHATARAT (2016) relatam que os usos de AGRC de fontes desconhecidas diminuem a capacidade de cisalhamento em vigas. As resistências ao cisalhamento de vigas de AGRC tratados são consideradas mais conservadoras comparadas com vigas de AN e de AGRC não tratados. AJDUKIEWICZ e KLISZCZEWICZ (2007) confirmaram a possibilidade total de uso de agregados reciclados de boa qualidade em elementos estruturais feitos de concreto de média ou alta resistência.

2.3. COMPORTAMENTO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO SUBMETIDAS AO CISALHAMENTO.

A maneira que a ruptura por cisalhamento ocorre depende de diversos fatores, como por exemplo, as dimensões da peça, o carregamento aplicado, a geometria e as propriedades mecânicas dos materiais. A seguir são mostradas as principais considerações sobre a análise das transferências de esforços que ocorrem em vigas submetidas ao cisalhamento.

2.3.1. Vigas sem armadura transversal

A figura 2.6 apresenta os mecanismos de transferências de esforços através da fissura crítica de cisalhamento em vigas de concreto sem armadura transversal. A região da fissura crítica é dividida em ABCDEF, onde a parcela A-B-C representa o perímetro da fissura crítica. As componentes de transferência de esforços nessa região são: o cisalhamento transferido na zona de compressão (V_{cy}), o engrenamento dos agregados (V_{ay}) e a ação do efeito pino (V_d), (MACGREGOR e WIGHT, 2012).

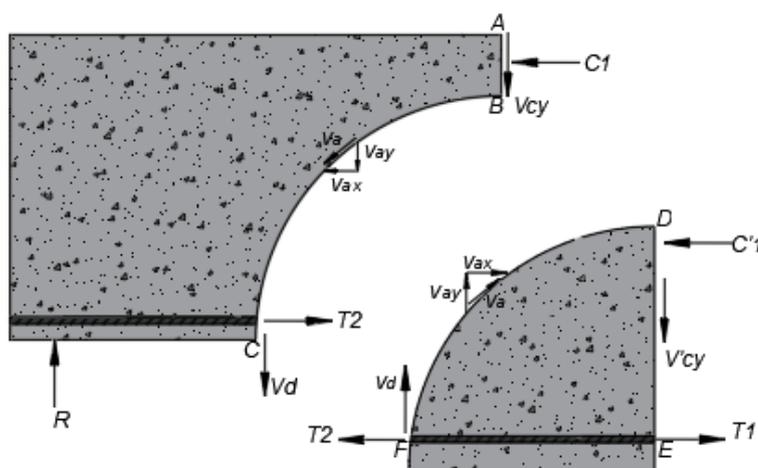


Figura 2.6 - Esforços internos em uma viga fissurada sem armadura transversal
(adaptado MACGREGOR e WIGHT, 2012)

Considerando a parcela D-E-F, a viga abaixo mostra que V_d e V_a causam momento em relação ao ponto E, o mesmo deve ser equilibrado por uma força de compressão C'_1 . Em relação ao equilíbrio das forças horizontais, na seção A-B-D-E mostra-se que $T_1 = C_1 + C'_1$, além disso, mostra também que o momento externo nessa seção deve ser equilibrado por T_1 e $C_1 + C'_1$.

Ao passo que a fissura se desenvolve, o engrenamento diminui, aumentando a parcela do cisalhamento resistida pelos esforços V_{cy} e V_d . À medida que os esforços V_a , V_d , V_{cy} e C'_1 perdem a capacidade de transferência de esforços, o cisalhamento e a compressão são transferidos pela parcela A-B localizada na seção acima da fissura. Como resultado, esta região sofre esmagamento ou deslizamento de maneira brusca, pois a seção A-B possui uma pequena altura útil para resistir às forças de compressão necessárias para garantir o equilíbrio.

Segundo MACGREGOR e WIGHT (2012), para vigas sem armadura transversal, uns dos principais mecanismos que contribuem para a resistência ao cisalhamento são: a biela (resistência a cisalhamento da zona de compressão do concreto não fissurado), o diâmetro máximo do agregado, responsável pela rugosidade da superfície da fissura e o efeito pino, obtido através da armadura longitudinal que atravessa a fissura crítica. A contribuição para a resistência total ao cisalhamento de cada um desses componentes foi estimada aproximadamente, obtendo-se os valores: 20-40%, 25-50% e 15-25%, respectivamente, (KIM J e PARK Y, 1996).

Com respeito a pequenas taxas de armadura longitudinal (ρ_w), as fissuras de flexão se desenvolvem mais, no que se refere à abertura e comprimento, fenômeno diferente do qual acontece quando se trabalha com grandes valores de (ρ_w). Esse aumento na abertura das fissuras causa a diminuição nos valores máximos dos componentes de cisalhamento V_d e V_{ay} , estes são transferidos ao longo da fissura crítica por meio do efeito pino e por tensões de cisalhamento nas superfícies da fissura, respectivamente.

Conforme o diâmetro do agregado graúdo aumenta, a rugosidade das superfícies da fissura aumenta, permitindo que uma maior quantidade de tensões de cisalhamento seja transferida pelas fissuras, como pode ser verificado na figura 2.7. Em vigas de concreto de alta resistência e algumas vigas de concreto leve, as fissuras penetram em partes do agregado ao contrário de circundá-las, resultando em uma superfície de fissura mais suave. Esta diminuição nas transferências de tensões pelo engrenamento dos agregados ao longo das rachaduras reduz o V_c .

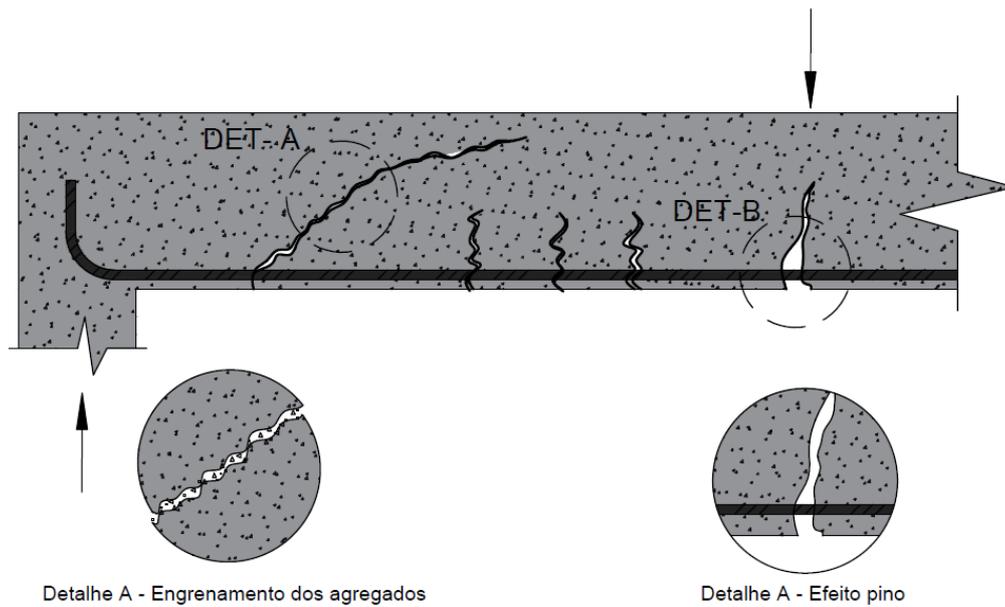


Figura 2.7- Efeito pino e engrenamento dos agregados em vigas de concreto armado fissurado

2.3.2. Vigas com armadura de cisalhamento

De modo análogo às vigas sem armadura transversal, as forças internas atuantes em uma viga fissurada com estribos são mostradas abaixo, ver figura 2.8.

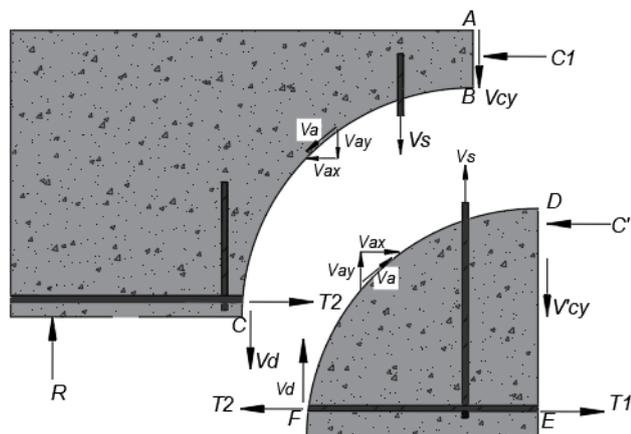


Figura 2.8 - Comportamento de vigas de concreto armado com armadura de cisalhamento (Adaptado de WIGHT e MACGREGOR, 2012)

A biela, concreto não fissurado, é a parcela que resiste a todo o cisalhamento antes da fissuração ocorrer. Ao passo que as fissuras de flexão e de cisalhamento se desenvolvem, o esforço cortante é resistido pelas componentes V_{cy} , V_{ay} e V_d .

No decorrer da aplicação de maiores solicitações, os estribos que cruzam a fissura inclinada escoam, fazendo com que V_s se mantenha constante até a ruína. Após o início do escoamento, a abertura da fissura inclinada se desenvolve mais rápido, diminuindo consideravelmente o V_{ay} . Dessa forma, surge uma contribuição maior dos esforços V_d e V_{cy} até que ocorra a ruptura, a qual ocorre o esmagamento da zona de compressão devido os esforços de cisalhamento e compressão combinados, ou esmagamento da biela inclinada. O resultado da pesquisa de WIGHT e MACGREGOR (2012) pode ser verificado na figura 2.9.

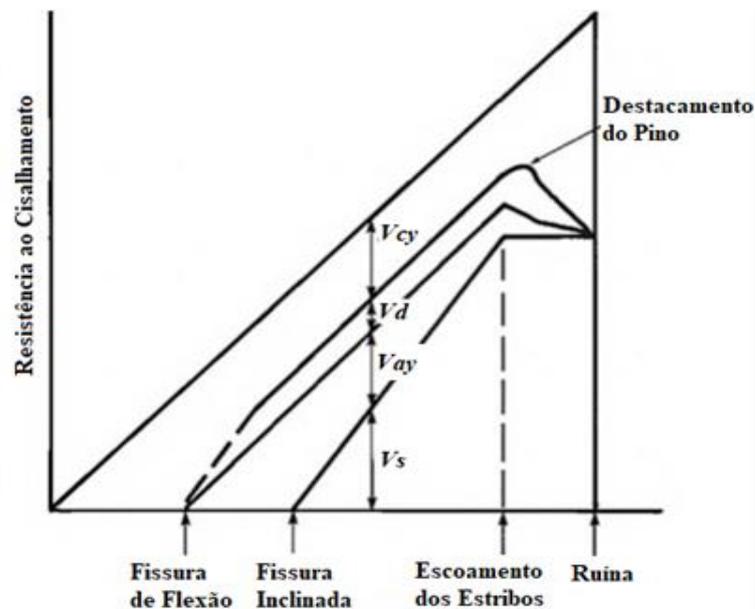


Figura 2.9 - Relação resistência ao cisalhamento-solicitação (Adaptado de WIGHT e MACGREGOR, 2012)

Vale ressaltar que vãos de cisalhamento mais curtos suportam mais cargas, por ação do efeito arco. Este efeito acontece quando uma parcela da solicitação (C_1), ver figura 2.10, é transferida quase que diretamente aos apoios, dissipando os esforços em forma de arco, esse mecanismo é responsável por absorver parte do esforço cortante, ver a figura 2.11. Como resultado, a relação entre o vão de cisalhamento e a altura útil de uma viga (a/d) afeta as fissuras inclinadas de cisalhamento e a resistência última de membros quando a razão (a/d) for menor que 2,5, como mostra a figura 2.11. Para vãos de cisalhamento mais longos,

essa razão possui pouco efeito sobre a resistência ao cisalhamento de vigas sem armadura transversal e pode ser negligenciada.

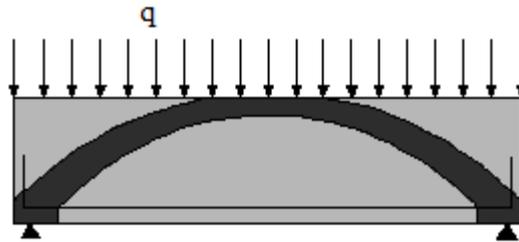


Figura 2.10 - Efeito arco em vigas (adaptado de JEONG & KIM, 2014).

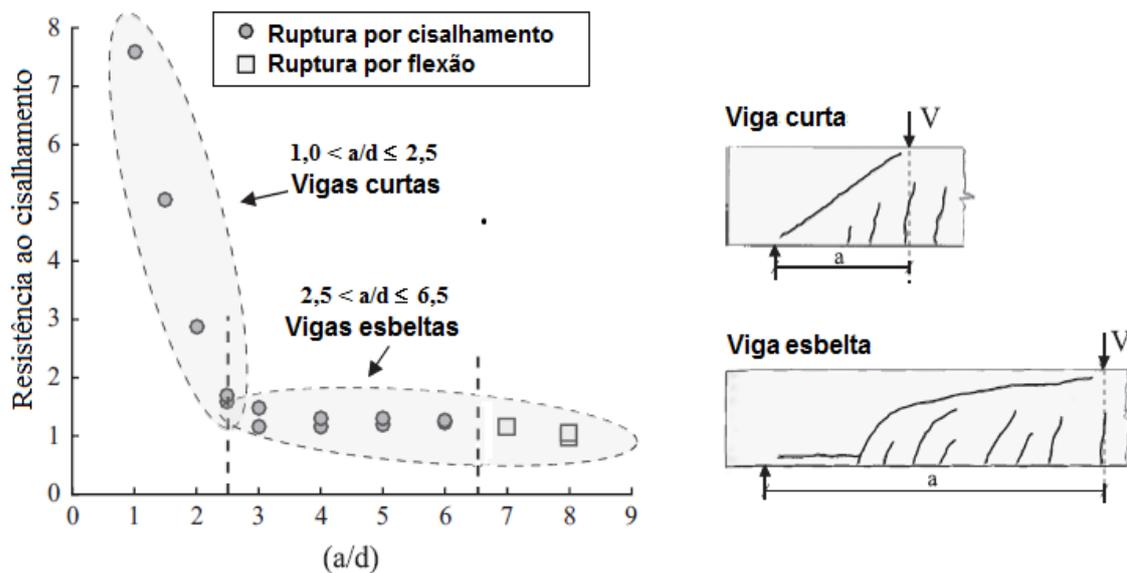


Figura 2.11- Relação entre a resistência ao cisalhamento e a/d de vigas de concreto sem armadura transversal (Adaptado de FISKER e HAGSTEN, 2016)

2.4. RECOMENDAÇÕES NORMATIVAS

Neste tópico serão descritas as prescrições de resistência a cisalhamento de vigas de concreto armado de quatro códigos de projeto, os quais não levam em consideração a utilização do AR em suas recomendações. Com o objetivo de dimensionar as vigas para romperem por cisalhamento, também é apresentado o método adotado para estimar a resistência a flexão das vigas. Os códigos avaliados neste trabalho são: ACI 318 – American Building Code for Reinforced Concrete. ACI 318 (2014); EUROCODE 2 – Design of Concrete Structures. EC2 (2004) e NBR 6118 – Projeto de Estruturas de Concreto- Procedimento. NBR 6118 (2014).

2.4.1. ACI 318 – American Building Code For Reinforced Concrete. (2014)

O cálculo da resistência ao cisalhamento de uma peça de concreto armado é baseado na equação Equação 2.1. Segundo o ACI 318 (2014).

$$\Phi.Vn \geq Vu \quad \text{Equação 2.1}$$

Onde:

Vu é a força cortante majorada

Vn é a resistência nominal ao cisalhamento, sendo a última calculada pela equação Equação 2.2.

Φ será considerado unitário para estudos em laboratório.

A previsão da resistência ao cisalhamento de vigas é estabelecida em função das parcelas de resistência do concreto e da armadura de cisalhamento, respectivamente, como se apresenta:

$$Vn = Vc + Vs \quad \text{Equação 2.2}$$

A Equação 2.3 é empregada para estimar a resistência ao cisalhamento de vigas sem armadura transversal, sendo possível verificar que a recomendação define a resistência ao cisalhamento considerando apenas a resistência do concreto (Vc).

$$Vc = 0,17 \cdot \lambda \cdot f_c \cdot b_w \cdot d \quad \text{Equação 2.3}$$

Onde:

$\lambda = 1,0$ para concreto convencional; $0,75$ para o concreto leve

f_c é a resistência à compressão do concreto, obtida pelos ensaios em corpos de prova cilíndricos;

b_w é a largura da viga;

d é a altura útil da viga.

De acordo com o ACI 318 (2014), para as vigas com armadura de transversal, a resistência ao cisalhamento é a soma da resistência fornecida pelos estribos. A parcela de contribuição da armadura de cisalhamento é calculada pela Equação 2.4. O código também limita a resistência máxima ao cisalhamento de vigas, através da possível ruptura pelo esmagamento da biela de concreto, Equação 2.5.

$$V_s = \left(\frac{d}{s}\right) \cdot A_{sw} \cdot f_{yw} \cdot (\sin \alpha \cos \alpha) \quad \text{Equação 2.4}$$

$$V_{R, \text{máx}} = 0,66 \cdot f_c \cdot b_w \quad \text{Equação 2.5}$$

Onde:

s - Espaçamento entre as camadas de armadura transversal;

A_{sw} - área de aço de uma camada de armadura transversal;

f_{yw} - tensão de escoamento da armadura transversal, limitada a 420 MPa;

α - ângulo de inclinação da armadura transversal em relação à longitudinal.

2.4.2. EUROCODE 2 – Design of Concrete Structures. EC2 (2004)

De acordo com a referida norma, a resistência ao cisalhamento de vigas sem armadura transversal pode ser verificada pela Equação 2.6. Além de considerar as parcelas de resistência do concreto, o código ainda inclui em sua recomendação a influência da armadura de flexão, devido ao efeito pino e o efeito escala.

$$V_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} \cdot k (100 \cdot \rho_l \cdot f_c)^{\frac{1}{3}} \right] b_w \cdot d \quad \text{Equação 2.6}$$

Onde

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \quad \text{Equação 2.7}$$

$$\rho l = \frac{A_s}{bw \cdot d} \leq 2,0 \quad \text{Equação 2.8}$$

Nas Equação 2.7 e Equação 2.8, as grandezas k e ρl são, respectivamente, um parâmetro de redução da resistência ao cisalhamento, devido ao efeito escala, e taxa de armadura longitudinal das vigas, onde A_s é a área de aço longitudinal. A norma recomenda que $C_{Rd,c}$ seja $0,18/\gamma_c$, e que a tensão v_{min} seja determinada pela equação Equação 2.9.

$$v_{min} = 0,035 \cdot k^{3/2} \cdot f_c^{1/2} \quad \text{Equação 2.9}$$

Para a previsão da resistência ao cisalhamento de vigas armadas transversalmente ($V_{Rc,s}$), é considera apenas a parcela de contribuição da armadura, na qual sua resistência não pode ser inferior à de uma viga sem armadura de cisalhamento, Equação 2.10. Além disso, o código recomenda que a inclinação da biela pode variar entre $21,8^\circ$ a 45° . A resistência máxima ao cisalhamento ($V_{R,max}$) deve ser estimada pela Equação 2.11. Para critério de dimensionamento foi utilizado o maior valor entre a $\tan \frac{d}{a}$ e $21,8^\circ$.

$$V_{Rc,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{ywd} \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha \quad \text{Equação 2.10}$$

Onde, θ é o ângulo de inclinação da biela

$$V_{R,max} = \frac{bw \cdot 0,9 \cdot d \cdot v_1 \cdot f_c \cdot (\cot \theta + \cot \alpha)}{1 + \cot^2 \theta} \quad \text{Equação 2.11}$$

Onde:

$$v_1 = 0,6 \cdot \left[1 - \frac{f_c}{250} \right] \quad \text{Equação 2.12}$$

Com a variação do ângulo de inclinação da biela para o dimensionamento, a norma sugere que as verificações da resistência sejam igualadas as Equação 2.10 e Equação 2.11, visando averiguar o menor ângulo que se pode utilizar para estimar a resistência de uma viga de

acordo com suas características. Com isso, obtém-se a Equação 2.13, que fornece o menor ângulo que pode ser utilizado.

$$\cot\theta = \sqrt{\frac{bw \cdot s \cdot v_1 \cdot f_c}{A_{sw} \cdot f_{yw} \cdot \text{sen}\alpha}} \quad \text{Equação 2.13}$$

2.4.3. NBR 6118 – Projeto De Estruturas De Concreto - Procedimento. (2014)

A norma brasileira exhibe dois métodos de cálculo para estimar a resistência ao cisalhamento de elementos de concreto armado. O modelo I admite diagonais de compressão inclinadas de $\theta = 45^\circ$ em relação ao eixo longitudinal do elemento estrutural. A força cortante resistente de cálculo, relativa à ruína por tração diagonal, é apresentado na Equação 2.14. A estimativa de resistência a cisalhamento de uma viga sem armadura transversal leva em conta apenas a resistência à tração do concreto, como se observa na Equação 2.15. A parcela de resistência proporcionada pela armadura é apresentada na Equação 2.16.

$$V_{Rcsw,I} = V_{Rc,I} + V_{Rsw,I} \quad \text{Equação 2.14}$$

Onde:

$V_{Rc,I}$ - parcela de força cortante absorvida por mecanismos complementares ao de treliça.

$V_{Rsw,I}$ - parcela resistida pela armadura transversal.

$$V_{Rc,I} = 0,6 \cdot f_{ctk,inf} \cdot b_w \cdot d \cot\theta = \sqrt{\frac{bw \cdot s \cdot v_1 \cdot f_c}{A_{sw} \cdot f_{yw} \cdot \text{sen}\alpha}} \quad \text{Equação 2.15}$$

$$V_{Rsw,I} = \frac{A_{sw}}{s} 0,9 \cdot d \cdot f_{ywd} \cdot (\text{sen } \alpha + \text{cos } \alpha) \quad \text{Equação 2.16}$$

Onde:

$f_{ctk,inf} = 0,7 \cdot f_{ct,m}$, equivalente à resistência à tração frágil do concreto em 5% dos casos;

$f_{ct,m}$ é a resistência média à tração do concreto, dada por $f_{ctm} = 0,3 \cdot f_c^{2/3}$, para concretos com resistência à compressão de até 50MPa;

f_{yw} é a tensão de escoamento da armadura transversal, limitada a 500 MPa.

A resistência máxima ao cisalhamento $V_{R,máx I}$ de uma viga é limitada pela Equação 2.17, que estima a ruptura da biela comprimida.

$$V_{R,máx I} = 0,27 \cdot \left(1 - \frac{f_c}{250}\right) \cdot f_c \cdot b_w \cdot d \cdot (\cot \alpha + 1) \quad \text{Equação 2.17}$$

O modelo II admite diagonais de compressão inclinadas de θ em relação ao eixo longitudinal do elemento estrutural, com θ variando livremente entre 30° e 45°, devido os efeitos da fissuração diagonal, que na prática reduz a inclinação da biela, e por consequência, a contribuição do concreto. Para ser considerada a variação da biela, a parcela de contribuição do concreto deve ser obtida pela Equação 2.19. Admite ainda que a parcela resistente do concreto sofra redução com o aumento do esforço solicitante.

De modo análogo ao modelo I, a resistência ao cisalhamento de vigas armadas transversalmente é dada pela contribuição do concreto e da armadura de cisalhamento, como mostra a Equação 2.18. A contribuição das armaduras transversais é calculada pela Equação 2.20 e a resistência máxima ao cisalhamento pela Equação 2.21

$$V_{Rcsw,II} = V_{Rc,II} + V_{Rsw,II} \quad \text{Equação 2.18}$$

$$V_{Rc,II} = V_{Rc,I} \cdot \frac{V_{R,máxII} - V}{V_{R,máxII} - V_{Rc,I}} \leq V_{Rc,I} \quad \text{Equação 2.19}$$

$$V_{Rsw,II} = \frac{A_{sw}}{s} 0,9 \cdot d \cdot f_{yw} \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \cot \alpha \quad \text{Equação 2.20}$$

$$V_{R,máxII} = 0,54 \cdot \left(1 - \frac{f_c}{250}\right) \cdot f_c \cdot b_w \cdot d \cdot \sin^2 \theta \cdot (\cot \alpha + \cot \theta) \quad \text{Equação 2.21}$$

Onde, θ é o ângulo de inclinação da biela, podendo variar entre 30° e 45° para o modelo II. Para critério de dimensionamento foi utilizado o angulo de 30° para inclinação da biela.

3. METODOLOGIA

3.1. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O trabalho experimental tem função de observar a influência da substituição do AGRC sobre o concreto e seu efeito na resistência ao cisalhamento de vigas. Neste sentido, foram feitas análises dos efeitos da utilização simultânea de armaduras longitudinais e transversais em vigas de concreto com diferentes percentuais de AR. Serão abordadas aqui a geometria das vigas, o arranjo das armaduras, instrumentação, sistema de ensaio e as propriedades dos materiais de composição das peças.

3.1.1. Concreto

3.1.1.1. Composição

O concreto utilizado nessa pesquisa foi produzido através de diferentes taxas de substituição de AGRC (0, 30 e 100%), na qual as respectivas dosagens serão mencionadas adiante, para a moldagem de todas as peças foram utilizados aproximadamente 1m³ de concreto, divididos em seis betonadas. O aglomerante empregado foi o CPV ARI RS (cimento Portland de alta resistência inicial), as propriedades do mesmo podem ser observadas na tabela 3.1. Como agregado graúdo utilizou-se brita nº1, de origem basáltica do município de Tucuruí-PA, com diâmetro máximo de 25 mm. Como agregado miúdo, areia média oriunda da mesma localidade. As propriedades dos mesmos podem ser consultadas nas tabela 3.2 e tabela 3.3.

Tabela 3.1 - Características do CP V ARI RS nos limites estabelecidos por norma.

Características	Fabricante	ABNT NBR 5736 (1991)
Massa Específica (g/cm ³)	3,09	-
Finura Blaine (cm ² /g)	4970	≥ 3000
Resíduo peneira 200 µm (%)	0,16	≤ 6,0
Resíduo peneira 350 µm (%)	1,44	-
Tempo de Pega (h:m) Início	02:55	≥ 1:00
Tempo de Pega (h:m) Fim	04:35	≤ 10:00
Resistência à Compressão (MPa) - 1 dia	28,2	≥ 14,0
Resistência à Compressão (MPa) 3 dias	42	≥ 24,0
Resistência à Compressão (MPa) 7 dias	46,2	≥ 34,0
Resistência à Compressão (MPa) 28 dias	51,5	-

Tabela 3.2 - Propriedades e características físicas do agregado miúdo.

Peneira	Areia (amostra 1)			Areia (amostra 2)		
	massa	retida	Acumulada	Massa	Retida	acumulada
(mm)	(g)	(%)		(g)	(%)	
76	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0
9.5	0	0	0	0	0	0
4.8	3,74	1	1	3,02	1	1
2.36	44,55	9	10	54,09	10	11
1.18	66,07	13	23	75,17	15	26
0.6	88,08	18	41	83,84	17	43
0.3	207,49	42	82	207,05	41	84
0.15	61,52	12	95	58,22	12	96
0.08	19,85	4	99	16,58	3	99
Fundo	6,32	1	100	5,45	1	100
Total	476,64	100		503,42	100	
Modulo de Finura	2,51			2,61		
Diâmetro máximo	4,8 mm					
Massa unitária	1,67 g/cm ³					
Massa especifica	2,61 g/cm ³					

Tabela 3.3 – Caracterização do agregado graúdo natural.

Peneira	Brita nº 1			Recomendação normativa
	massa	retida	acumulada	
(mm)	(g)	(%)		NM 248 (ABNT, 2001)
76	0	0	0	
50	0	0	0	
38	0	0	0	
25	0	0	0	
19	1400	14	14	
12	7500	75	89	
9,5	1000	10	99	
4,8	100	1	100	
2,4	0	0	100	
1,2	0	0	100	
0,6	0	0	100	
0,3	0	0	100	
0,15	0	0	100	
Total	10000			
Módulo de Finura	6,96 mm			
Dimensão máxima	25 mm			
Massa unitária	1,34 Kg/dm ³			NM 45 (ABNT, 1995)
Massa específica	2,66 g/cm ³			NM 52 (ABNT, 2002)

No que diz respeito aos agregados reciclados empregados na pesquisa, os mesmos foram produzidos em laboratório através da seleção de corpos de prova (CP) e peças de concreto diversas, o quais eram descartes de pesquisas realizadas. Como forma de triagem desta matéria prima, foram selecionadas estruturas, como pórticos, vigas e CPs de pesquisas aleatórias produzidas na universidade que não continham qualquer tipo de adição que alterasse o desempenho do concreto, como por exemplo, fibras de aço ou de carbono, polímeros, dentre outros.

Vale ressaltar que não houve triagem desse material quanto a sua resistência à compressão de origem. O processo de produção do AGRC consistiu na moagem desses descartes através de um britador do tipo mandíbula. Após esse procedimento todo o material foi peneirado, de acordo com a ABNT NBR NM 248 (2001), e separado em diferentes faixas granulométricas. A dimensão máxima dos agregados graúdos requeridas em projeto é 25 mm. Neste sentido, a faixa granulométrica para os agregados graúdos foi definida no intervalo entre o passante

na peneira 25 mm e retido na 4,8 mm. A caracterização do AGRC utilizado na pesquisa pode ser consultada na tabela 3.4.

Devido a maior quantidade de poros do AGRC, consequência da argamassa aderida, o método proposto por LEITE (2001) foi adotado, o qual considera a utilização de vácuo para a retirada do ar presente nas partículas do AGRC, que faz dessa metodologia a mais adequada para a determinação da massa específica desse material.

Tabela 3.4 – Caracterização AGRC

Peneira	AGRC			Recomendação normativa
	massa	retida	acumulada	
(mm)	(g)	(%)		NM 248 (ABNT, 2001)
76	0	0	0	
50	0	0	0	
38	0	0	0	
25	0	0	0	
19	1700	17	17	
12	4200	42	59	
9.5	2000	20	79	
4.8	2100	21	100	
2.4	0	0	100	
1.2	0	0	100	
0.6	0	0	100	
0.3	0	0	100	
0.15	0	0	100	
Total	10000	100%		
Modulo de Finura	6.96 mm			
Dimensão máxima	25 mm			
Massa unitária	1,11 g/cm ³			NM 45 (ABNT, 1995)
Massa específica	2,62 g/cm ³			Método LEITE (2011)

3.1.1.2. Elaboração das dosagens

Para elaboração das dosagens foi requerido um concreto com 30MPa de resistência à compressão na idade de 28 dias. Para isso, foram adotadas as curvas de dosagem elaboradas por SANTOS *et al.* (2015), que realizaram um programa experimental utilizando o método de dosagem IPT/EPUSP proposto por HELENE e TERZIAN (1992). Onde a/c é a relação água cimento, m é o teor de argamassa, C_c é o consumo de cimento, H é a relação água-materiais secos. A dosagem dos concretos pode ser consultada na tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Dosagens do concreto para cada percentual de ARGC.

Traços					
Provável resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	Teor de ARGC (%)	<i>a/c</i>	<i>m</i>	<i>C_c</i> (kg/m ³)	<i>H</i> (%)
30	0	0,59	5,3	342,5	9
	30	0,60	5,1	343,8	10
	100	0,65	5,2	337,2	11

RAHAL e ALREFAEI (2017), relatam não observarem mudanças na resistência ao cisalhamento de peças com teores de ARGC de 5 e 16%. Neste sentido, os percentuais de ARGC adotados tem o propósito de averiguar a influência da substituição parcial ou total dos mesmos em concretos com funções estruturais.

Ao que concerne à trabalhabilidade do concreto, ao final de cada betonada, foi realizado ensaio de abatimento de tronco de cone (*slump test*), como indicado pela ABNT NBR NM 67 (1998), objetivando verificar a influência do teor de substituição de ARGC na mesma. Contudo, em todas as séries obtiveram-se abatimentos de 15±2 cm.

As fôrmas das vigas foram executadas com folhas de madeirite (espessura=10 mm), ver figura 3.1. Adicionalmente, a cura das vigas e dos corpos de prova começou após o início do endurecimento superficial do concreto sob as mesmas condições. A cura foi do tipo úmida, onde as peças foram cobertas por tecidos molhados constantemente, nas primeiras 24 horas, após este período, foi feita a molhagem três vezes por dia, durante 7 dias consecutivos.



Figura 3.1 – Fôrmas utilizadas na produção das vigas.

Para os ensaios de caracterização do concreto foram confeccionados 6 corpos de prova cilíndricos por betonada, moldadas segundo a NBR 5738 (2015). A cura dos CPs foi executada com as mesmas características da cura realizada nas vigas. Ensaio de flexão de três pontos

3.1.1.3. Características das Vigas

A verificação do desempenho de vigas de concreto com agregado reciclado será realizada através da análise experimental das mesmas sob esforço cortante. O estudo visa a realização de ensaios de flexão até a ruína de 12 vigas – sendo 4 de referências e 8 com AR, compondo três séries, S-0, sem teor de AGRC, S-30 e S-100, as quais apresentam 30 e 100% de AGRC, respectivamente. Com o objetivo de analisar a influência da armadura de flexão na resistência ao cisalhamento, os espécimes foram divididos em dois grupos, A e B, os quais apresentam taxas de 1,09 e 2,13%, respectivamente.

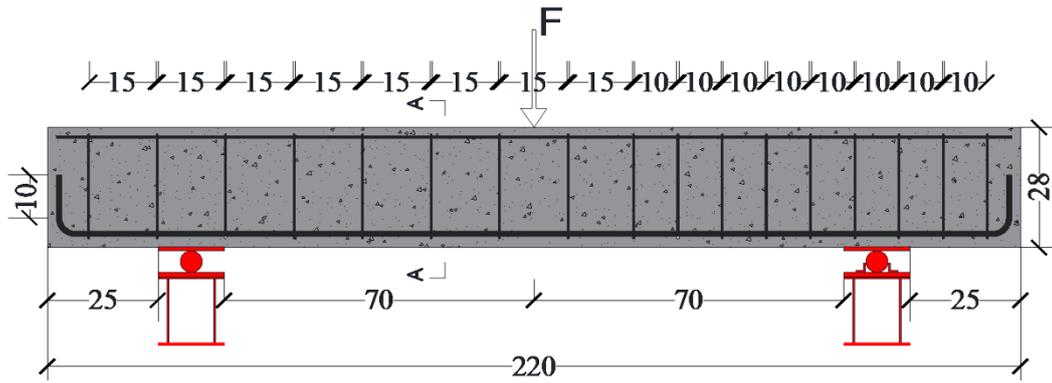
Além das variáveis citadas acima, foi analisada a influência do uso ou não de armadura transversal (W) em vigas com AGRC. Como pode ser visto na tabela 3.6, L é o comprimento longitudinal das vigas, e a identificação das peças está vinculada às variáveis em estudo, por exemplo, a viga VAW0 informa que a peça é pertencente ao grupo A, armada transversalmente e não possui substituição de AN por AGRC.

Tabela 3.6 - Característica das vigas de concreto.

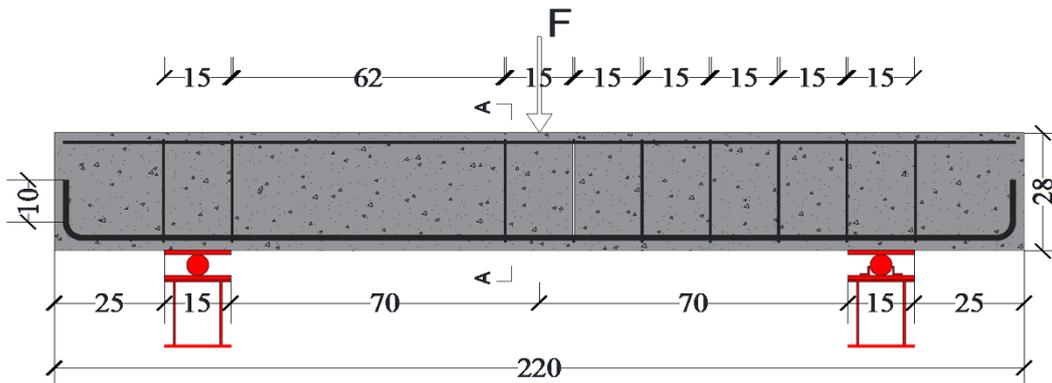
Viga		AGRC (%)	d (mm)	a (mm)	a/d	Φ_f (mm)	Φ_w (mm)	ρ_l (%)	ρ_w (%)
Série	Nome								
S-0	VA0	0	249,55	620,00	2,48	12,5	0	1,09	0
	VAW0						4,2		1,09
	VB0		245,58		2,52	20,0	0	2,13	0
	VBW0						4,2		1,09
S-30	VA30	30	249,55		2,48	12,5	0	1,09	0
	VAW30						4,2		1,09
	VB30		245,58		2,52	20,0	0	2,13	0
	VBW30						4,2		1,09
S-100	VA100	100	249,55		2,48	12,5	0	1,09	0
	VAW100						4,2		1,09
	VB100		245,58		2,52	20,0	0	2,13	0
	VBW100						4,2		1,09

NOTA: $b_w=180\text{mm}$; $h=280\text{mm}$; $L=2200\text{mm}$; $c=20\text{mm}$; $f_c=30\text{MPa}$; $f_{ys}=500\text{MPa}$; $\alpha=90^\circ$; $\rho_w=A_{sw}/b_w s$; $\rho_l=A_{sw}/b_w d$.

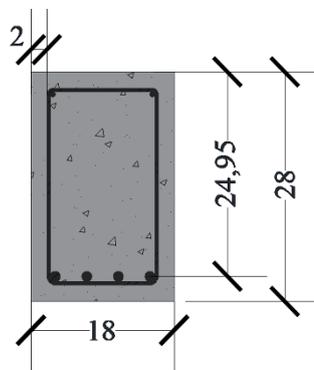
O detalhamento das 12 peças ($180 \times 280 \times 2200 \text{ mm}^3$) pode ser visto nas figuras 3.2 e 3.3. A variação de teor de substituição de AGRC tem por finalidade mostrar de forma mais clara a influência da adição do AR em vigas submetidas a cisalhamento.



a) Vista longitudinal das vigas com armadura transversal.

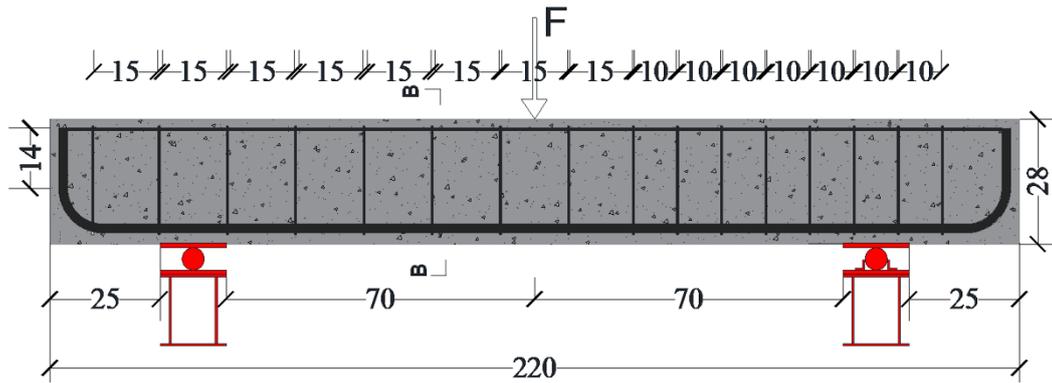


b) Vista longitudinal das vigas sem armadura transversal na zona de teste (vão de cisalhamento).

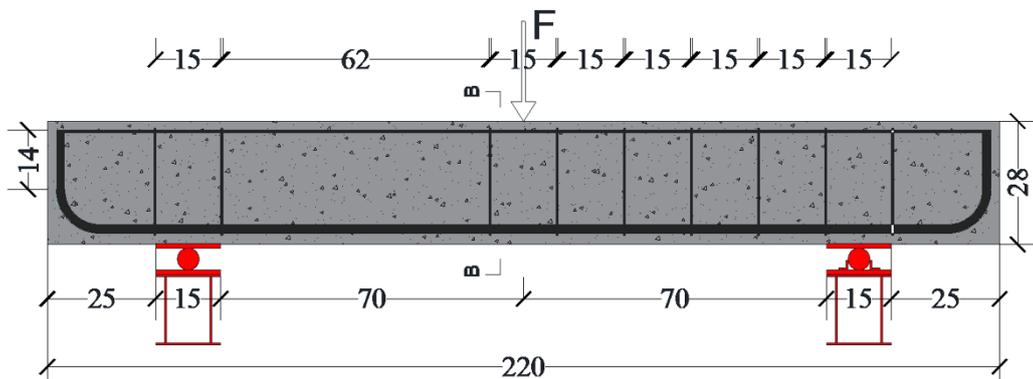


c) Seção transversal (corte A-A).

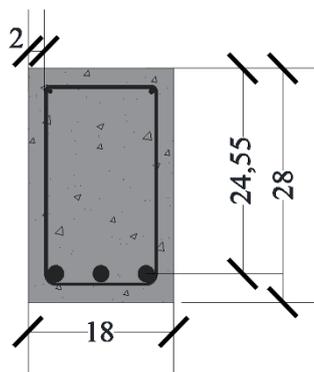
Figura 3.2 – Detalhamento das vigas do grupo A. Cotas em cm.



a) Vista longitudinal das vigas com armadura transversal.



b) Vista longitudinal das vigas sem armadura transversal na zona de teste (vão de cisalhamento).



c) Seção transversal (corte B-B).

Figura 3.3 – Detalhamento das vigas do grupo B. Cotas em cm.

3.1.1.4. Armadura de cisalhamento

Os espécimes serão ensaiados mantendo dois vãos simétricos com diferentes quantidades de armadura transversal, as quais são constituídas por barras de aço de 4,2 mm de diâmetro. O arranjo possui diferença nos espaçamentos entre os estribos – um lado a 100 mm e do outro com 150 mm, como mostram as figuras 3.2 a e 3.3 a. Este modo de acomodação dos estribos

visa à ruptura por cisalhamento do vão com menor quantidade de armadura de cisalhamento. Deste modo, é possível monitorar apenas um lado das peças durante o ensaio.

3.1.1.5. Armadura de flexão

As armaduras de flexão das vigas foram barras de aço de 12,5 e 20 mm de diâmetro. Para as vigas do grupo A serão empregadas quatro barras de 12,5 mm ($\rho_l = 1,09\%$), para as vigas do grupo B serão utilizadas três barras de 20 mm ($\rho_l = 2,13\%$). O arranjo é demonstrado nas figuras 3.2 b e 3.3 b, as respectivas taxas de armadura foram dimensionadas para obter resistências à flexão superiores as de cisalhamento. Os valores obtidos correspondem à recomendação da NBR 6118 (2014), onde $\rho_l = A_s/b_{wd}$.

3.1.2. Sistema de ensaio

A ideia do ensaio é simular de forma clara o comportamento de uma viga biapoiada submetida a carregamento simétrico. Diante disso, as vigas foram dimensionadas para um ensaio de flexão em três pontos. O referido sistema foi composto por suportes de apoio: prensa universal, célula de carga e outros equipamentos que serão descritos a seguir.

Como suportes de apoio foram utilizados dois perfis duplo “I”, com largura de 160 mm, altura de 15 mm e espessura de 4 mm. Sobre os mesmos são apoiadas chapas metálicas com 150 mm de largura e 10 mm de espessura, a qual apenas uma dessas apresenta restrição ao deslocamento horizontal dos roletes (40mm de diâmetro) utilizados, simulando apoios de primeiro e segundo gênero. Para evitar o esmagamento localizado foi posicionada sobre os roletes outra chapa com as mesmas características geométricas. Como mostra a figura 3.4.

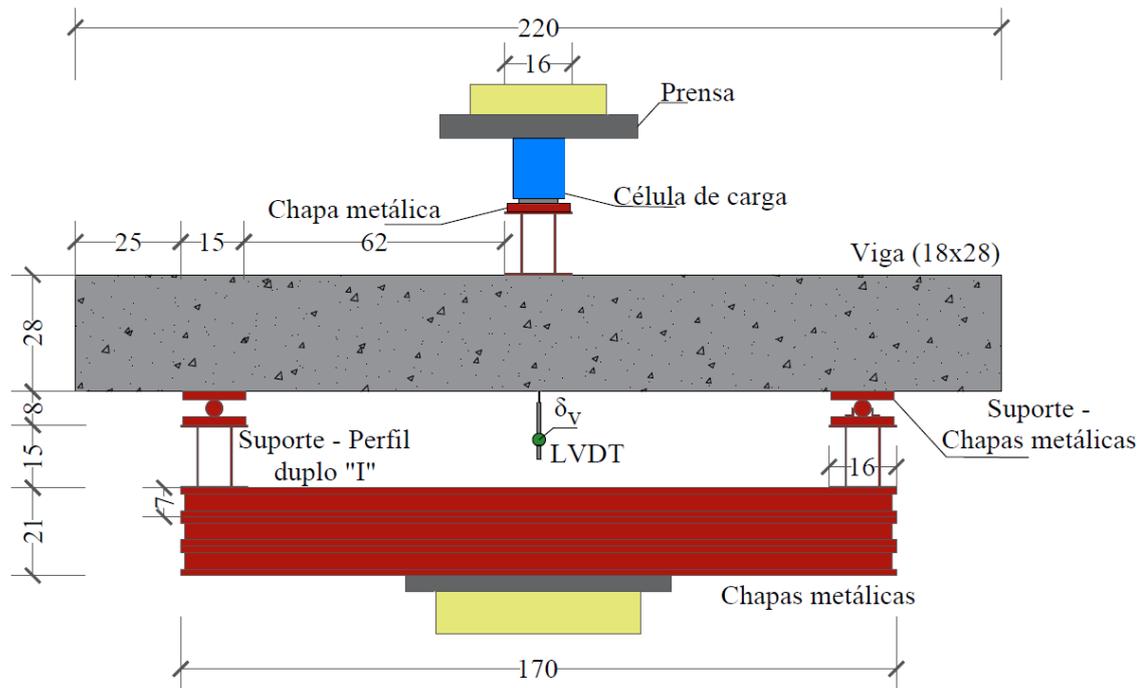


Figura 3.4 – Sistema de ensaio utilizado. Cotas em cm.

Em relação a aplicação do carregamento, o mesmo foi realizado através de uma prensa universal. Foram utilizadas três chapas metálicas vazadas 70 mm de altura e 15 mm de espessura, empilhadas e posicionadas sobre o centro da mesa. Objetivando evitar a ruptura localizada no ponto de aplicação de carga, bem como garantir a dimensão idealizada para o vão de cisalhamento, foi utilizado um perfil metálico com as mesmas características do aparato de apoio. Vale ressaltar que o vão de cisalhamento considerado é a distância entre a extremidade do perfil “I” de um dos suportes de apoio até a extremidade do perfil “I” central, totalizando 62 cm, como pode ser observado na figura 3.4.

Para monitorar o nível de carregamento foi empregada uma célula de carga, localizada entre a parte superior da prensa e o perfil utilizado para fazer a aplicação da carga, além disso, foi utilizada uma chapa metálica disposta entre a célula e o perfil, para as possíveis imperfeições do mesmo não interferir na leitura dos resultados.

3.1.2.1. Instrumentação

Através desta ferramenta é possível analisar o comportamento dos elementos do estudo experimental fazendo uma coleta de informações. Essas informações descrevem o comportamento dos ensaios. Por este motivo, a seguir serão apresentados os métodos de

avaliação dos seguintes tópicos: deslocamento vertical; deformação no concreto; deformação da armadura de flexão; deformação na armadura transversal.

3.1.2.2. Deslocamento vertical

As medições dos deslocamentos verticais das vigas serão feitas por meio de um LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) posicionado no meio do vão de cada peça, com o auxílio de um *yoke* – aparato metálico que permite registrar o deslocamento em função do eixo longitudinal das vigas. Além disto, minimiza a influência negativa de uma possível deformação localizada, proporcionada pelo carregamento concentrado nos apoios. A figura 3.5 mostra o ponto monitorado e o aparato utilizado.

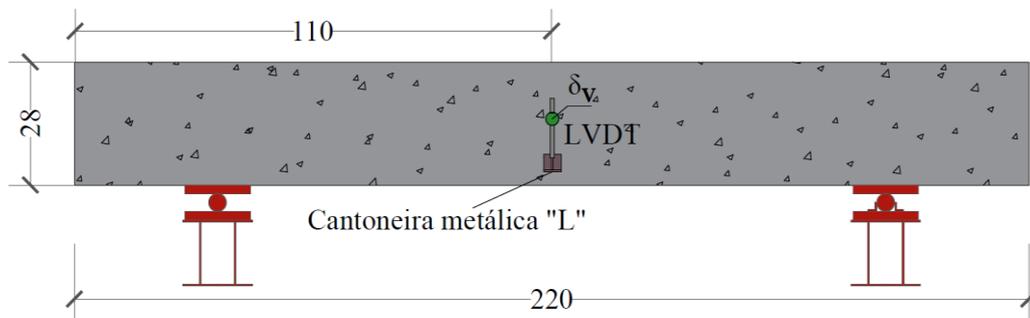
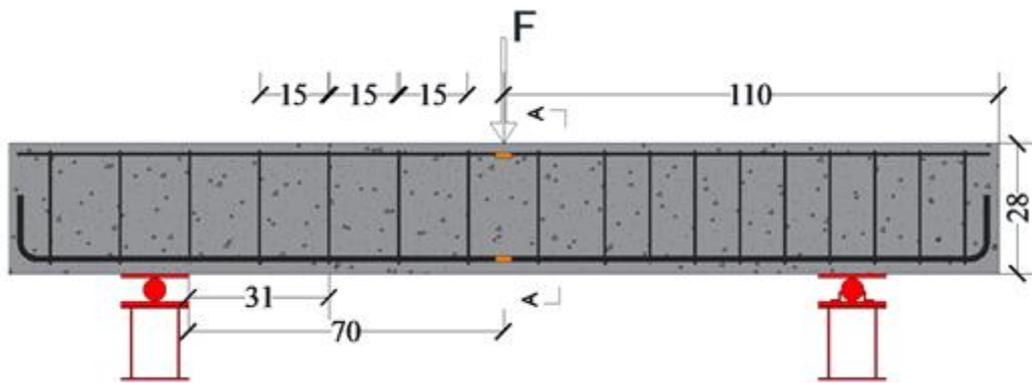


Figura 3.5 - Monitoramento dos deslocamentos.

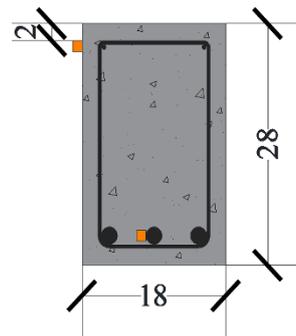
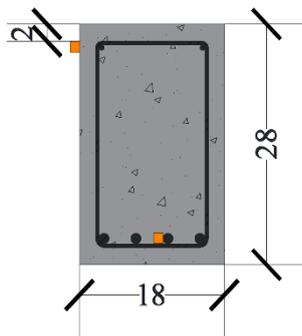
3.1.2.3. Deformação no concreto

Para monitorar as deformações no concreto, foi utilizado um extensômetro elétrico de resistência (EER) para cada espécime, os quais foram locados na superfície das peças, a 2 cm da extremidade superior, e alinhados com o eixo de aplicação de carga, como mostra a figura 3.6.

Adotou-se a referida medida devido o sistema de ensaio ser de três pontos, com isso o carregamento aplicado no meio do vão poderia danificar o EER e comprometer a leitura dos resultados se os mesmos estivessem locados na face superior.



a) Monitoramento das armaduras longitudinais e do concreto.



b) Seção de monitoramento do grupo A.

c) Seção de monitoramento do grupo B.

Figura 3.6 - Extensômetro do concreto e armadura de flexão.

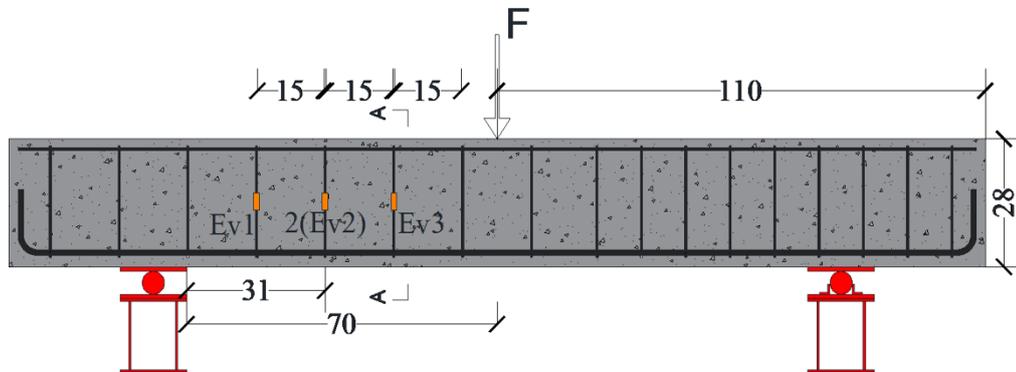
3.1.2.4. Deformação na armadura de flexão

Os registros das deformações das armaduras de flexão dos espécimes foram realizados por um EER, posicionado no meio do vão, na face lateral da armadura de flexão. Para as vigas do grupo B, o posicionamento foi feito na barra central da armadura de flexão das vigas. A figura 3.6 apresenta os pontos instrumentados dessa armadura, assim como o arranjo utilizado. A aquisição destas deformações visa apontar o possível escoamento das armaduras tracionadas.

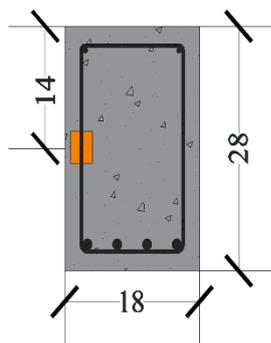
3.1.2.5. Deformação na armadura transversal

As deformações na armadura de cisalhamento das vigas foram monitoradas por quatro EER. Os extensômetros foram colocados em três estribos, localizados no vão de cisalhamento menos armado, e distribuídos conforme a figura 3.7. Tal medida tem finalidade de comparar os níveis de deformação em diferentes pontos das vigas. Os EER foram alinhados ao eixo longitudinal das vigas e posicionados a $h/2$, em apenas uma das “pernas” dessa armadura.

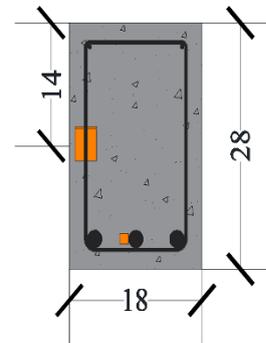
Para os estribos localizados a 31cm do apoio, foram utilizados dois EER, devido o mesmo possivelmente interceptar de modo mais eficiente a fissura crítica de cisalhamento. Para efeito de análise foi utilizada a média dos valores de deformação entre os extensômetros Ev2.



a) Monitoramento das armaduras transversais.



b) Seção monitorada do grupo A.



c) Seção monitorada do grupo B.

Figura 3.7 - Monitoramento dos estribos.

3.2. BANCO DE DADOS

A formação do banco de dados de vigas de CAR submetidas ao cisalhamento foi baseada na coleta de estudos disponíveis na literatura. Tal revisão resultou em vigas com diferentes taxas de armadura transversal, longitudinal e teor de AGRC. Os trabalhos foram classificados em 3 grupos, contendo em cada um deles vigas com e sem armadura transversal. Para o grupo 1 (teor menor que 11% de ARC), foram selecionados 20 vigas com estribos e 22 sem estribos, para o grupo 2 (teor de 11% a 50% de ARC), 20 vigas com estribos e 32 sem estribos e para o grupo 3 (teor maior que 50% de ARC), 30 vigas com e 46 sem armadura de cisalhamento.

Os critérios para a seleção do banco de dados foram: a relação entre o vão de cisalhamento e altura útil da viga (a/d) maior ou igual a 2,5, a resistência a compressão menor que 76 MPa, a taxa de armadura transversal mínima e máxima para vigas com estribos de acordo NBR 6118 – 2014 e a resistência à flexão menor do que 80% da carga última. O banco de dados contém 170 vigas com as características descritas no processo de triagem, conforme as Tabelas A.1 e A.2 no anexo A.

4. RESULTADOS

Alguns resultados dos testes em séries de vigas com diferentes taxas de substituição de AGRC são apresentados e discutidos a seguir, os quais viabilizam a avaliação da influência do consumo de AGRC no comportamento estrutural dessas peças. Em particular, quatro grupos de relações são mostrados: carga-deslocamento; desenvolvimento de deformações em concreto na superfície superior das vigas; mobilização da armadura longitudinal e mobilização da armadura transversal.

4.1. ANÁLISE EXPERIMENTAL

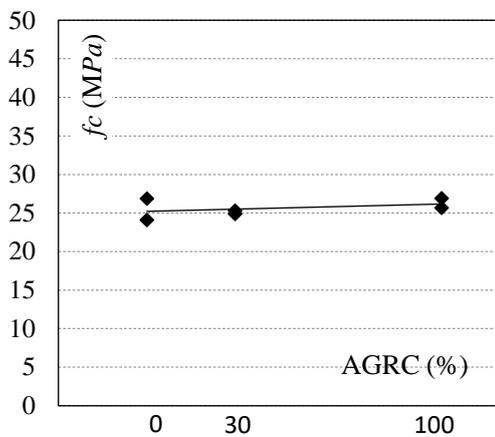
4.1.1. Propriedades mecânicas do concreto

Em relação a caracterização do concreto, os ensaios de compressão axial foram realizados seguindo as recomendações da ABNT NBR 5739 (2007). Para os ensaios de tração por compressão diametral e módulo de elasticidade foram seguidas as recomendações da ABNT NBR 7222 (2011) e ABNT NBR 8522 (2008), respectivamente. As dimensões dos corpos de prova utilizados foram de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura.

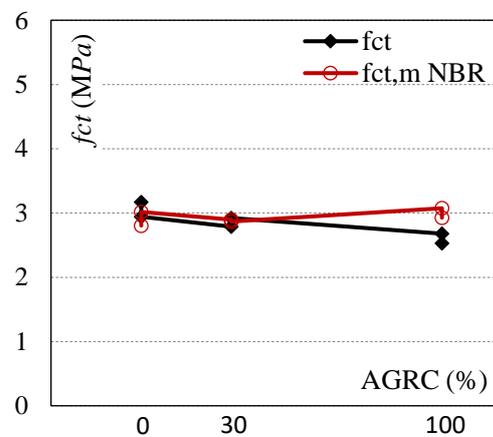
Os resultados dos ensaios de caracterização são apresentados na tabela 4.1 e figura 4.1 Para determinação final dos valores de resistência à compressão e resistência à tração, foi utilizado o valor potencial. Para o módulo de elasticidade, foram considerados os valores médios obtidos conforme as recomendações da ABNT NBR 8522 (2008). Para a plotagem do gráfico da figura 4.1, são considerados os valores de f_{ct} apresentados na tabela 4.1, e comparado com os valores de resistência à tração média ($f_{ct,m}$) recomendados pela ABNT NBR 6118 (2014), e obtidos pela equação $f_{ct,m} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3}$.

Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas do concreto.

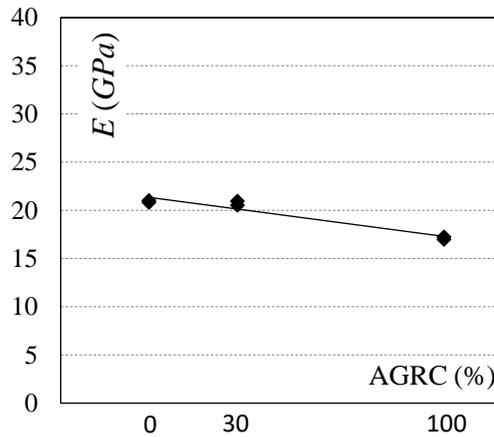
AGRC (%)	Betonada	Características do concreto (MPa)			
		f_c	f_{ct}	E_c	VIGA
0	B1	24,09	3,17	20830	VA e VB
	B2	26,89	2,94	21020	VAW e VBW
30	B3	25,32	2,79	20530	VA e VB
	B4	24,9	2,92	20970	VAW e VBW
100	B5	26,9	2,68	17260	VA e VB
	B6	25,67	2,53	16980	VAW e VBW



a) Resistência à compressão



b) Resistência à tração



c) Módulo de elasticidade

Figura 4.1 – Resultados dos ensaios de caracterização.

É importante ressaltar a superfície de ruptura dos corpos de prova submetidos à tração por compressão diametral, onde os mesmos apresentaram superfície mais rugosa para os CPs da série S-0, essa rugosidade é menos perceptível nas superfícies das séries S-30 e S-100. Além

disso foi possível observar uma quantidade de poros e fissuras, como relatado por GHORBEL e WARDEHQUE (2017). A ruptura dos corpos de prova pode ser observada na figura 4.2.

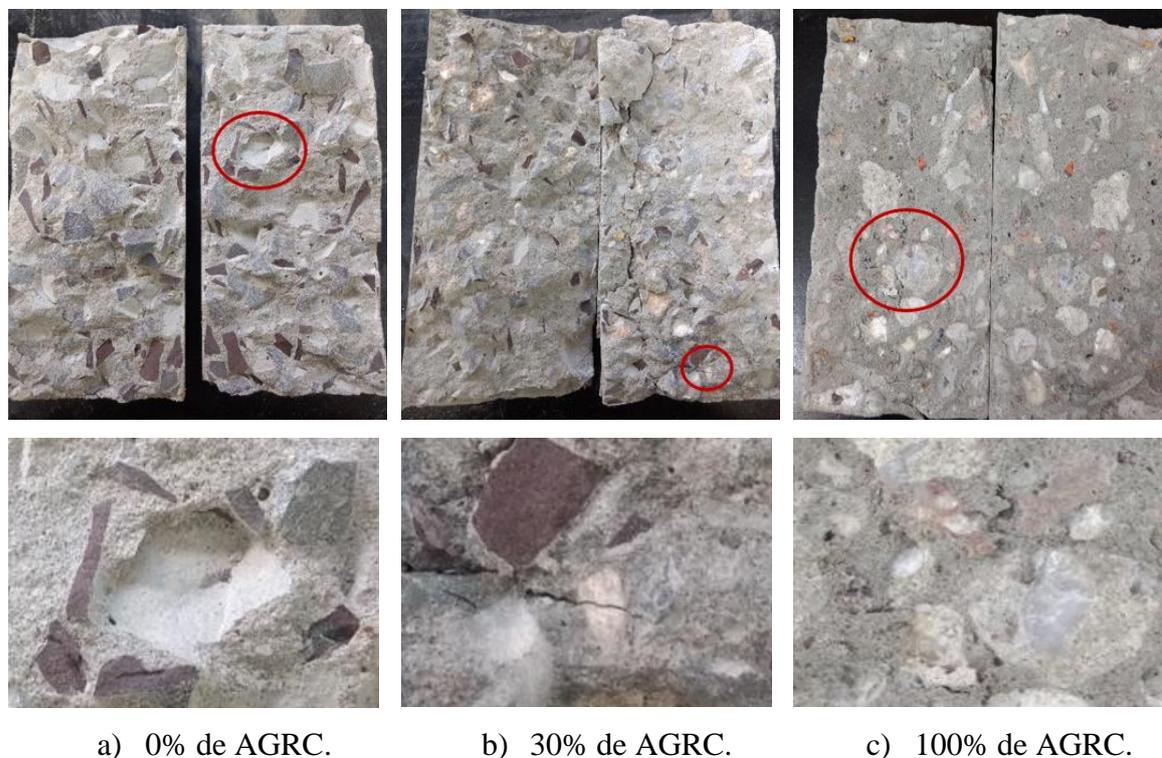


Figura 4.2 – Superfície de ruptura dos corpos de prova.

A figura 4.2 a) apresenta a ruptura na ZTI, e por isso é definida a superfície mais rugosa, ao passo que o AGRC é inserido, é possível observar algumas fissuras interceptando agregado (Figura 4.2 b), o que acarretou em uma superfície mais lisa, com menos relevo e saliências dos cilindros com AGRC.

4.1.2. Propriedades mecânicas das armaduras

Para definir as propriedades mecânicas das barras de aço foram utilizadas 3 amostras de 500 mm de cada bitola instrumentada ($\phi 4,2$, $\phi 12,5$ e 20 mm), as quais foram ensaiadas à tração axial, de acordo com as recomendações da NBR 6892 (2013). As propriedades obtidas através do ensaio de caracterização do aço são exibidas na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Propriedades mecânicas das armaduras.

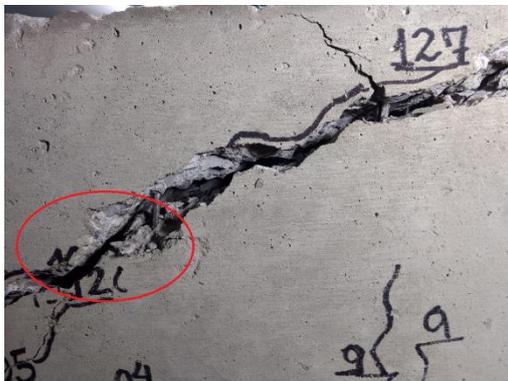
\varnothing (mm)	f_{ys} (MPa)	ϵ_{ys} ‰	E_s (GPa)
4,2	609,5	3,02	201,5
12,5	515	2,69	191
20	546	2,8	194

4.1.3. Rugosidade da superfície da fissura crítica.

Para a análise, foram separados três espécimes, sendo um de cada série (S-0, S-30 e S-100) elaborada nesta pesquisa. Tal investigação foi realizada através de inspeção visual da superfície da fissura, na figura 4.3, tal qual a análise dos CPs. Deste modo, através da figura 4.3 a foi possível observar um comportamento semelhante nas vigas, nas quais é possível notar a diminuição de rugosidade em alguns trechos da fissura crítica da viga pertencente à S-30, à medida que aumenta o teor de substituição AGRC é exibida uma superfície mais lisa na viga pertencente à série S-100.



a) Viga pertencente à série S-0



b) Viga pertencente à série S-0



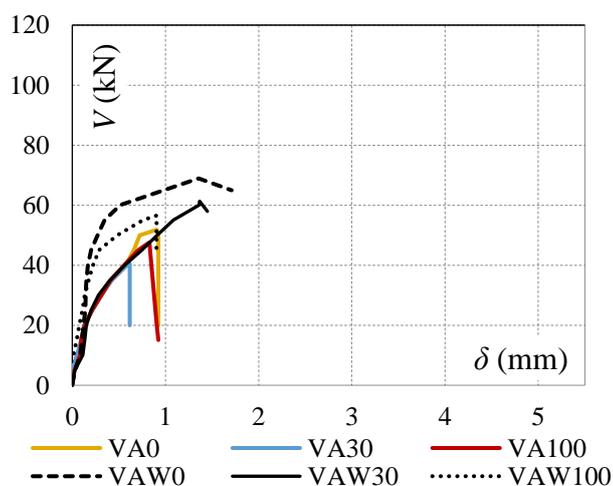
a) Viga pertencente à série S-0

Figura 4.3 – Mudança da rugosidade com o aumento do AGRC.

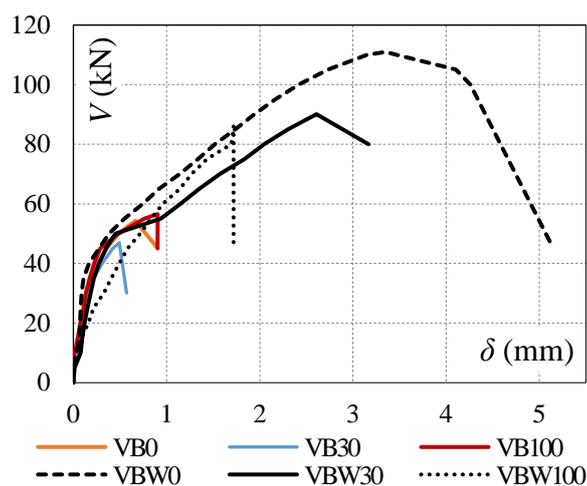
A rugosidade da fissura crítica tem influência direta na resistência ao cisalhamento, pois deixando a superfície com a menor rugosidade é diminuída a contribuição do engrenamento dos agregados. Contudo, para conclusões mais objetivas faz-se necessária uma investigação em microescala.

4.1.4. Relação Carga-Deslocamento

As relações de carga-deslocamento ($V-\delta$) das amostras medidas neste estudo estão resumidas na figura 4.4. Os valores atribuídos são referentes às leituras obtidas no meio do vão de cada viga das séries de ensaio. Em geral, os valores de δ não excederam 5 mm. Em relação ao modo de ruína, todos os espécimes sofreram ruptura por cisalhamento antes da flexão.



a) Vigas do grupo A.



b) Vigas do grupo B.

Figura 4.4 – Carga x deslocamento.

Em relação aos espécimes do grupo A, é possível observar um comportamento semelhante entre os espécimes sem estribos, é importante destacar que a rigidez não foi alterada com o aumento do teor de AGRC. Quanto aos valores de carga e deslocamentos, estes também não apresentaram grandes variações. Vale ressaltar o comportamento praticamente idêntico desses espécimes para o nível de carregamento abaixo de 40 kN.

Ao passo que é inserida a armadura de cisalhamento há um ganho de rigidez proporcionado por estas nas vigas VAW0 e VAW100, o que não é conferido à viga VAW30. Em relação a variação de carga, as peças sem estribos apresentaram variação de carga de 18% entre a peça mais resistente (VA0) e a de menor resistência (VA30). Para os espécimes com estribos, essa variação foi cerca de 20% entre as peças VAW0 e VAW100.

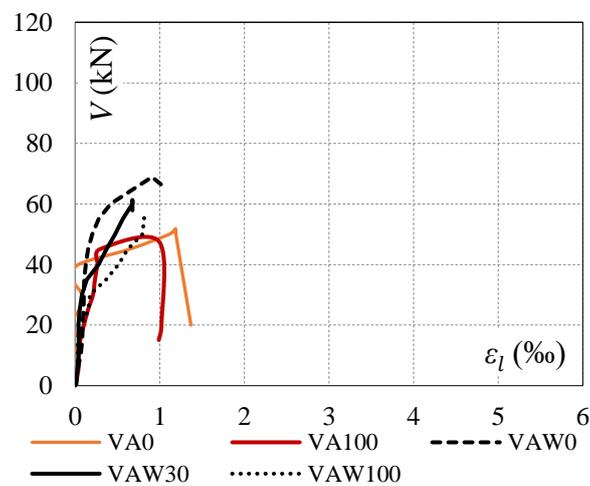
De maneira análoga é apresentado o desempenho das peças do grupo B, no qual apresentam o mesmo grau de rigidez para todas as peças, com exceção do espécime VBW100. Em relação ao desempenho das peças sem armadura de cisalhamento, os mesmos são exibidos de maneira muito similar as vigas do grupo A, apresentando valores muito próximos de deslocamento para as peças VB0 e VB100, e variação de carga entre as vigas VB100 e VB30 foi de 19%. É importante destacar desempenho quase idêntico dessas peças para o nível de carga abaixo de 40 kN.

Para as vigas com estribos, é evidente a perda de ductilidade com o aumento do teor de AGRC. A variação de carga de 28% é exibida entre as peças VBW0 e VBW100, contudo, é

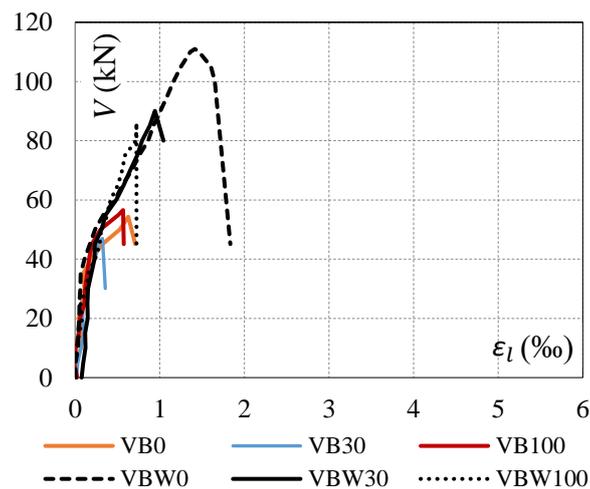
possível observar ainda o comportamento semelhante entre as vigas VBW0 e VBW30 para níveis de carregamento abaixo de 45 kN.

4.1.5. Deformações na Armadura Longitudinal

Em seções anteriores foi exibido o plano de instrumentação das armaduras de flexão, o qual foi composto de um EER, instalado nas faces laterais das barras e no mesmo eixo de aplicação de carga. Na figura 4.5 é apresentada as relações *carga x deformação* obtidas em cada espécime.



a) Vigas do grupo A.



b) Vigas do grupo B.

Figura 4.5 – Carga x deformações da armadura longitudinal.

Através das leituras apresentadas, é possível concluir que nenhuma das peças alcançou sua deformação de escoamento, com exceção da viga VA30 que apresentou erro no monitoramento das deformações, essa falha pode ser confirmada através da curva *carga x deslocamento* na figura 4.5 a. O comportamento das curvas *carga x deformação* exibido para as peças com armaduras de cisalhamento do grupo B evidenciou diminuição das deformações para as séries S-30 e S-100. Tal desempenho pode ter relação com a substituição de AN por AR, o qual gera perda na aderência entre o CAR e as armaduras de aço, como relatado (BUTLER *et al*, 2011).

O desempenho das peças do grupo A se mostrou pouco impactado pela adição do agregado reciclado, apresentando pequenas variações de comportamento entre os espécimes, independente do uso ou não de armadura de cisalhamento.

4.1.6. Deformações da Armadura Transversal

Para analisar a mobilização das armaduras transversais, utilizaram-se os resultados do monitoramento descrito no programa experimental. Os resultados expressos pela relação *carga-deformação* ($V-\epsilon_w$) são apresentados na figura 4.6. No que diz respeito aos valores referentes aos espécimes com 100% de AGRC, os mesmos não foram considerados nas análises devidos não apresentarem resultados confiáveis.

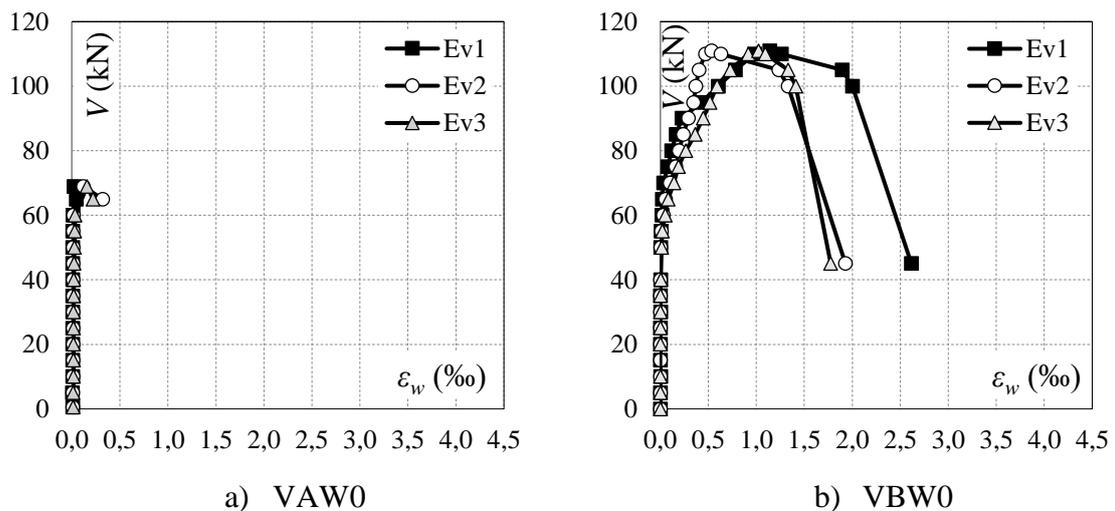


Figura 4.6 – Carga x deformações da armadura transversal.

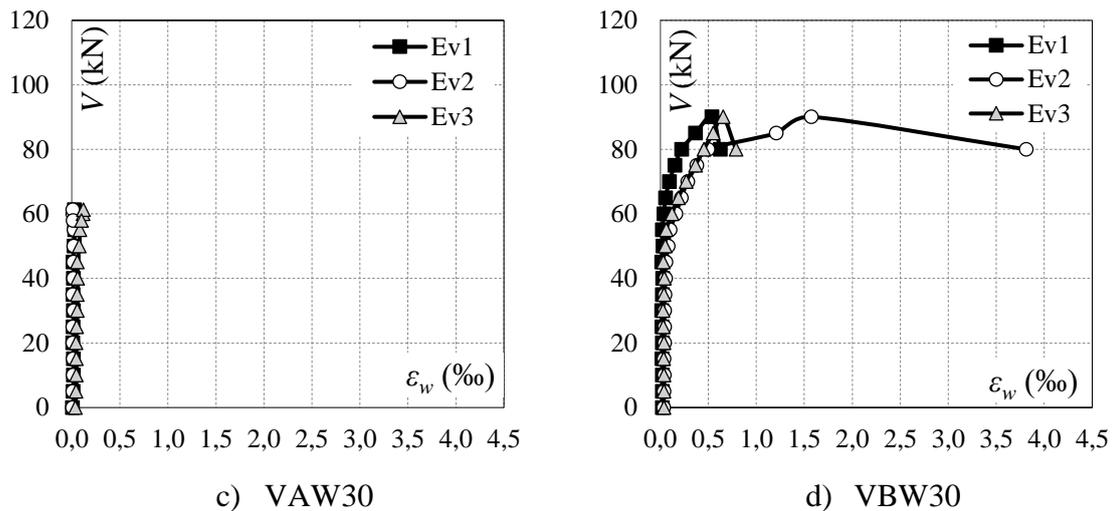


Figura 4.6 - Carga x deformações da armadura transversal.

De modo geral, não existiram mudanças significativas nas deformações entre as vigas VAW0 e VAW30, ambas apresentaram leituras mínimas de deformação nos estribos. Para as peças VBW0 e VBW30 é observado um comportamento de deformação atribuídas pelo posicionamento dos mesmos em relação a fissura crítica de cisalhamento. Tal conduta é mais expressiva no extensômetro Ev2 da viga VBW30, o qual se posicionou mais próximo da fissura crítica, apresentando maiores valores de ϵ_w .

4.1.7. Deformações do Concreto

Na seção do programa experimental foi discutido que as deformações na face comprimida das vigas (ϵ_c) seriam monitoradas por um EER, o mesmo estaria fixado na face frontal das peças e alinhados com os extensômetros das armaduras de flexão no meio do vão. Na figura 4.7 são mostradas as relações *carga x deformação* de todas as vigas.

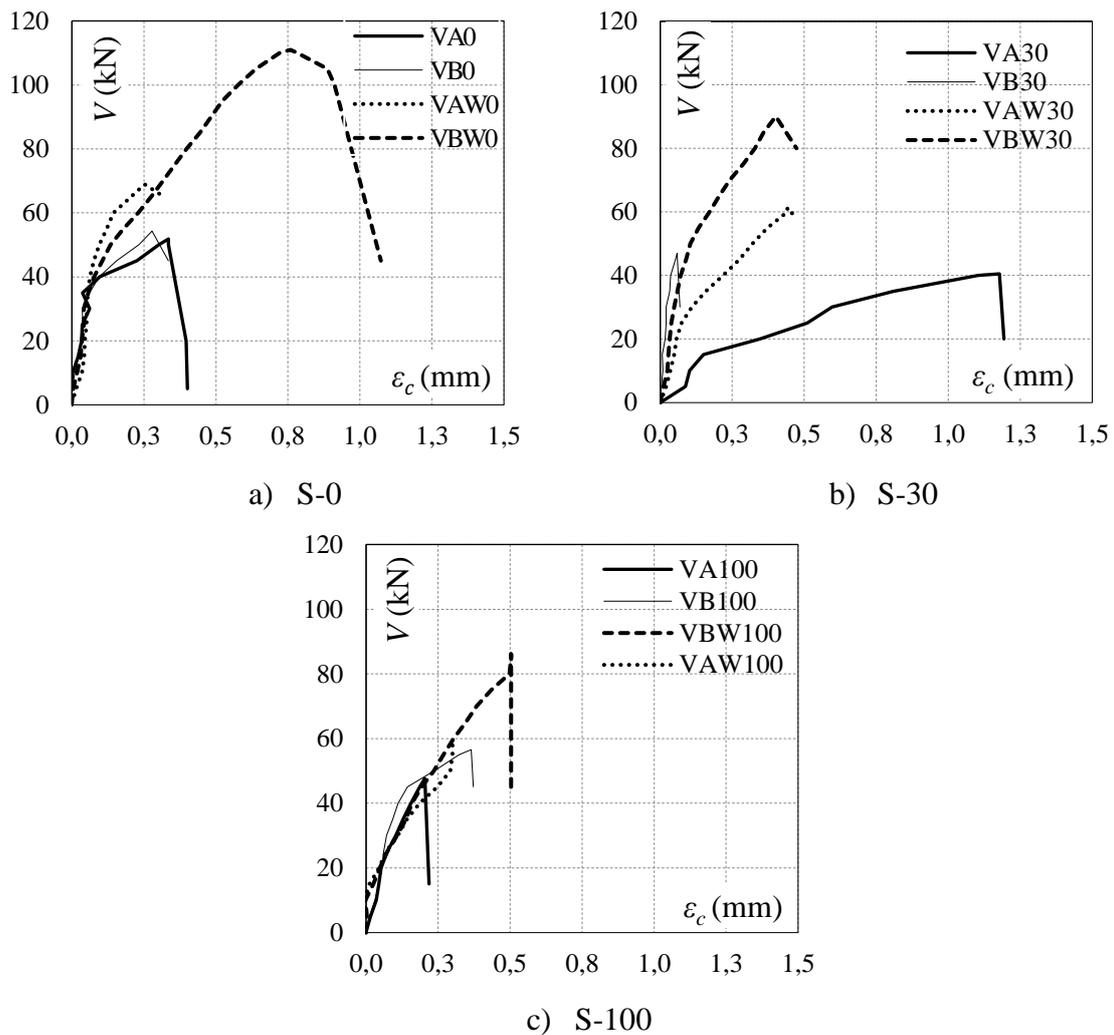


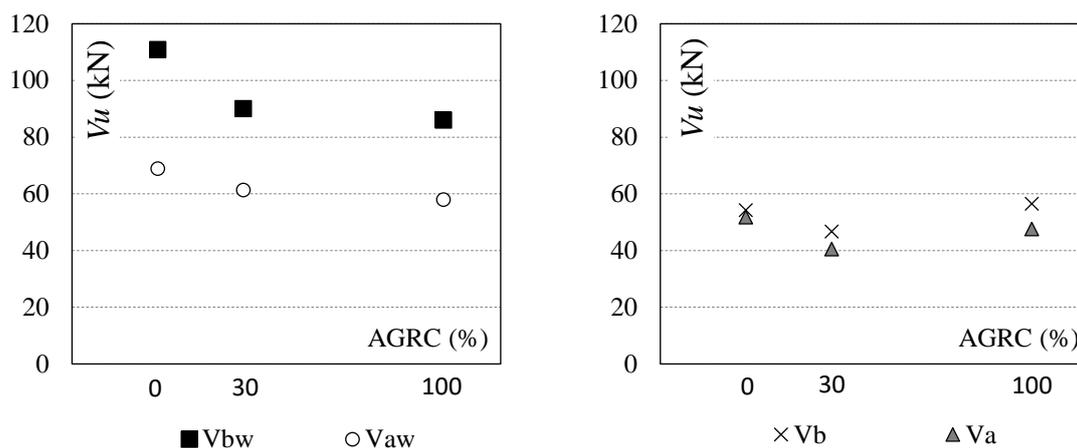
Figura 4.7 - Carga x deformações do concreto.

Tal análise permite afirmar que as deformações diminuem com a evolução da carga para os espécimes do grupo B armados transversalmente com 30 e 100% de AGRC. Entretanto, para as peças do grupo A com estribos, tal diminuição se mostrou menos expressiva, comparando peças com 30 e 100% de AGRC. Vale ressaltar, que a leitura de deformação da peça de referência (VAW0) foi afetada pela fissura de cisalhamento que interceptou a área monitorada, o que impossibilitou a comparação do comportamento da mesma com as outras séries de ensaio.

Em relação as vigas sem armadura transversal, para o grupo B, não houve diminuição da deformação com o incremento de carga quando comparadas vigas com 0 e 100% de AGRC. Todavia, a referida diminuição é observada para as peças do grupo A. No comportamento pós o pico de carga das peças é observado quedas mais bruscas para a série S-100, devido a possível maior fragilidade obtida através do AR para concretos desta série.

4.1.8. Relação V_u x AGRC (%)

A seguir é demonstrada a relação entre carga última de cisalhamento e teor de substituição de agregados, no qual pode ser observada a variação de resistência ao passo que se adiciona AGRC na matriz de concreto. A figura 4.8 apresenta os espécimes com armadura e sem armadura transversal, e ambos possuem espécimes do grupo A e B.



a) Peças com armadura transversal

b) Peças sem armadura transversal

Figura 4.8 – Relação V_u x AGRC (%).

Para vigas com armadura transversal, é possível observar um comportamento decrescente mais acentuado para taxas de substituição de AGRC iguais a 30% e $\rho_l = 2,13\%$. Para peças com $\rho_l = 1,09\%$ a queda no rendimento também é observada, todavia, de maneira mais suave em comparação às vigas do grupo B. Tal desempenho se desenvolve também para peças com 100% de AGRC, contudo, com variações de resistências menores para esse teor de AR.

No que diz respeito aos espécimes sem armadura de cisalhamento, não houve um comportamento contínuo da resistência ao passo houve o aumento da taxa de substituição de AGRC. Para os grupos A e B, é exibido um decréscimo de resistência para vigas com teores de AGRC de 30%, desempenho que não é seguido na medida em que as vigas com 100% de AGRC apresentam resistências superiores às peças com 30% de AGRC, o que é mais eminente na peça VB100, a qual apresentou rendimento superior a todas as vigas sem estribos.

4.1.9. Relação V_u x V_{teo}

A tabela 4.3 e figura 4.9 apresentam as relações entre carga última de cisalhamento (V_u) e carga última de cisalhamento teórica (V_{teo}), $\frac{V_u}{V_{teo}} = \lambda$, tal associação apresenta as peças divididas em dois grupos - A ($\rho_l = 1,09\%$) e B ($\rho_l = 2,13\%$). Para as peças com armadura transversal é possível inferir as taxas percentuais de substituição de AGRC através dos valores de V_u , isso é possível devido os valores dos mesmos se apresentarem de forma decrescente para os dois grupos, como mostra a figura 4.9. Em contrapartida, peças sem armadura de cisalhamento impossibilitam tais conclusões, pois não apresentaram o mesmo comportamento.

Tabela 4.3 – Relações experimentais com os códigos de projeto.

Valores Experimentais		$V_{R,NBR}$ (kN)		$V_{R,EC}$ (kN)	$V_{R,ACI}$ (kN)	V_u/NBR_I	V_u/NBR_{II}	V_u/ACI	V_u/EC
Vigas	V_u (KN)	I	II						
VA0	51,85	51,7	51,7	47,8	39,9	1,00	1,00	1,30	1,09
VA30	40,53	54,4	54,4	49,0	41,6	0,74	0,74	0,97	0,83
VA100	47,63	56,9	56,9	50,1	43,1	0,84	0,84	1,10	0,95
VAW0	68,93	76,3	83,5	57,1	63,6	0,90	0,83	1,08	1,21
VAW30	61,35	75,1	82,5	57,1	63,4	0,82	0,74	0,97	1,07
VAW100	58,00	75,7	83,0	57,1	63,6	0,77	0,70	0,91	1,02
VB0	54,33	53,6	53,6	59,6	41,4	1,01	1,01	1,31	0,91
VB30	46,74	53,7	53,7	59,2	41,1	0,87	0,87	1,14	0,79
VB100	56,57	58,6	58,6	62,6	44,4	0,96	0,96	1,27	0,90
VBW0	110,97	76,6	83,9	62,2	63,9	1,45	1,32	1,74	1,78
VBW30	90,07	72,3	79,3	59,8	61,0	1,25	1,14	1,48	1,51
VBW100	86,08	73,4	80,5	60,4	61,6	1,17	1,07	1,40	1,43
Média						0,98	0,94	1,22	1,12
DP						0,21	0,18	0,24	0,30
CV (%)						21,62	19,73	19,74	27,08

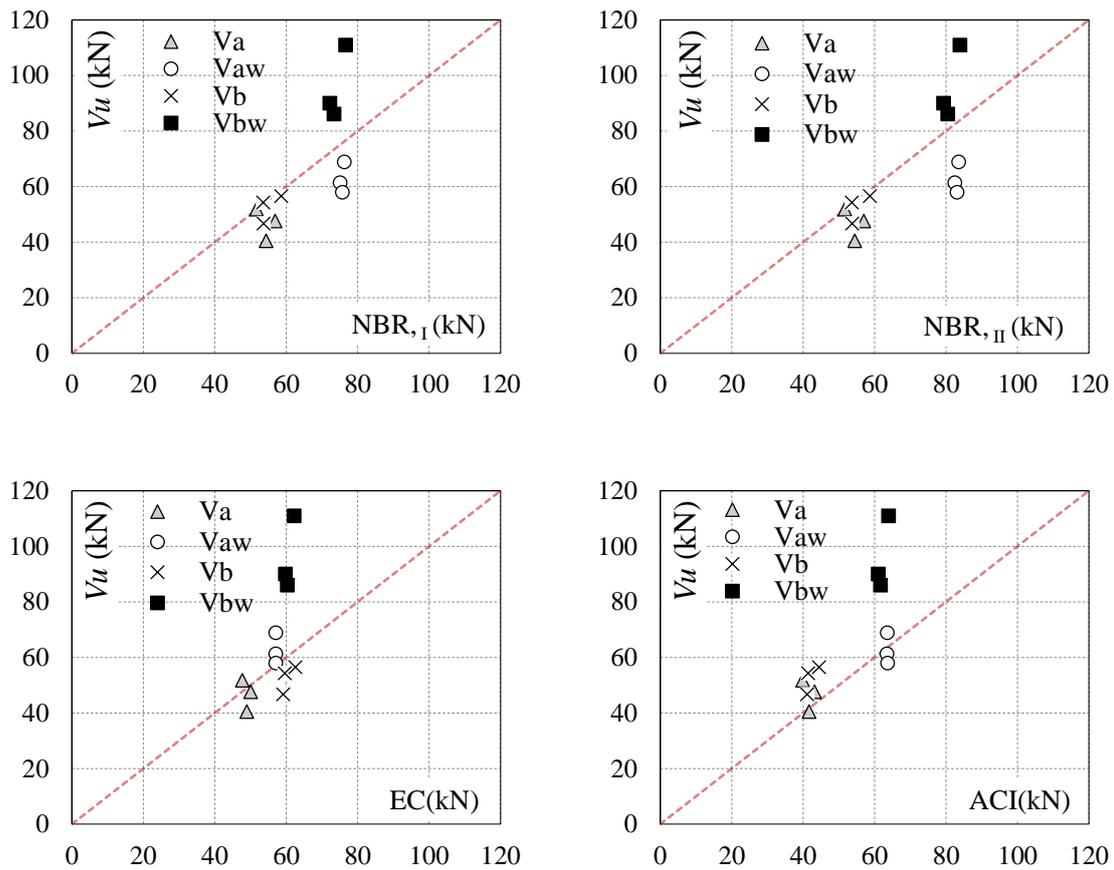


Figura 4.9 - Relação V_{uexp} - V_{uteo} .

Na abordagem dos espécimes com armadura de cisalhamento, as peças do grupo B, independente do teor de substituição de AGRC, demonstraram desempenho conservador em todos os modelos de cálculo. Para os espécimes do grupo A, eram esperados valores de relação λ iguais ou superiores a um (1) para vigas sem AGRC, todavia apresentaram comportamento superestimado das resistências para os modelos NBR_{I} e NBR_{II} , colocando as mesmas em condições inseguras para todos os percentuais de AGRC.

O modelo de cálculo proposto pelo EUROCODE (EC) mostrou o melhor desempenho para as peças com armadura de cisalhamento do grupo A, apresentando valores seguros para todas as taxas de substituição de AGRC, devido este modelo considerar apenas a parcela de contribuição das armaduras e gerando previsões de carga mais baixas em comparação aos outros modelos. Por outro lado, o ACI demonstrou comportamento seguro apenas para a viga de referência (VAW0).

O comportamento superestimado das resistências também pode ser observado no modelo proposto pelo EC para as peças sem armadura de cisalhamento do grupo B, colocando as mesmas em condições inseguras para todos os percentuais de AGRC. O mesmo comportamento é observado nos modelos NBR, I e NBR, II, entretanto, os modelos apresentaram rendimento satisfatório quanto a segurança apenas para a viga sem AR. Em contrapartida, essas vigas indicam desempenhos seguros e menos dispersos (comparadas com as vigas do grupo B com armadura de cisalhamento) independente do percentual de AGRC no código ACI.

Esse rendimento satisfatório se deve à pequena parcela de contribuição do concreto e geometria das peças na estimativa de resistência cisalhante, gerando valores superestimados em relação aos outros modelos, os quais consideram outros parâmetros, como a contribuição das armaduras de flexão e efeito de escala para o EUROCODE e parcelas de contribuição maiores do concreto para NBR, I e NBR, II. Tais parâmetros geram previsões de resistência maiores e conseqüentemente diminuem a relação λ .

Seguindo a mesma linha de raciocínio, as peças do grupo A sem estribos, exibiram valores abaixo dos limites de segurança para taxas de 30% e 100% de AGRC nos modelos NBR, I e NBR, II, mostrando-se satisfatória apenas para previsão de resistência de vigas sem AGRC. A relação exibida pelo EC apresenta comportamento semelhante, exibindo desempenho mais próximo da relação desejada ($\lambda = 1$) para peças com 30 e 100% de AGRC, contudo, ainda assim inseguros.

4.1.10. Relação λ x AGRC (%)

Para efeito de análise da influência da adição de AGRC, é apresentada a relação entre λ e taxa de substituição de agregados, com finalidade de observar o comportamento desenvolvido em cada modelo de cálculo. Como pode ser visto na figura 4.10.

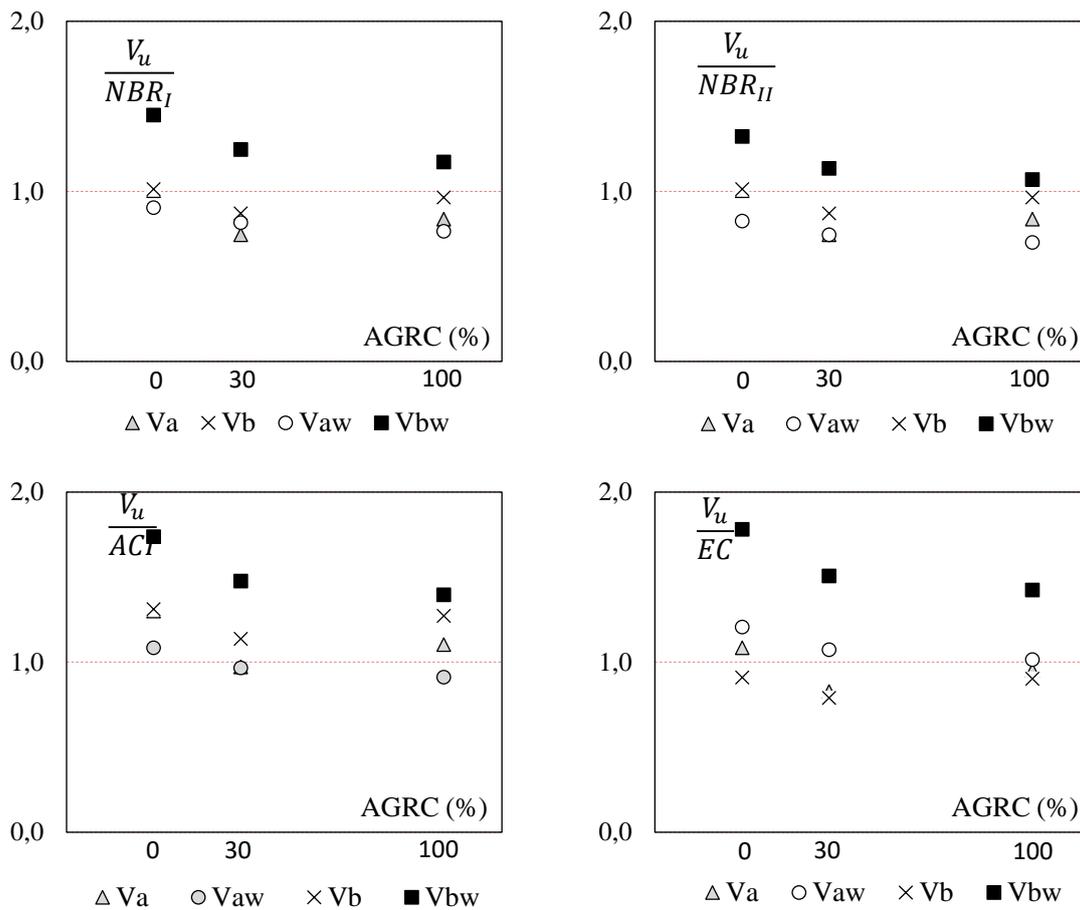


Figura 4.10 – Relação λ x AGRC (%)

Para vigas com armadura transversal, é possível observar um desempenho decrescente das peças do grupo B em todos os códigos analisados à medida que se aumenta o teor de substituição. Comportamento também apresentado pelas peças do grupo A, contudo, com variações de λ menores para as vigas VAW30 e VAW100 em relação à sua referência. Tal desempenho demonstra que a parcela V_s da resistência ao cisalhamento é mais afetada. Além disso, o aumento de ρ acarreta em maior variação de λ , concluindo que as transferências de esforços através do efeito pino também estão sendo afetadas.

O desempenho das peças sem armadura de cisalhamento é composto por uma queda das relações para teores de substituição de 30% de AGRC, contudo, é seguido de um aumento de λ para os espécimes com 100% de teor de AGRC. Apesar da variação apresentada, estas peças exibem um comportamento mais constante, em relação as vigas com armadura de cisalhamento, o que demonstra menor impacto do AGRC na resistência desses espécimes.

4.1.11. Relação $\lambda \times \rho_l$ (%)

Na figura 4.11 é apresentada a influência que ρ_l (%) exerce sobre o valor de λ , a qual mostra que as performances das propostas avaliadas nesta análise são afetadas de formas diferentes para vigas com e sem estribos.

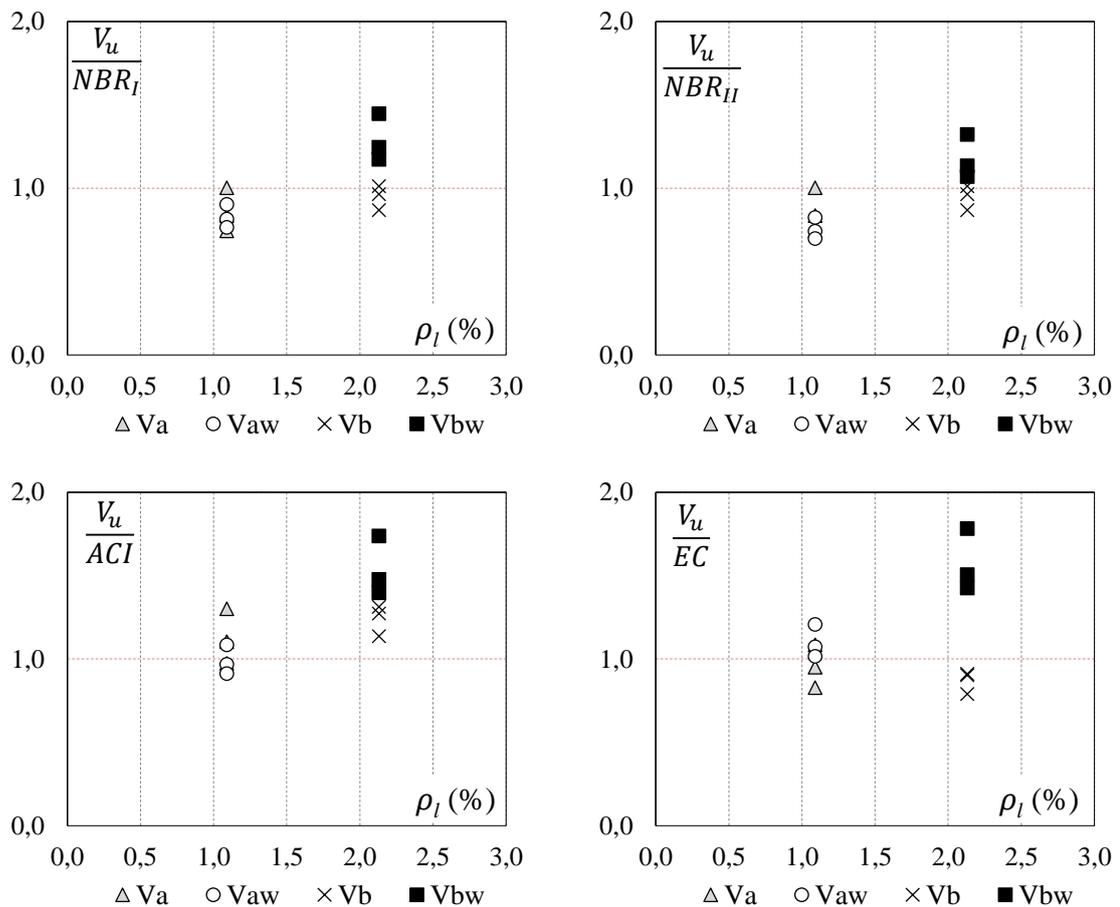


Figura 4.11 – Relação $\lambda \times \rho_l$ (%)

A taxa de armadura longitudinal afetou significativamente o rendimento das vigas armadas transversalmente. No que se refere aos modelos NBR_{I} e NBR_{II} , ao passo que foi elevada a taxa de 1,09 para 2,13% houve a mudança dos valores contra a segurança (grupo A) para um patamar seguro ($\lambda \geq 1$). Esse comportamento crescente também é observado para os modelos ACI e EC. Tal conduta caracteriza o incremento de carga atribuído pelo feito pino.

Em relação as vigas do grupo A com armadura de cisalhamento, as mesmas apresentaram valores de λ menos variáveis – a medida em que se adiciona armadura de flexão - em

comparação aos espécimes com armadura transversal, caracterizando uma menor influência gerada pelo efeito pino através de ρ_l nessas vigas, onde o grau de dispersão de λ foi menor, comparadas ao grupo B.

4.1.12. Relação $\lambda \times \rho_w$ (%)

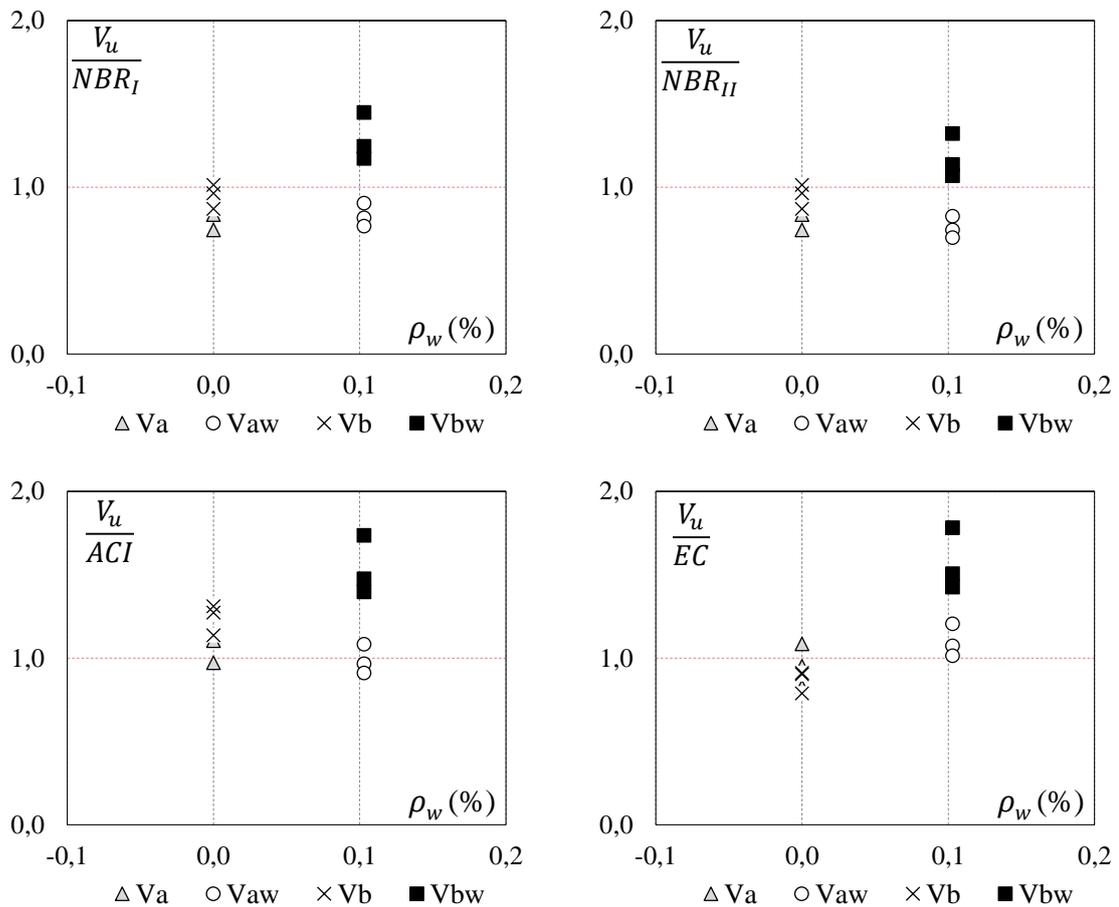


Figura 4.12 - Relação $\lambda \times \rho_w$ (%).

De maneira semelhante à ρ_l , a utilização de armadura de cisalhamento nas vigas do grupo B proporcionaram comportamento crescente de λ para todos os modelos de cálculo. Em contrapartida para as peças do grupo A, exibem desempenho decrescente para os modelos, com exceção do EC, tal acréscimo se deve a este modelo não considerar a parcela de contribuição do concreto na previsão de cisalhamento de vigas com estribos, ocasionando em estimativas de cargas menores, e conseqüentemente em λ maiores, comparado aos outros.

Tal desempenho, pode ser explicado pela pior aderência do concreto reciclado com as armaduras de aço, como já foi citado anteriormente, dificultando as transferências de esforços.

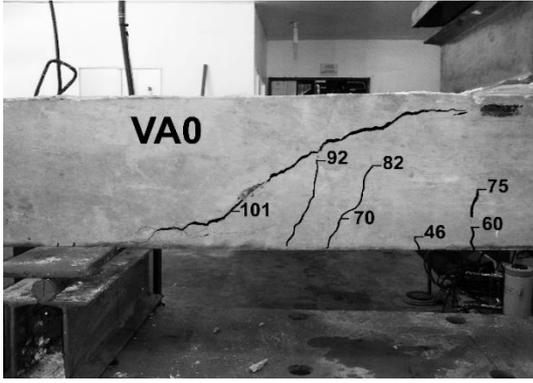
4.1.13. Modos de ruptura

As figuras 4.13 e 4.14 mostram o modo de ruptura dos espécimes com taxas de substituição de AGRC de 0%, 30% e 100%. As mesmas demonstram que não houve mudanças no padrão de ruptura de cada espécime (exceto VB100), a qual todos apresentaram formação de apenas uma fissura crítica, a confirmação desses comportamentos semelhantes pode ser observada na discussão do gráfico *carga x deslocamento*.

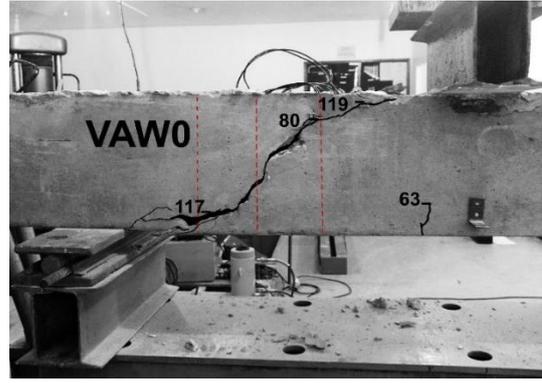
Para vigas sem armaduras transversais é exibida a formação de poucas fissuras, coincidindo com o modo de ruptura brusca dessas peças. Além disso, é exibida a formação de fissuras com níveis de carga mais baixos para as séries S-30 e S-100, comparadas com peças sem AGRC. Tal comportamento é possivelmente consequência da utilização do CAR - mais frágil em relação aos concretos convencionais, esta diminuição está relacionada ao aumento da porosidade do concreto, (GHORBEL e WARDEHQUE, 2017).

Além da ruptura por cisalhamento, os espécimes poderiam romper por esmagamento do concreto no banzo comprimido e por escoamento das armaduras de cisalhamento, entre outros, o que seria inviável para as aplicações deste trabalho. Desta forma, a análise do modo de ruptura é importante por ser uma das primeiras evidências que os espécimes realmente romperam por cisalhamento.

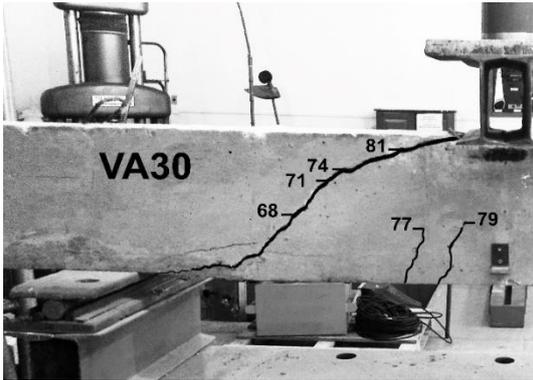
As vigas com armadura transversal apresentaram uma ruptura mais dúctil, como já era esperado. A abertura da fissura se inicia antes de atingir a carga máxima, pois as armaduras transversais exercem o papel de continuar a absorver e as tensões transversais e distribuir de maneira mais uniforme na região solicitada, proporcionando uma maior ductilidade e resistência ao espécime.



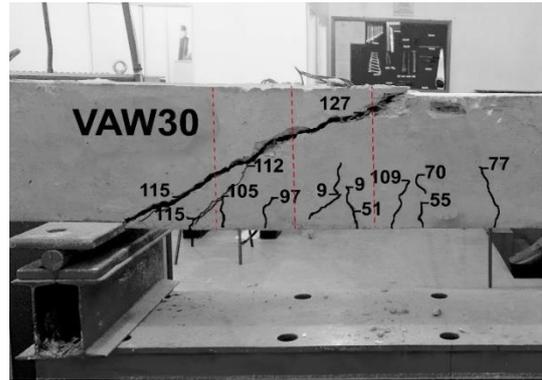
a)



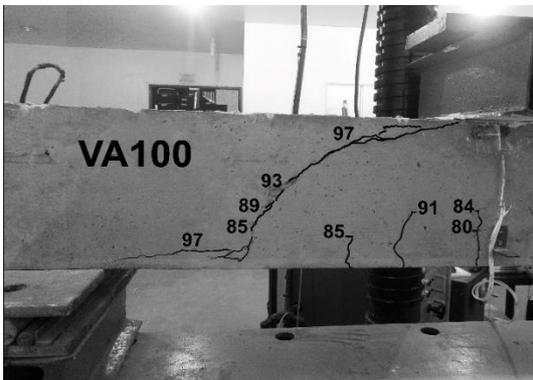
b)



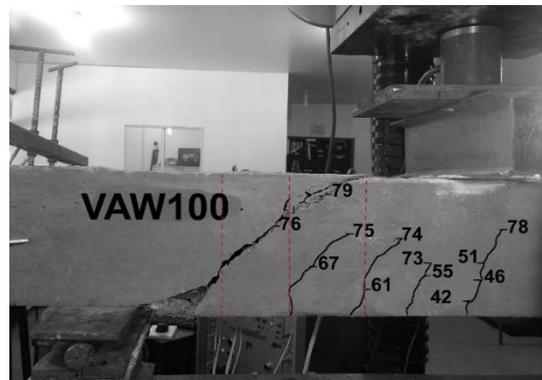
c)



d)

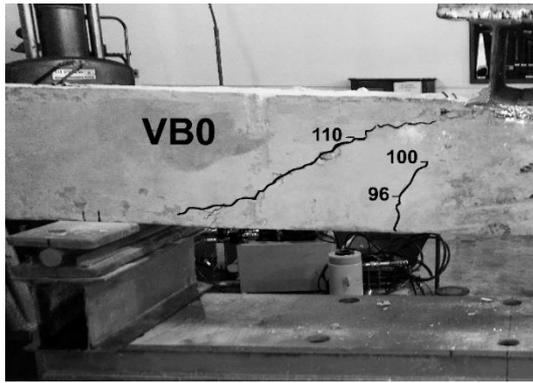


e)

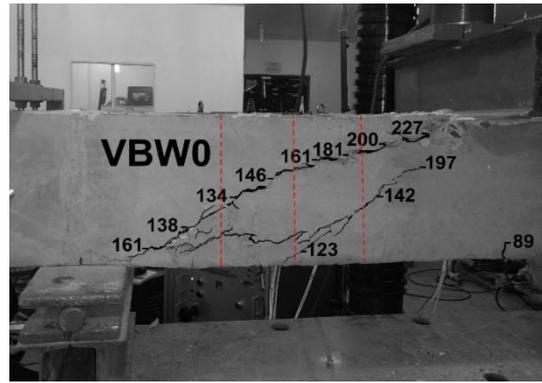


f)

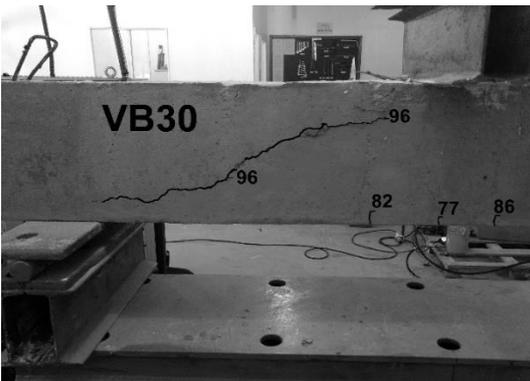
Figura 4.13 – Modo de ruptura das vigas do grupo A.



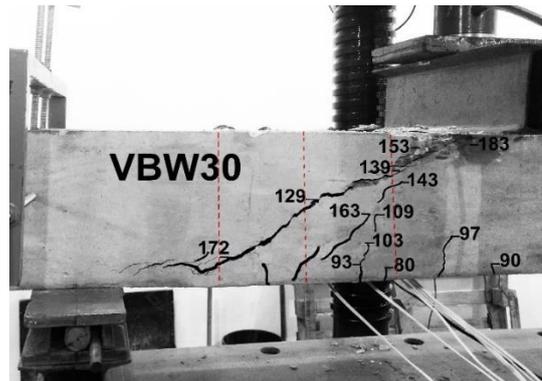
a)



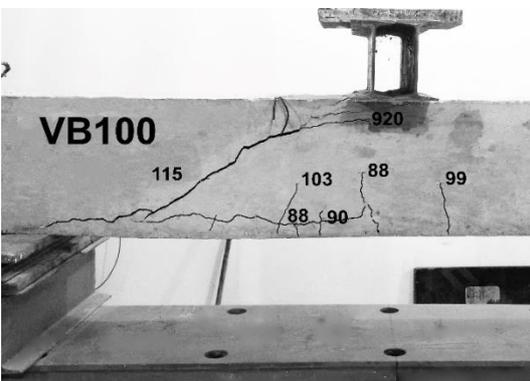
b)



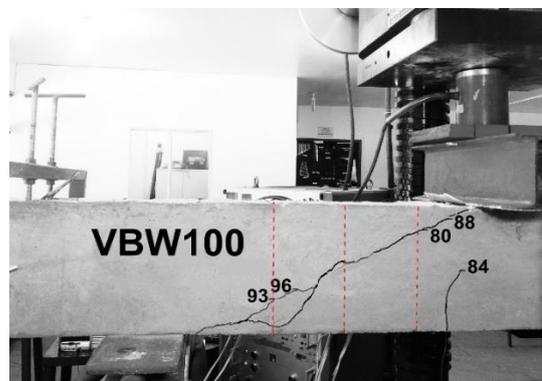
c)



d)



e)



f)

Figura 4.14 – Modo de ruptura das vigas do grupo B.

4.2. ANÁLISE DO BANCO DE DADOS

A seguir é apresentada a análise comparativa da resistência experimental das vigas com as resistências previstas pelas normas: NBR 6118 – 2014, ACI 318 - 14 (2005) e EUROCODE 2 (2004).

4.2.1. Relação entre $V_u \times V_{teo}$

4.2.1.1. Para vigas com armadura transversal

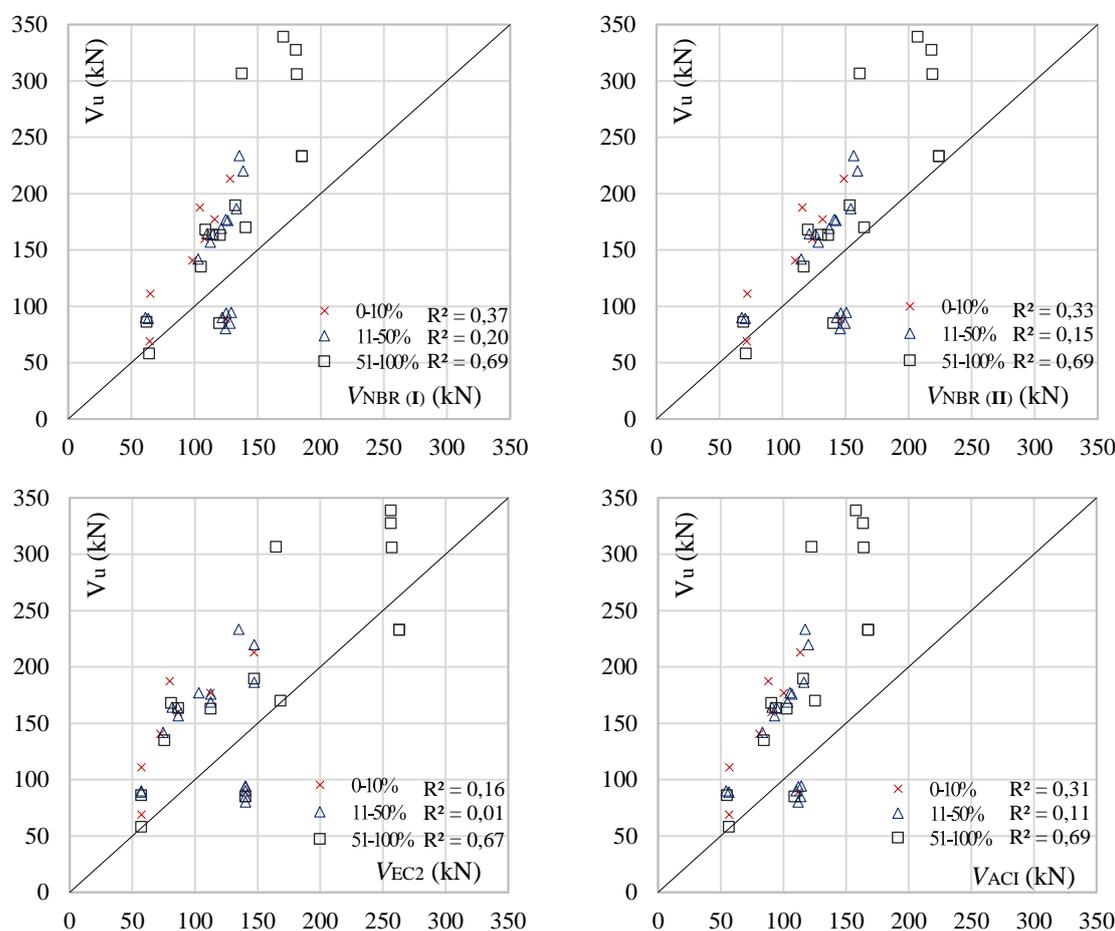


Figura 4.15- Relação $V_{uexp} - V_{uteo}$.

Nesta abordagem a maior parte dos espécimes apresentaram comportamento seguro, independente do teor de substituição de AGRC e do modelo de cálculo utilizado, como pode ser visto na Figura 4.15. As quatro peças com os maiores valores de resistência última se enquadram no grupo com maior percentual de AGRC, demonstrando o baixo impacto do mesmo na resistência ao cisalhamento das vigas, além disso, é possível verificar que estas

peças possuem elevadas taxas de ρ_l (3,3% e 4,0%) e elevadas taxas de ρ_w (0,3% e 0,4%), evidenciando o real impacto destas variáveis na resistência última dessas peças.

Tal desempenho pode ser confirmado, comparando o grupo de peças apresentadas por RAHAL e ALREFAEI (2017), as quais apresentam as menores taxas de armadura longitudinal (0,8%) do banco de dados, as mesmas apresentaram desempenho contra a segurança para todos os códigos estudados, o que admite a elevada importância deste parâmetro no dimensionamento dessas peças, independente do teor de AGRC e do código de projeto.

Ao que concerne o desempenho dos métodos das normas, é possível verificar poucas divergências quanto a previsão de carga do mesmos, com exceção do modelo EUROCODE, o qual apresenta uma das vigas mais resistentes ($V_u = 233$ kN) de forma insegura, isso se deve ao modelo ser o único a levar em consideração a influência da armadura de flexão, e consequentemente superestimar a resistência da viga em questão.

4.2.1.2. Para vigas sem armadura transversal

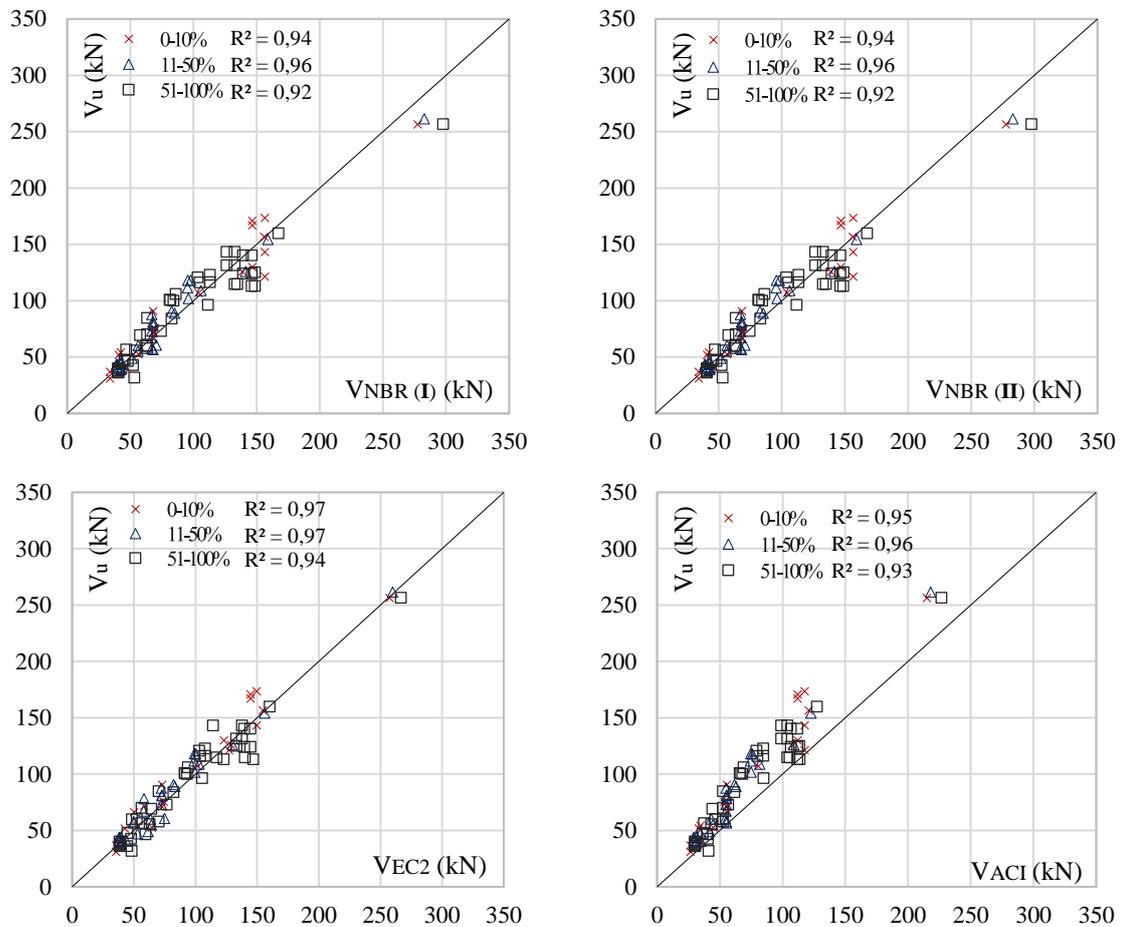


Figura 4.16 - Relação $V_{uexp} - V_{uteo}$.

A Figura 4.16 apresenta a performance dos modelos normativos, a qual demonstrou grande semelhança para os modelos NBR_I e NBR_{II} e EUROCODE, os quais apresentaram uma quantidade equilibrada de resultados contra a segurança e resultados a favor. Comenta-se que essas equações dos quatro códigos representam adequadamente os resultados, uma vez que o coeficiente de determinação registrou $R^2 \in [0,91-0,97]$. Nessa abordagem, diferente das recomendações citadas, o modelo proposto pelo ACI mostrou a maior parte dos espécimes em condições favoráveis à segurança, $\frac{V_u}{V_{teo}} \geq 1$., independente do teor de AGRC.

4.2.2. Substituição de Agregado Reciclado (ARC)

4.2.2.1. Para vigas com armadura transversal

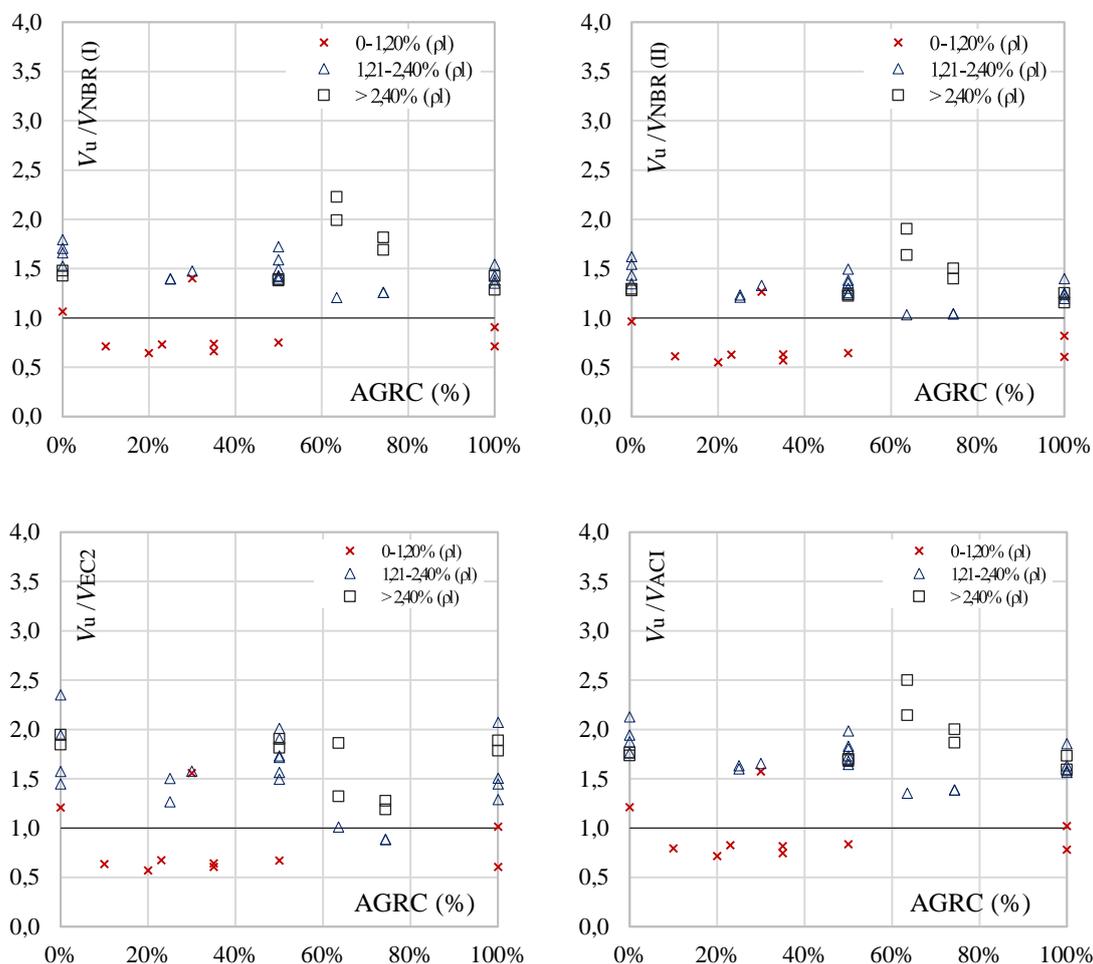


Figura 4.17 - V_u/V_{te0} x AGRC (%) – Com estribos.

A Figura 4.17 demonstra que não houve mudança de comportamento dos dados no que concerne a concentração de AGRC, apesar de não apresentarem grande modificação entre as peças de 0% a 100% de ARC, é necessária uma análise mais aprofundada em relação aos outros parâmetros que regem a ruína por cisalhamento dessas peças, como exemplo, as taxas de armadura de flexão, que possuem papel fundamental através do efeito pino.

Por esta razão, através da separação dos espécimes em três faixas diferentes de ρ_l (%), é possível observar que independente do teor de agregado reciclado, tal parâmetro tem grande influência na contribuição de resistência ao cisalhamento dessas peças. Onde pode ser

observado o desempenho seguro para peças com $\rho_1 \geq 1,21\%$, para os modelos NBR_I e NBR_{II} e ACI.

Além disso, é possível notar que as peças com resultados mais conservadoras são as que possuem maior taxa de armadura de flexão, para os mesmos códigos, independente do teor de AGRC. Para o modelo EUROCODE é observada a diminuição do grau de conservadorismo das vigas com maiores taxas de armadura. Neste sentido, os espécimes compreendidos no intervalo com menores taxas de ρ_1 (%) demonstraram desempenhos contra a segurança para quase todas as vigas, independente do percentual de AR e do modelo de cálculo.

4.2.2.2. Vigas sem armadura transversal

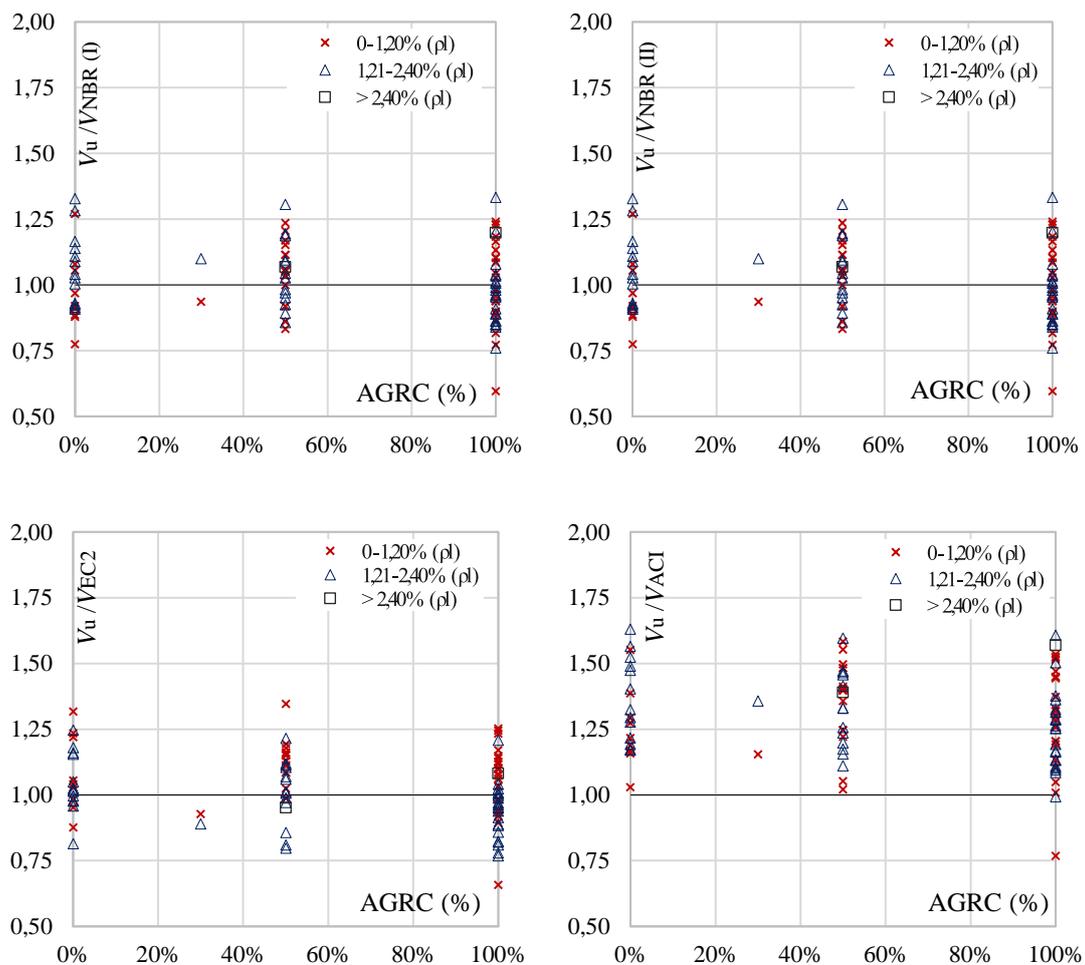


Figura 4.18 - V_u/V_{te0} x AGRC (%) – Sem estribos.

Para os espécimes sem armadura de cisalhamento houve um comportamento diferente ao das vigas com estribo, como mostra a Figura 4.18, exibindo desempenho menos dispersos para as relações V_u/V_{teo} , e demonstrando novamente um desempenho semelhante entre peças com diferentes percentuais de AGRC e definidas no mesmo intervalo de ρ_1 (%), evidenciando o pequeno impacto causado pelo AGRC.

4.2.3. Taxa de armadura longitudinal

4.2.3.1. Para vigas com armadura transversal

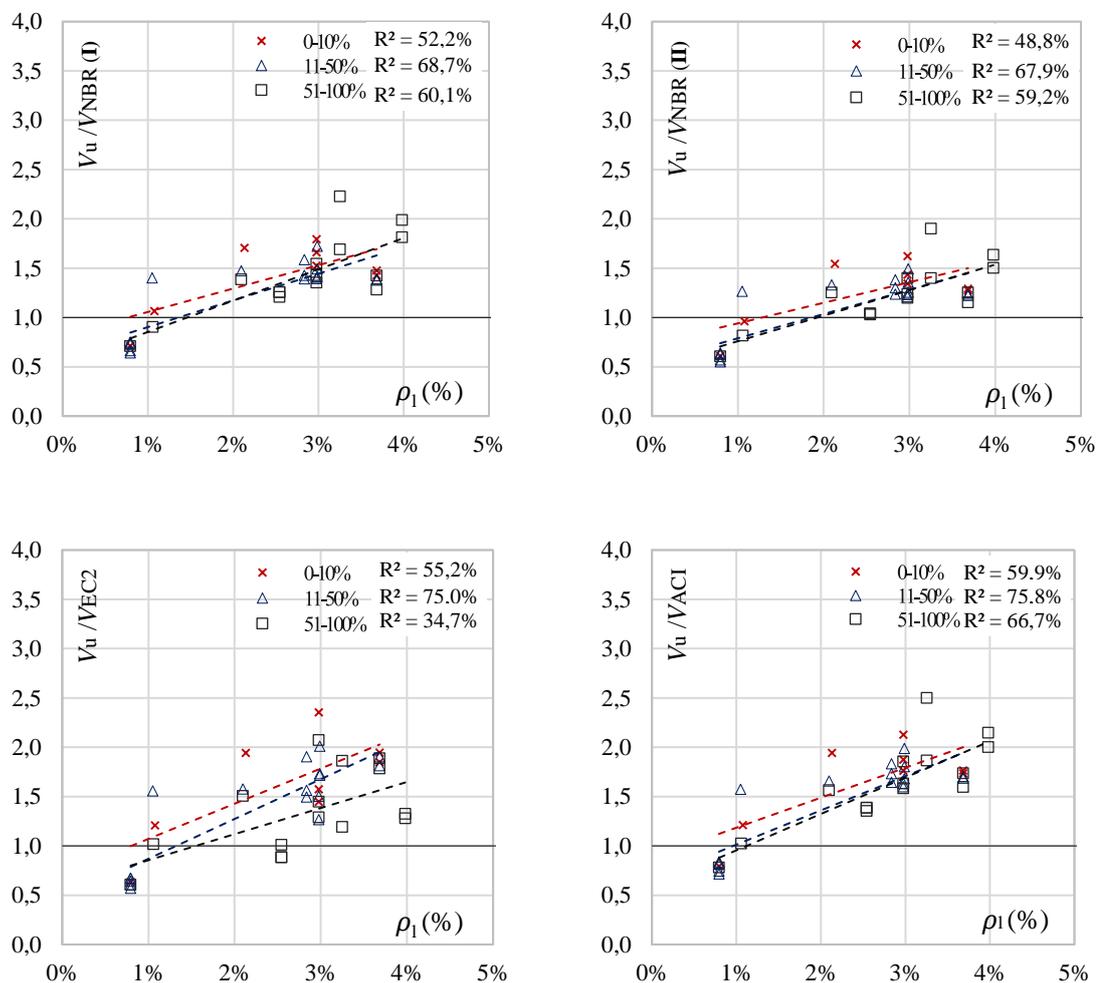


Figura 4.19 - V_u/V_{teo} x ρ_1 (%) – Com estribos.

Conforme a figura 4.19, a taxa de armadura longitudinal influenciou significativamente no desempenho das vigas deste banco de dados. Percebe-se que independente das normas que

foram utilizadas, os espécimes possuem uma relação V_u/V_{te0} crescente com o aumento da taxa de armadura longitudinal.

Dessa forma, é possível concluir que a substituição de AGRC afetou a estimativa da componente das armaduras transversais (V_s). Os resultados mostram que os menores valores de resistência à cisalhamento em vigas de AGRC são recorrentes em vigas com menores taxas de ρ_1 (%). Este aumento nas tensões não é contabilizado na equação simplificada do ACI, e ajuda o modelo a ser um dos mais conservadores independente do teor de AGRC.

4.2.3.2. Para vigas sem armadura transversal

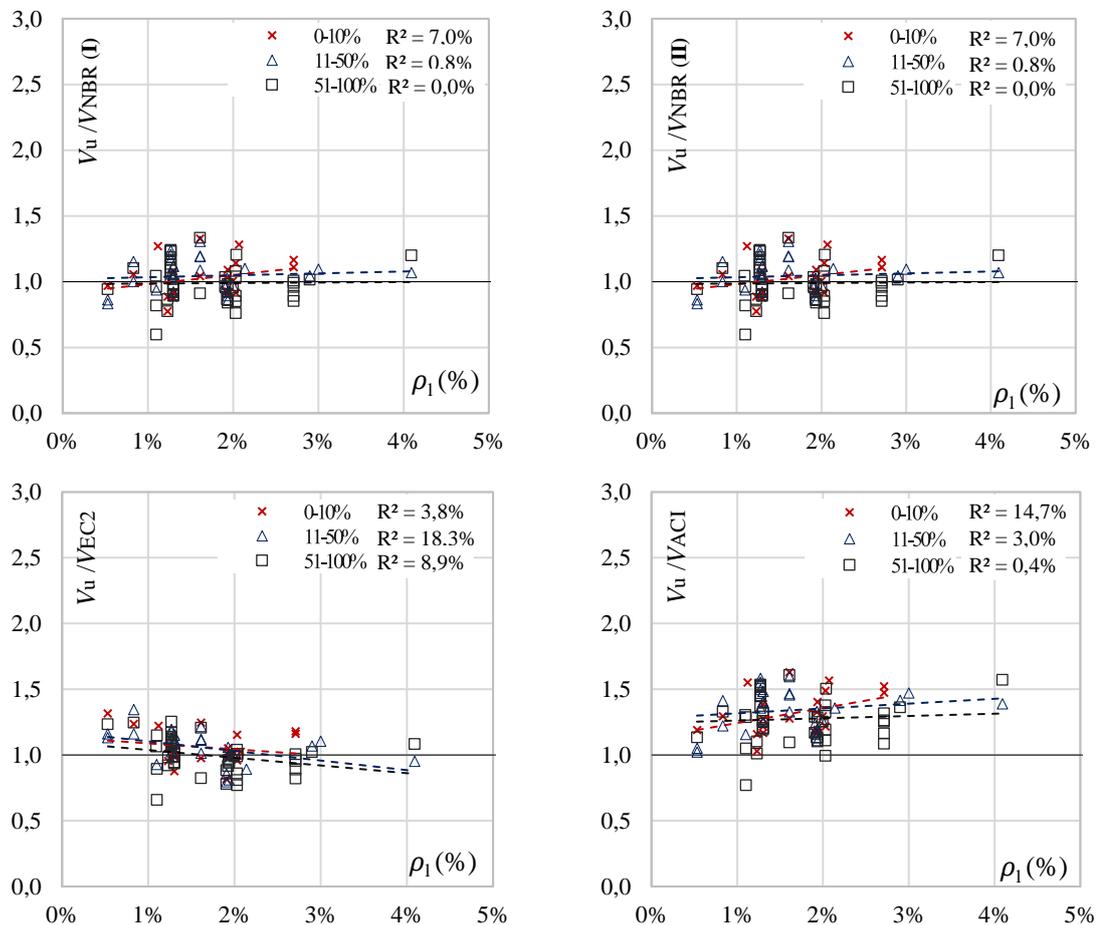


Figura 4.20 - $V_u/V_{te0} \times \rho_1$ (%) – Sem estribos.

Em relação as vigas sem armadura de cisalhamento, as mesmas apresentaram valores de V_u/V_{te0} com diferenças mais limitadas - ao passo em que se adiciona armadura de flexão - em comparação aos espécimes com armadura transversal, como mostra a Figura 4.20.

Caracterizando pouca influência do AGRC na componente do efeito pino transferida pela armadura de flexão. Para o ACI a parcela de contribuição do concreto é bem menor em relação aos outros modelos, por este motivo, o ACI apresenta resultados mais conservadores.

4.2.4. Taxa de armadura transversal

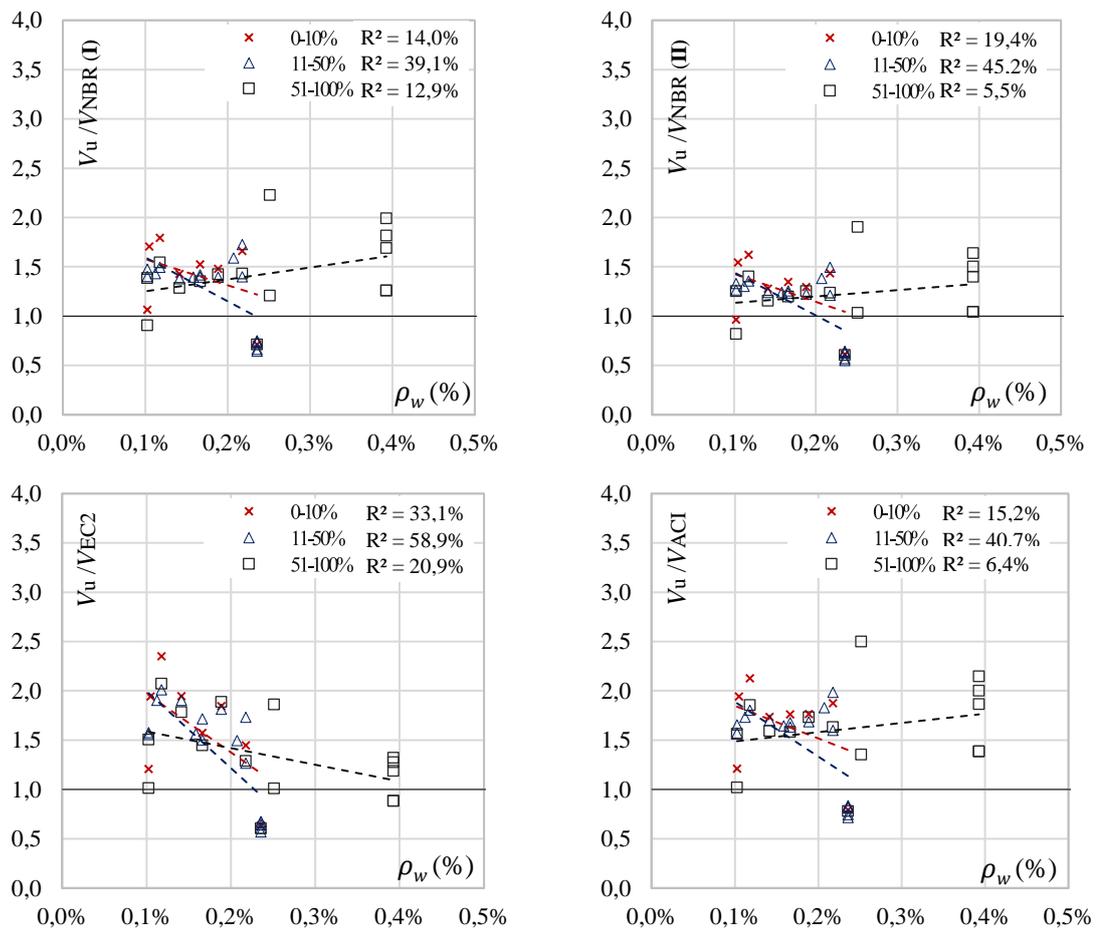


Figura 4.21- V_u/V_{te0} x ρ_w (%).

Conforme a Figura 4.21, apresenta o desempenho das resistências das vigas não demonstra certa linearidade quando relacionadas com a variação da armadura transversal, o que aponta a influência de outros parâmetros. Contudo, pode-se observar que o modelo EUROCODE apresenta desempenho menos conservadores para os espécimes com maiores taxas de $\rho_w > 3,0\%$, o que é justificado pelo fato destes espécimes apresentarem também taxas de ρ_l definidas em [2,5%-4,0%], variável a qual é considerada neste modelo, e acarreta em relações V_u/V_{te0} menores, comparadas aos dos outros modelos de cálculo.

4.2.5. Análise dos códigos de projeto

Nesta seção será executada a análise das performances dos códigos utilizados nesta pesquisa. No que diz respeito à segurança, as normas serão avaliadas segundo o *DPC (Demerit Points Classification)*, proposto por COLLINS (2011), ver Tabela 4.4 – Classificação por meio da relação V_u/V_{teo} , segundo COLLINS (2011).. Além disso, posteriormente serão feitas análises em função das bases estatísticas.

Tabela 4.4 – Classificação por meio da relação V_u/V_{teo} , segundo COLLINS (2011).

V_u/V_{teo}	Pontuação	Classificação
$< 0,50$	10	Extremamente perigosa
$[0,50 - 0,65[$	5	Perigosa
$[0,65 - 0,85[$	2	Baixa Segurança
$[0,85 - 1,30[$	0	Segurança Adequada
$[1,30 - 2,00[$	1	Conservadora
$\geq 2,00$	2	Extremamente conservadora

O desempenho dos modelos normativos foi analisado por meio do número de espécimes correspondentes em cada intervalo estipulado na análise de COLLINS (2011). Para vigas com estribo, os modelos NBR_I, EUROCODE e ACI, apresentaram respectivamente 65%, 52% e 67% dos resultados na faixa de classificação *conservadora*, o código NBR_{II} 45% dos resultados em condição de *segurança adequada* e 35% se apresentaram na classe *conservadora*.

Apesar dos códigos apresentarem a maior parte dos resultados nos intervalos de *segurança adequada* e na classe *conservadora* para todas as normas, os modelos NBR_{II} e EUROCODE aparecem com a maior pontuação nos critérios de classificação de COLLINS, o que é justificado pela maior concentração de resultados na classe *perigosa*. A norma NBR_I apresentou o melhor desempenho, haja vista que 80% de seus resultados ficaram divididos nas classes de *segurança adequada* e *conservadora*. Para o código ACI, apesar do mesmo ter apresentado maior percentual de vigas em condição *conservadora*, este apresentou maior percentual de resultados de *baixa segurança* e *extremamente conservadores*, cabendo assim a maior penalidade segundo o critério de COLLINS.

Tabela 4.5 – Penalidades segundo COLLINS, vigas com armadura transversal.

Vigas com estribo												
λ	NBR 6118 (I)			NBR 6118 (II)			EUROCODE			ACI		
	AGRC (%)											
	0-10	11-50	>50	0-10	11-50	>50	0-10	11-50	>50	0-10	11-50	>50
< 0,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,50 --- 0,65	0	1	0	1	4	2	1	3	1	0	0	0
0,65 --- 0,85	1	3	2	0	0	1	0	1	1	1	4	2
0,85 --- 1,30	1	0	5	3	3	12	1	1	7	1	0	1
1,30 --- 2,00	6	4	16	4	1	9	5	3	13	5	4	18
$\geq 2,00$	0	0	1	0	0	0	1	0	2	1	0	3
Pontuação	8	15	22	9	21	21	12	20	24	9	12	28
Total	45			51			56			49		

No que concerne aos espécimes sem estribos, como mostra a tabela 4.6, é possível observar um comportamento diferente da análise da tabela 4.5. A pequena penalidade dos modelos NBR_I, NBR_{II} e EUROCODE, os quais apresentam 89% dos resultados em condição de *segurança apropriada*, refletem o grande impacto na previsão de carga que a utilização da armadura transversal causa.

Quanto à penalidade sofrida pelos modelos, os três modelos em condições de penalidades quase que idênticas, com divergência de apenas 1 ponto entre os modelos brasileiros e o europeu. Para o código ACI, 99% dos resultados são apresentados como *conservadores* e *extremamente conservadores*, acarretando na maior penalidade para o modelo.

Tabela 4.6 - Penalidades segundo COLLINS, vigas sem armadura transversal.

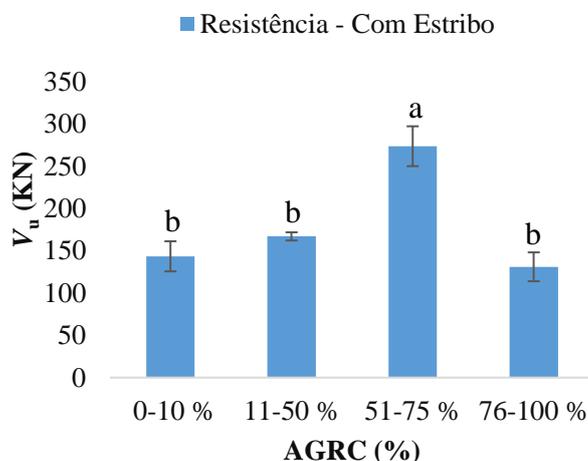
Vigas sem estribo												
λ	NBR 6118 (I)			NBR 6118 (II)			EUROCODE			ACI		
	AGRC (%)											
	0-10	11-50	>50	0-10	11-50	>50	0-10	11-50	>50	0-10	11-50	>50
< 0,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,50 --- 0,65	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0,65 --- 0,85	1	1	5	1	1	5	1	2	6	0	0	1
0,85 --- 1,30	20	30	39	20	30	39	20	29	40	13	12	25
1,30 --- 2,00	1	1	1	1	1	1	1	1	0	9	20	20
$\geq 2,00$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pontuação	3	3	16	3	3	16	3	5	12	9	20	22
Total	22			22			20			51		

4.2.6. ANOVA e teste de Tukey

4.2.6.1. Banco de dados

De acordo com as análises estatísticas realizadas com os dados obtidos através do banco de dados, a Figura 4.22 apresenta a comparação entre as médias e seus respectivos valores de erro padrão, de acordo com as resistências das vigas de concreto com AGRC.

Desta forma, é possível afirmar estatisticamente que as peças com armadura transversal, com teores de AGRC definidas no intervalo [51%-75%] apresentaram diferenças significativas das outras taxas de substituição definidas no gráfico. Ressalta-se que tal variação pode ser justificada por influência de outras variáveis. Essa divergência é constatada com a variação de ρ_l e ρ_w , onde é verificado os maiores valores de ρ_w [0,3% - 0,4%] e ρ_l [2,5% - 4,0%] para essa faixa percentual de AGRC, conseqüentemente contribuindo para aumento de resistência através do efeito pino e da parcela V_s na resistência ao cisalhamento das peças.

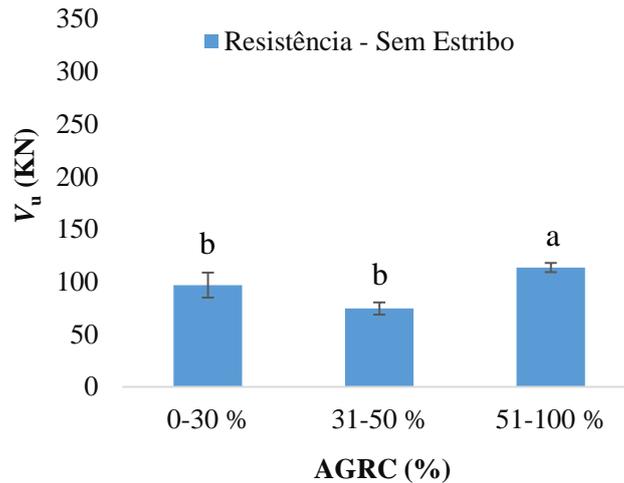


Nota: médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de tukey ($p > 0,05$);

Figura 4.22 – Resistências das vigas com armadura transversal e diferentes concentrações de AGRC (%)

Diferente dos espécimes com estribo, as vigas sem armadura transversal apresentaram um comportamento diferenciado. Conforme a Figura 4.23 as vigas com teores no intervalo de [51% - 100%] tiveram diferenças significativas de resistência quando comparadas com os

outros dois intervalos. No entanto, tal divergência de resistência das peças pode ser justificada por conta da maior quantidade de vigas com maiores taxas de ρ_1 (2,0; 2,7; 2,9 e 4,1) o que influenciou diretamente no aumento de resistência através do efeito pino, e consequentemente apresentou diferença significativa deste intervalo. Realçando mais uma vez o baixo impacto gerado pelo agregado reciclado na resistência dessas peças e exclamando o efeito da armadura de flexão.



Nota: médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de tukey ($p > 0,05$);

Figura 4.23 – Resistências das vigas sem armadura transversal e diferentes concentrações de AGRC (%)

A análise do gráfico *box-whiskers* dos espécimes sem armadura transversal, ver FIGURA 4.24a mostra que as propostas NBR I, NBR II, EUROCODE e ACI registraram $Q_2 \in [0,85-1,30[$, classe *segurança apropriada*, segundo COLLINS. Os quartis são apresentados como: primeiro quartil (Q_1), que corresponde ao limite inferior; segundo quartil (Q_2), mediana ou segundo quartil; terceiro quartil (Q_3), que corresponde ao limite superior e os valores máximo (*MAX*) e mínimo (*MIN*).

Nesse contexto, os quartis Q_1 e Q_3 apontam os resultados favoráveis de ACI, com $[Q_1- Q_3] \in [1,15-2,0[$. Nessa análise, os demais modelos mostram bom desempenho, pois $[Q_1- Q_3] \in [0,85-1,30[$, *segurança apropriada*, ver tabela 4.7 e 4.8.

Quanto aos valores máximos e mínimos, todas as normas apresentam $MIN > 0,5$, NBR I e NBR II com classificação *perigosa*, e o modelos EUROCODE e ACI com *baixa segurança*. Entretanto, todas as normas apresentam $MAX \geq 1,3$, classe *conservadora*.

No que se refere aos espécimes com armadura de cisalhamento é possível observar que com exceção do código NBR II, onde $Q_2 \in [0,85 - 1,30[$, classe de *segurança apropriada*, todos os códigos registraram $Q_2 \in [1,30-2,0[$, classe *conservadora*. Para NBR I, NBR II e EUROCODE, os quartis Q_1 e Q_3 apontam resultados seguros, com $Q_1 \in [0,85-1,30[$, classe de *segurança apropriada*, e $Q_3 \in [1,30-2,0[$, classe *conservadora*, o código ACI é o único com Q_1 na classe *conservadora*. Quanto aos valores máximos e mínimos, todas as normas apresentam $MIN > 0,5$, classe *perigosa*. Entretanto, o modelo NBR II apresentou $MAX \geq 1,8$, classe *conservadora*, em relação aos modelos NBR I, EUROCODE e ACI, os mesmos apresentam $MAX \geq 2,0$, classe *extremamente conservadora*. O resumo dos quartis é apresentado nas Tabelas 4.7 e 4.8.

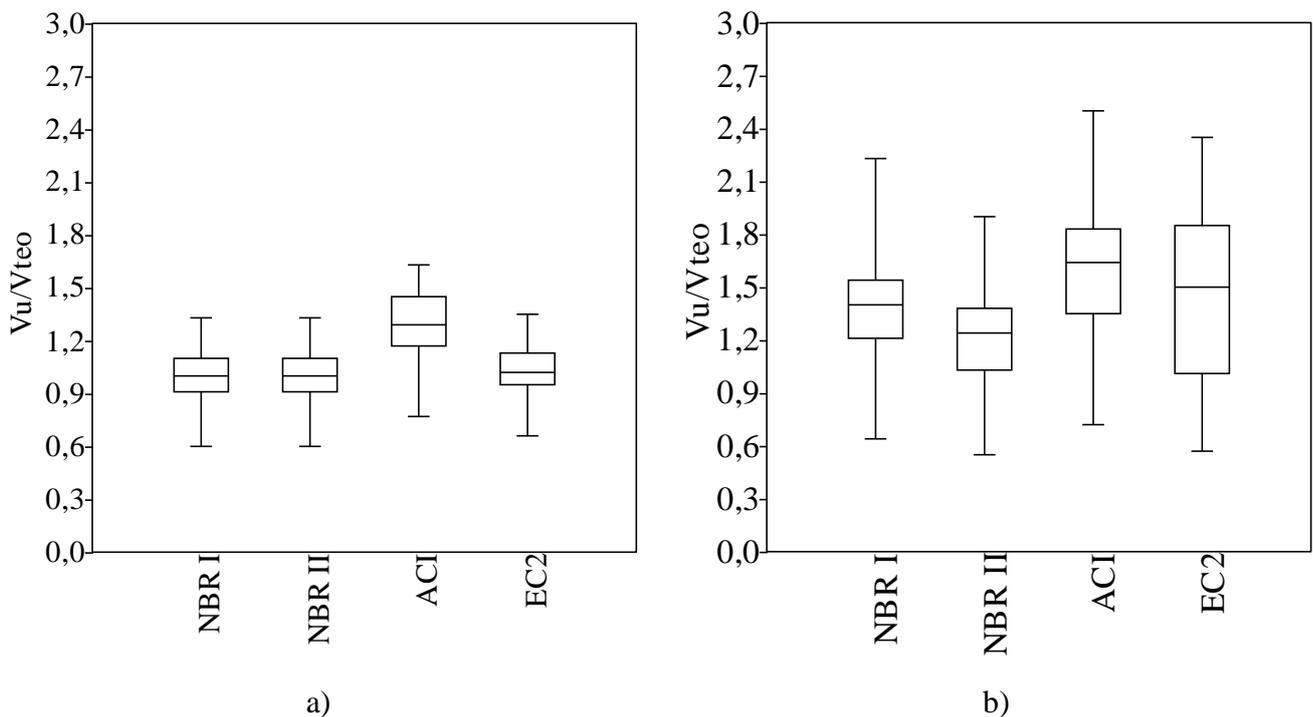


Figura 4.24 – Box-whiskers, a) Sem armadura transversal; b) com armadura transversal.

Tabela 4.7- Resumo do gráfico *Box-whiskers* a)

Sem Armadura transversal					
<i>Normas</i>	<i>MÍN</i>	<i>Q1</i>	<i>Q2</i>	<i>Q3</i>	<i>MÁX</i>
NBR I	0,60	0,91	1,00	1,11	1,81
NBR II	0,60	0,91	1,00	1,11	1,81
ACI	0,77	1,19	1,29	1,45	2,38
EC2	0,66	0,95	1,02	1,13	1,64

Tabela 4.8 - Resumo do gráfico *Box-whiskers* b)

Com Armadura Transversal					
<i>Normas</i>	<i>MÍN</i>	<i>Q1</i>	<i>Q2</i>	<i>Q3</i>	<i>MÁX</i>
NBR I	0,64	1,24	1,40	1,53	2,23
NBR II	0,55	1,04	1,24	1,36	1,90
ACI	0,72	1,38	1,65	1,81	2,50
EC2	0,57	1,01	1,50	1,82	2,35

5. CONCLUSÕES

As conclusões apresentadas a seguir foram baseadas nos resultados obtidos no programa experimental conduzido neste trabalho e análise de um banco de dados de 170 vigas. Foram ensaiados 12 com utilização ou não de armadura transversal, diferentes taxas de armadura longitudinal, e diferentes teores de substituição de 0%, 30% e 100% de AGRC.

No que concerne as propriedades mecânicas do concreto utilizado, foi observada uma redução mais significativa do módulo de elasticidade e resistência à tração para taxas de AGRC de 100%, exibindo 19% e 15% de diminuição, respectivamente, quando comparadas a concretos com NA. Para resistência à compressão axial (f_c) não foram observadas diferenças expressivas entre os concretos com AR e AN.

As diferenças no comportamento de vigas feitas de agregado natural, parcialmente reciclado e totalmente reciclado, foram relativamente pequenas dentro de uma série particular, no que diz respeito ao modo de ruptura de peças sem armadura transversal. Ao que se refere às vigas com estribos, a diminuição dos deslocamentos verticais e das deformações nas armaduras de flexão são mais expressivas para vigas com $\rho_l = 2,13\%$.

No que se refere à superfície de fissura críticas das vigas estudadas, com o aumento do teor de AGRC, foi verificada a redução na rugosidade, o que conseqüentemente diminui a parcela de transferência de esforço produzida pelo engrenamento dos agregados, ocasionando impacto na previsão da parcela V_c . Além dos parâmetros citados acima, a variação nos valores de resistência se deu de forma mais variável para espécimes com armadura de cisalhamento, demonstrando impacto maior do AGRC na parcela de contribuição dessas armaduras (V_s) na previsão de resistência ao cisalhamento.

Tal desempenho é confirmado através da análise do banco de dados, onde o desempenho dos códigos estudados é avaliado através do *DPC*, que demonstra para as peças com estribos que o ACI foi considerado o modelo mais conservador, o que pode ser explicado pelas formulações mais simplificadas. Apesar dos códigos apresentarem a maior parte dos resultados nos intervalos de *segurança apropriada* e na classe *conservadora* para todas as normas, os modelos NBRII e EUROCODE aparecem com a maior pontuação nos critérios

de classificação de COLLINS, o que é justificado pela maior concentração de resultados na classe *perigosa*. A norma NBR_I apresentou o melhor desempenho, haja vista que 80% de seus resultados ficaram divididos nas classes de *segurança apropriada* e *conservadora*.

Para os espécimes sem estribos, os modelos NBR_I, NBR_{II} e EUROCODE apresentam 89% dos resultados em condição de *segurança apropriada*, refletindo o grande impacto na previsão de carga que a utilização da armadura transversal causa. Quanto à penalidade, os mesmos exibiram os menores valores e quase que idênticos, com divergência de apenas 1 ponto. Para o código ACI, 99% dos resultados são apresentados como *conservadores* e *extremamente conservadores*, acarretando na maior penalidade para o modelo.

Através da análise estatística dos dados foi possível observar diferença significativas em peças com maior quantidade de armaduras transversais e longitudinal, ressaltando o baixo impacto do agregado reciclado na resistência ao cisalhamento dessas peças.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A. BARBUDO, J. DE BRITO, L. EVANGELISTA, M. BRAVO, F. AGRELA, **Influence of waterreducing admixtures on the mechanical performance of recycled concrete**, J. Clean. Prod. 59 (2013) 93–98

ABRECON (**associação brasileira para reciclagem de resíduos da construção civil e demolição**). Relatório pesquisa setorial 2014/2015.

ABRELPE (**Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais**). Panorama de resíduos sólidos no brasil 2016.

ACI 318 (2014). **Building Code Requirements for Structural Concrete**. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.

AJDUKIEWICZ A, KLISZCZEWICZ ALINA. **Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC**. Cement Concrete Composites 2002;24:269–79.

AKBARNEZHAD AND K. C. G. ONG. **Separation processes to improve the quality of recycled concrete aggregates (RCA)**. Woodhead Publishing Limited, 2013.

ARTUR KOPERA, WŁODZIMIERZ KOPERA, MARCIN KOPERA. **Influence of raw concrete material quality on selected properties of recycled concrete aggregates**. Procedia Engineering 172 (2017).

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS (2014). NBR 6118 - **Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro.

BAIRAGI NK, KISHORE R, PAREEK VK. **Behaviour of concrete with diferente proportions of natural and recycled aggregates**. Resour Conserv Recycle 1993;9(1–2):109–26.

BELE'N GONZA'LEZ-FONTEBOA, FERNANDO MARTI'NEZ-ABELLA. **Shear strength of recycled concrete beams**. Construction and Building Materials 21 (2007).

Best practice guide for the use of “recycled aggregates in new concrete”. Technical report TR 14, Cement & Concrete Association of New Zealand (CCANZ); October 2011.

BUCK, A. D. (1977). **Recycled concrete as a source of aggregate**. ACI Journal, 74, 212–219.

BUTLER L, WEST JS, TIGHE SL. **Effect of recycled concrete coarse aggregate from multiple sources on the hardened properties of concrete with equivalent compressive strength**. Constr Build Mater 2013;47:1292–301.

CASUCCIO M, TORRIJOS MC, GIACCIO G, ZERBINO R. **Failure mechanism of recycled aggregate concrete**. Constr Build Mater 2008;22:1500–6.

CERVENKA, V., CERVENKA, J., PUKL, R. **Design Resistance of Concrete Structures by Numerical Simulation**. 8^a international conference wcm 2014, June 2014.

CHANG SUN, DAVID A. LANGE, JIANZHUANG XIAO, TAO DING. **Contact behavior between cracked surfaces of recycled aggregate concrete**. Construction and Building Materials, Volume 155, 30 November 2017, Pages 1168-1178.

CORINALDESI V. **Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates**. Constr Build Mater 2010;24:1616–20.

C. MARTHONG, A.S.SANGMA, S.A.CHOUDHURY, N. PYRBOTS, L. TRONL. MAWROHG. S. BHARTI, **Structural behavior of recycled aggregate concrete beam-column connection in presence of micro concrete at joint region, structures Vol 11, August 2017, pages 243-251**.

C. PELLEGRINO, F. FALESCHINI. **Workability and rheology of fresh recycled aggregate concrete, in: Sustainability Improvements in the Concrete Industry: Use of**

Recycled Materials for Structural Concrete Production. Springer, Green Energy and Technology (2016).

MONALISA BEHERA, S.K. BHATTACHARYYA, A.K. MINOCHA, R. DEOLIYA, S. MAITI. **Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review.** Construction and Building materials 68 (2014).

D. DARWIN, S. BARHAM, R. KOZUL, S. LUAN, **Fracture energy of high-strength concrete,**ACI Materials Journal 98 (5) (2001) 410–417.

ELHEM GHORBEL, GEORGE WARDEH. **Influence of recycled coarse aggregates incorporation on the fracture properties of concrete.** Construction and Building Materials 154 (2017)

ETXEBERRIA M, VAZQUEZ E, MARI A, BARRA M. **Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete.** Cem Concr Res 2007;37(5):735–42.

EUROCODE2 (2004). **Design of Concrete Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings.** European Standard, 2004.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION RESEARCH AND TECHNOLOGY, **Post-Earthquake Reconnaissance Report on Transportation Infrastructure: Impact of the February 27, 2010, Offshore Maule Earthquake in Chile.** March 2011.

FISKER, J.; HAGSTEN, L.G. (2016). **Mechanical Model for the Shear Capacity of R/C Beams without Stirrups: A proposal Based on Limit Analysis.** Engineering Structures. Vol. 115, pp. 220-231

GOMES, M., DE BRITO, J.. **Structural concrete with incorporation of coarse recycled concrete and ceramic aggregates: durability performance.** Materials and. Structures. 42, 663 e 675, 2009.

G. WARDEH, E. GHORBEL, **Eurocode 2: application to recycled aggregate concretes, in: 31st Meeting of AUGC, E.N.S. Cachan, 29 au 31 may 2013 (In French).**

HANSEN TC, NARUD H. **Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate.** *Concr Int – Des Constr* 1983;5(1):79–83.

HANSEN TC. **Recycled aggregate and recycled aggregate concrete, second state-of-the-art report, developments from 1945–1985.** *Mater Struct* 1986;19(3):201–46.

HASAN KATKHUDA A, NASIM SHATARAT B. **Shear behavior of reinforced concrete beams using treated recycled concrete aggregate.** *Construction and Building Materials* 125 (2016).

IRIS GONZALEZ-TABOADA, GONZALEZ-FONTEBOA, JAVIER EIRAS-LOPEZ, GEMMA ROJO-LOPEZ. **StudentTools for the study of self-compacting recycled concrete fresh behaviour: Workability and rheology** (2017)

IVAN S. IGNJATOVIC, SNEŽANA B. MARINKOVIC, NIKOLA TOŠIĆ. **Shear behaviour of recycled aggregate concrete beams with and without shear reinforcement.** *Engineering Structures* 141 (2017).

J. ZUO, D. DARWIN, **Splice strength of conventional and high relative rib area bars in normal and high-strength concrete, ACI.** *Structural Journal* 97 (4) (2000) 630–641.

KATRINA MCNEIL AND THOMAS H.-K. KANG. **Recycled Concrete Aggregates: A Review.** *International Journal of Concrete Structures and Materials* Vol.7, No.1, pp.61–69, March 2013.

KHALDOUN RAHAL. **Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate.** *Building and Environment* 42 (2007).

K.N. RAHAL , Y.T. ALREFAEI. **Shear strength of longitudinally reinforced recycled aggregate concrete beams.** *Engineering Structures* 145 (2017).

KOICHI MAEKAWA, XUEHUI NA. **Shear failure and ductility of RC columns after yielding of main reinforcement.** Engineering Fracture Mechanics 65 (2000) 335±368.

KOU S, POON C. **Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates.** Cement Concrete Compos 2009;31:622–7

LI JB. **Study on mechanical behavior of recycled aggregate concrete, Dissertation of Masteral Degree.** Shanghai: Tongji University; 2004.

LIMBACHIYA M, MEDDAH MS, OUCHAGOUR Y. **Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete.** Constr Build Mater 2012;27:439–49.

MACGREGOR, J.G.; WIGHT, J.K. **Reinforced concrete – Mechanics and design.** 4a ed., Upper Saddle River, Ed. Prentice Hall, 1132p. 2012.

MATIAS D, DE BRITO J, ROSA A, PEDRO D. **mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates – influence of the use os superplasticizers.** Conster buildmateer 2013.

MEHTA PK, MONTERIO PJM. **Concrete (structure, properties and materials).** Englewood Cliffs (NJ): Prentice-Hall; 1986. p. 37–42

MIRJANA MALEŠEV, VLASTIMIR RADONJANIN AND SNEŽANA MARINKOVIĆ. **Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production. Sustainability** 2010, 2, 1204-1225

M.J. MCGINNIS, M. DAVIS, A. DE LA ROSA, B.D. WELDON, Y.C. KURAMA, **Quantified Sustainability of Recycled Concrete Aggregates, Mag. Concr. Res.** (2017) (in press).

MODEL CODE 2010. **CEB-FIP model code 2010 e final draft. Lausanne, Switzerland: Thomas Thelford; 2011.**

OLIVEIRA M, BARRA DE, VAZQUEZ E. **The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete.** Waste Manage 1996; 16:113–7.

OLONGO FT, PADAYACHEE N. **Performance of recycled aggregate Concrete monitored by durability indexes.** Cem Concr Res 2002;32:179-85.

PINTO, T.P (1999). **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana.** São Paulo 189p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

QIANG HAN, YU-LONG, ZHOU, ZI-LAN, ZHONG, XIU-LI DU. **Seismic Capacity Evaluation of Exterior Shear Keys of Highway Bridges,** J. Bridge Eng., 2017, 22(2): 04016119.

RAO A. **Experimental Investigation on Use of Recycled Aggregates in Mortar and Concrete.** Thesis submitted to the Department of Civil Engineering, Indian Institute of Technology Kanpur; 2005.

RAO MC, BHATTACHARYYA SK, BARAI SV. **Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete.** Mater Struct 2011;44:205–20

R.V. SILVA, J. DE BRITO, R.K. DHIR, **Tensile strength behaviour of recycled aggregate concrete,** Construction and Building Materials. 83 (2015) 108–118.

SAFIULLAH OMARY, ELHEM GHORBEL, GEORGE WARDEH. **Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties.** Construction and Building Materials 108 (2016).

SAMI W. TABSH , AKMAL S. ABDELFAHAH. **Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete.** Construction and Building Materials 23 (2009).

SANTOS, I.L.; SALGADO NETO, F.S.; MARTINS, L.H.S.; CORDEIRO, L.N.P. **Dosagem de Concretos Produzidos com Agregado Graúdo Reciclado de Concreto.** In: 57CBC, 2015, Bonito. 57 Congresso Brasileiro de Concreto, 201.

SATO R, MARUYAMA I, SOGABE T, SOGO M. **Flexural behavior of reinforced recycled concrete beams.** J Adv Concr Technol 2007;5(1):43–61.

SHAKEEL AHMAD WASEEM M.TECH. **Shear transfer strength of normal and high-strength recycled aggregate concrete – An experimental investigation.** Construction and Building Materials 125 (2016).

XIAO JZ, LI W, FAN Y, HUANG X. **An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996–2011).** Constr Build Mater 2012;31:364–83.

YANAGIBASHI K, INOUE K, SEKO S, TSUJI D. **A study on cyclic use of aggregate for structural concrete. SB05 Tokyo: Action for sustainability – The 2005 world sustainable building conference.** Tokyo, Japan; 27–29 September. 2005: 2585–2592.

WEI-LUN WANG, SHI-CONG KOU, FENG XING. **Deformation properties and direct shear of medium strength concrete prepared with 100% recycled coarse aggregates.** Construction and Building Materials 48 (2013)

W.H. LANGER, L.J. DREW, J.J. SACHS, **Aggregate and the Environment, Alexandria, VA, 2004.** p. 64.

WOJCIECH KUBISSAA, ROMAN JASKULSKIA, ARTUR KOPERA, JACEK SZPETULSKIA. **Properties of concretes with natural aggregate improved by RCA addition.** Procedia Engineering 108 (2015).

ANEXO A – BANCO DE DADOS

Tabela A 1 - Apresentação do BD (com armadura transversal)

ENTRADA BANCO DE DADOS																					
Autor	Viga	RCA (%)	bw (mm)	d (mm)	d' (mm)	a (mm)	a/d	As (mm ²)	Φ _w (mm)	nΦ _w	Asw (mm ²)	s (mm)	α (°)	ρ _l	ρ _w	V _u (kN)	V _{flex} (kN)	f _{ck} (MPa)	f _c (MPa)	f _{yw} (MPa)	f _{ywk} (MPa)
LARRAÑAGA (2004)	HC-2	0%	200	304	46	1000	3,29	1810	6	2	56,5	130	90	3,0%	0,2%	213,0	214,4	32	36	544	495
	HC-3	0%	200	304	46	1000	3,29	1810	6	2	56,5	170	90	3,0%	0,2%	177,0	214,4	32	36	544	495
	HC-4	0%	200	304	46	1000	3,29	1810	6	2	56,5	240	90	3,0%	0,1%	187,5	214,4	32	36	544	495
CARDOSO (2018)	VAW0	0%	180	254	26,2	620	2,44	491	4,2	2	27,7	150	90	1,1%	0,1%	68,9	97,7	23	27	610	554
	VBW0	0%	180	255	34,2	620	2,52	942	4,2	2	27,7	150	90	2,1%	0,1%	111,0	166,1	23	27	610	554
IGNJATOVIC' et al. (2017)	NAC-2	0%	200	261	39	1000	3,83	1923	6	2	56,5	200	90	3,7%	0,1%	140,7	214,2	35	39	430	391
	NAC-3	0%	200	261	39	1000	3,83	1923	6	2	56,5	150	90	3,7%	0,2%	159,9	214,2	35	39	430	391
RAHAL, ALREFAEI (2017)	35-A-0-10	10%	150	388	32	1162	2,99	462	6	2	56,5	160	90	0,8%	0,2%	89,0	94,0	30	34	500	455
	35-A-0-20	20%	150	388	32	1162	2,99	462	6	2	56,5	160	90	0,8%	0,2%	80,1	93,9	30	34	500	455
	35-S-0-23(50)	23%	150	388	32	1162	2,99	462	6	2	56,5	160	90	0,8%	0,2%	94,5	94,6	33	37	500	455
LARRAÑAGA (2004)	HR25-2	25%	200	304	46	1000	3,29	1810	6	2	56,5	130	90	3,0%	0,2%	186,5	219,5	35	39	544	495
	HR25-3	25%	200	304	46	1000	3,29	1810	6	2	56,5	170	90	3,0%	0,2%	169,0	219,5	35	39	544	495
CARDOSO (2018)	VAW30	30%	180	260	20	620	2,38	491	4,2	2	27,7	150	90	1,0%	0,1%	89,0	99,4	21	25	610	554
	VBW30	30%	180	250	30	620	2,48	942	4,2	2	27,7	150	90	2,1%	0,1%	90,1	158,1	21	25	610	554
RAHAL, ALREFAEI (2017)	35-A-0-35	35%	150	388	32	1162	2,99	462	6	2	56,5	160	90	0,8%	0,2%	90,1	93,5	29	33	500	455
	35-S-0-35(75)	35%	150	388	32	1162	2,99	462	6	2	56,5	160	90	0,8%	0,2%	85,0	94,5	32	36	500	455
	35-A-0-50	50%	150	388	32	1162	2,99	462	6	2	56,5	160	90	0,8%	0,2%	93,9	94,0	30	34	500	455
FONTEBOA, ABELLA, (2007).	V24RC	50%	200	303	47	1000	3,30	1810	6	2	56,5	240	90	3,0%	0,1%	164,3	241,5	35	39	500	455
	V17RC	50%	200	303	47	1000	3,30	1810	6	2	56,5	170	90	3,0%	0,2%	177,0	245,4	37	41	500	455
	V13RC	50%	200	303	47	1000	3,30	1810	6	2	56,5	130	90	3,0%	0,2%	233,6	243,6	36	40	500	455
LARRAÑAGA (2004)	HR50-2	50%	210	304	46	1000	3,29	1810	6	2	56,5	130	90	2,8%	0,2%	220,0	223,0	35	39	544	495
	HR50-3	50%	210	304	46	1000	3,29	1810	6	2	56,5	170	90	2,8%	0,2%	176,0	223,0	35	39	544	495
	HR50-4	50%	210	304	46	1000	3,29	1810	6	2	56,5	240	90	2,8%	0,1%	164,0	223,0	35	39	544	495
IGNJATOVIC' et al. (2017)	RAC50-2	50%	200	261	39	1000	3,83	1923	6	2	56,5	200	90	3,7%	0,1%	142,0	221,9	38	42	430	391
	RAC50-3	50%	200	261	39	1000	3,83	1923	6	2	56,5	150	90	3,7%	0,2%	156,9	221,9	38	42	430	391

ANEXO A – BANCO DE DADOS

Tabela A 2 - Apresentação do BD (com armadura transversal) Cont.

ENTRADA BANCO DE DADOS																					
Autor	Viga	RCA (%)	bw (mm)	d (mm)	d' (mm)	a (mm)	a/d	As (mm ²)	Φ _w (mm)	nΦ _w	Asw (mm ²)	s (mm)	α (°)	ρ _l	ρ _w	V _u (kN)	V _{flex} (kN)	f _{ck} (MPa)	f _c (MPa)	f _{yw} (MPa)	f _{ywk} (MPa)
FATHIFAZL et al. (2010)	EM-3S-R	64%	200	309	66	800	2,59	1571	8	2	100,5	200	90	2,5%	0,3%	170,0	235,0	33	37	530	482
	EM-6S-R	64%	200	302	83	800	2,65	1963	8	2	100,5	200	90	3,3%	0,3%	306,5	342,1	33	37	530	482
	EM-6S-D	64%	200	301	84	800	2,66	2395	10	2	157,1	200	90	4,0%	0,4%	339,0	374,0	33	37	530	482
	EV-3S-R	74%	200	309	66	800	2,59	1571	10	2	157,1	200	90	2,5%	0,4%	233,0	242,2	40	44	530	482
	EV-3S-R*	74%	200	309	66	800	2,59	1571	10	2	157,1	200	90	2,5%	0,4%	233,0	242,2	40	44	530	482
	EV-6S-R	74%	200	302	83	800	2,65	1963	10	2	157,1	200	90	3,3%	0,4%	306,0	365,4	40	44	530	482
	EV-6S-D	74%	200	301	84	800	2,66	2395	10	2	157,1	200	90	4,0%	0,4%	327,5	408,8	40	44	530	482
RAHAL, ALREFAEI (2017)	35-A-0-100	100%	150	388	32	1162	2,99	462	6	2	56,5	160	90	0,8%	0,2%	85,0	93,1	27	31	500	455
LARRAÑAGA (2004)	HR100-2	100%	200	304	46	1000	3,29	1810	6	2	56,5	130	90	3,0%	0,2%	189,5	218,7	34	38	544	495
	HR100-3	100%	200	304	46	1000	3,29	1810	6	2	56,5	170	90	3,0%	0,2%	163,0	218,7	34	38	544	495
	HR100-4	100%	200	304	46	1000	3,29	1810	6	2	56,5	240	90	3,0%	0,1%	168,0	218,7	34	38	544	495
CARDOSO (2018)	VAW100	100%	180	258	22	620	2,40	491	4,2	2	27,7	150	90	1,1%	0,1%	58,0	99,0	22	26	610	554
	VBW100	100%	180	250	30	620	2,48	942	4,2	2	27,7	150	90	2,1%	0,1%	86,1	159,7	22	26	610	554
IGNJATOVIC' et al. (2017)	RAC100-2	100%	200	261	39	1000	3,83	1923	6	2	56,5	200	90	3,7%	0,1%	135,0	225,4	40	44	430	391
	RAC100-3	100%	200	261	39	1000	3,83	1923	6	2	56,5	150	90	3,7%	0,2%	163,4	225,4	40	44	430	391

ANEXO A – Banco de dados

Tabela A 3- Apresentação do BD (sem armadura transversal)

ENTRADA BANCO DE DADOS													
Autor	Viga	RCA (%)	b_w (mm)	d (mm)	d' (mm)	a (mm)	a/d	A_s (mm ²)	ρ_l	V_u (kN)	V_{flex} (kN)	f_{ck} (MPa)	f_c (MPa)
CHOI, et. al. (2010)	NANAC-L2.5	0%	200	360	40	900	2,5	381,6	0,005	66,15	75,0	20,66	24,66
	NANAC-M2.5	0%	200	360	40	900	2,5	597,6	0,008	72,03	106,2	20,66	24,66
	NANAC-H2.5	0%	200	360	40	900	2,5	1159,2	0,016	90,7	178,3	20,66	24,66
	NANAC-H3.5	0%	200	360	40	1170	3,3	1159,2	0,016	71,05	137,2	20,66	24,66
IGNJATOVIC, (2013).	S0-1a	0%	150	200	50	760	3,8	390,0	0,013	31,1	51,3	27,2	31,2
	S0-1b	0%	150	200	50	760	3,8	390,0	0,013	36,9	51,3	27,2	31,2
	S0-2a	0%	150	200	50	760	3,8	390,0	0,013	40,4	53,8	42,4	46,4
	S0-2b	0%	150	200	50	760	3,8	390,0	0,013	42,3	53,8	42,4	46,4
HASAN KATKHUDA,	NC-3	0%	200	267	33	800	3,0	1017,9	0,019	52,51	130,1	24,3	28,3
AREZOUHANDI, et. AL. (2014)	CC-NS-4.1	0%	300	400	60	1200	3,0	1809,6	0,012	121,2	227,7	33,3	37,3
	CC-NS-4.2	0%	300	400	60	1200	3,0	1809,6	0,012	129,9	225,7	30,2	34,2
	CC-NS-6.1	0%	300	400	60	1200	3,0	1809,6	0,020	143,2	227,7	33,3	37,3
	CC-NS-6.2	0%	300	400	60	1200	3,0	1809,6	0,020	167	225,7	30,2	34,2
	CC-NS-8.1	0%	300	400	60	1200	3,0	1809,6	0,027	173,5	227,7	33,3	37,3
	CC-NS-8.2	0%	300	400	60	1200	3,0	1809,6	0,027	170,8	225,7	30,2	34,2
SANG-WOO KIM, et al. (2013).	NA-S2	0%	200	300	50	750	2,5	1161,3	0,019	75,5	204,1	27,8	31,8
	NA-M2	0%	200	450	80	1125	2,5	1734,3	0,019	106,9	305,1	27,8	31,8
	NA-L2	0%	200	600	80	1500	2,5	2322,6	0,019	125,9	408,2	27,8	31,8
	NA-M3	0%	300	450	80	1125	2,5	2694,4	0,020	156,7	470,5	27,8	31,8
	NA-L4	0%	400	600	80	1500	2,5	4645,2	0,019	256,4	816,4	27,8	31,8
CARDOSO, (2018).	VA0	0%	180	243,7	36,3	620	2,5	490,9	0,011	51,85	91,9	20,09	24,09
	VB0	0%	180	253	27	620	2,5	942,5	0,021	54,33	158,9	20,09	24,09
	VA30	30%	180	248,3	31,7	620	2,5	490,9	0,011	40,53	94,5	21,32	25,32
	VB30	30%	180	245	35	620	2,5	942,5	0,021	46,99	154,8	21,32	25,32
CHOI, et. al. (2010)	RARAC30-L2.5	50%	200	360	40	900	2,5	381,6	0,005	56,7	75,0	20,56	24,56
	RARAC30-M2.5	50%	200	360	40	900	2,5	597,6	0,008	78,4	106,1	20,56	24,56
	RARAC30-H2.5	50%	200	360	40	900	2,5	1159,2	0,016	81,34	178,2	20,56	24,56
	RARAC30-H3.5	50%	200	360	40	1170	3,25	1159,2	0,016	80,85	137,1	20,56	24,56
	RARAC50-L2.5	50%	200	360	40	900	2,5	381,6	0,005	57,82	74,9	20,15	24,15
	RARAC50-M2.5	50%	200	360	40	900	2,5	597,6	0,008	67,13	106,0	20,15	24,15
	RARAC50-H2.5	50%	200	360	40	900	2,5	1159,2	0,016	87,71	177,6	20,15	24,15
	RARAC50-H3.5	50%	200	360	40	1170	3,3	1159,2	0,016	73,04	136,6	20,15	24,15
IGNJATOVIC, (2013).	RAC50-1b	50%	200	235	45	1000	4,3	1922,3	0,041	60,22	160,4	29,4	33,4
KNAACK, KURAMA, M.ASCE, (2014).	S50-1a	50%	150	200	50	760	3,8	390,0	0,013	44	53,2	37,8	41,8
	S50-1b	50%	150	200	50	760	3,8	390,0	0,013	39,1	53,2	37,8	41,8
	S50-2a	50%	150	200	50	760	3,8	390,0	0,013	43,7	52,6	33,4	37,4
	S50-2b	50%	150	200	50	760	3,8	390,0	0,013	41,2	52,6	33,4	37,4
HASAN KATKHUDA, NASIM SHATARAT, (2016).	R50-3	50%	200	267	33	800	3,0	1017,9	0,019	49,07	127,0	21,2	25,2
	T50-3	50%	200	267	33	800	3,0	1017,9	0,019	55,06	129,9	24,05	28,05
SADATI, et al. (2016)	RAC50-1	50%	200	303	47	999,9	3,3	1818,0	0,030	90,6	236,7	35,7	39,7
	RAC50-2	50%	200	303	47	999,9	3,3	1757,4	0,029	89	233,4	37,3	41,3
	RAC50-3	50%	150	200	30	760	3,8	390,0	0,013	44	51,4	37,8	41,8
	RAC50-4	50%	150	200	30	760	3,8	390,0	0,013	39,1	51,4	37,8	41,8
	RAC50-5	50%	150	200	30	760	3,8	390,0	0,013	43,7	50,8	33,4	37,4
	RAC50-6	50%	150	200	30	760	3,8	390,0	0,013	41,2	50,8	33,4	37,4

Tabela A 4- Apresentação do BD (sem armadura transversal). Cont.

ENTRADA BANCO DE DADOS													
Autor	Viga	RCA (%)	b w (mm)	d (mm)	d' (mm)	a (mm)	a/d	As (mm ²)	ρ_1	Vu (kN)	Vflex (kN)	fck (MPa)	fc (MPa)
SANG-WOO KIM, et al. (2013).	RH-S2	50%	200	300	50	750	2,5	1161,3	0,019	60,6	205,1	28,6	32,6
	RH-M2	50%	200	450	80	1125	2,5	1734,3	0,019	108,9	306,6	28,6	32,6
	RH-L2	50%	200	600	80	1500	2,5	2322,6	0,019	126,1	410,2	28,6	32,6
	RH-M3	50%	300	450	80	1125	2,5	2694,4	0,020	154,2	473,0	28,6	32,6
	RH-L4	50%	400	600	80	1500	2,5	4645,2	0,019	261,5	820,4	28,6	32,6
SANDY SCHUBERT, et al. (2012).	RC-M-1 Q1	50%	500	170	30	560	3,3	1079,5	0,013	118	159,3	27,65	31,65
	RC-M-1 Q2	50%	500	170	30	560	3,3	1079,5	0,013	118,2	158,6	26,69	30,69
	RC-M-2 Q1	50%	500	170	30	560	3,3	1079,5	0,013	111,6	158,6	26,61	30,61
	RC-M-2 Q2	50%	500	170	30	560	3,3	1079,5	0,013	101,8	158,8	26,93	30,93
	RC-C-1	100%	500	170	30	560	3,3	1079,5	0,013	116	161,2	30,73	34,73
	RC-C-2 Q1	100%	500	170	30	560	3,3	1079,5	0,013	122,8	163,0	34,36	38,36
	RC-C-2 Q2	100%	500	170	30	560	3,3	1079,5	0,013	116,3	163,0	34,36	38,36
	RC-C-3	100%	500	170	30	560	3,3	1079,5	0,013	120,7	160,8	30,08	34,08
	RC-M-3 Q1	100%	500	170	30	560	3,3	1079,5	0,013	100,6	153,9	21,12	25,12
	RC-M-3 Q2	100%	500	170	30	560	3,3	1079,5	0,013	100,8	153,6	20,91	24,91
	RC-M-4 Q1	100%	500	170	30	560	3,3	1079,5	0,013	100	154,9	22,16	26,16
RC-M-4 Q2	100%	500	170	30	560	3,3	1079,5	0,013	105,9	155,5	22,8	26,8	
CARDOSO, (2018).	VA100	100%	180	249,6	30,45	620	2,5	490,9	0,011	47,625	95,9	22,9	26,9
	VB100	100%	180	257	23	620	2,4	942,5	0,020	56,565	167,8	22,9	26,9
AREZOUMANDI, et al. (2014).	RAC-NS-4.1	100%	300	400	60	1200	3,0	1809,6	0,012	114,8	222,4	26	30
	RAC-NS-4.2	100%	300	400	60	1200	3,0	1809,6	0,012	113	225,7	30,1	34,1
	RAC-NS-6.1	100%	300	400	60	1200	3,0	1809,6	0,020	143,2	222,4	26	30
	RAC-NS-6.2	100%	300	400	60	1200	3,0	1809,6	0,020	124,1	225,7	30,1	34,1
	RAC-NS-8.1	100%	300	400	60	1200	3,0	1809,6	0,027	131,4	222,4	26	30
	RAC-NS-8.2	100%	300	400	60	1200	3,0	1809,6	0,027	140,3	225,7	30,1	34,1
SANG-WOO KIM, et al. (2013).	RF-S2	100%	200	300	50	750	2,5	1161,3	0,019	72,9	207,8	30,9	34,9
	RF-M2	100%	200	450	80	1125	2,5	1734,3	0,019	96,4	310,6	30,9	34,9
	RF-L2	100%	200	600	80	1500	2,5	2322,6	0,019	125,1	415,6	30,9	34,9
	RF-M3	100%	300	450	80	1125	2,5	2694,4	0,020	159,8	479,4	30,9	34,9
	RF-L4	100%	400	600	80	1500	2,5	4645,2	0,019	256,6	831,2	30,9	34,9
SADATI, et al. (2016).	RAC100-1	100%	170	270	30	594	2,2	504,9	0,011	60	116,1	35,7	39,7
	RAC100-2	100%	170	270	30	810	3,0	504,9	0,011	42,7	83,1	27,2	31,2
	RAC100-3	100%	305	400	60	1240	3,1	3306,2	0,027	114,8	433,2	26	30
	RAC100-4	100%	305	400	60	1240	3,1	2476,6	0,020	113	363,7	30,1	34,1
	RAC100-5	100%	305	375	85	1219	3,3	1452,6	0,013	143,2	215,7	26	30
	RAC100-6	100%	305	375	85	1219	3,3	2321,8	0,020	131,4	315,9	26	30
	RAC100-7	100%	305	375	85	1219	3,3	3099,6	0,027	124,1	403,9	30,1	34,1
	RAC100-8	100%	305	375	85	1219	3,3	3099,6	0,027	140,3	403,9	30,1	34,1
	RAC100-9	100%	200	303	47	999,9	3,3	1757,4	0,029	84	231,1	35,8	39,8
	RAC100-10	100%	150	200	30	760	3,8	390,0	0,013	36,4	51,0	35,1	39,1
	RAC100-11	100%	150	200	30	760	3,8	390,0	0,013	38	51,0	35,1	39,1
	RAC100-12	100%	150	200	30	760	3,8	390,0	0,013	39,9	51,0	35,2	39,2
	RAC100-13	100%	150	200	30	760	3,8	609,0	0,020	36,1	74,9	35,2	39,2
	RAC100-14	100%	170	270	30	1080	4,0	504,9	0,011	31,7	62,5	27,9	31,9

Tabela A 5- Apresentação do BD (sem armadura transversal). Cont.

ENTRADA BANCO DE DADOS													
Autor	Viga	RCA (%)	b_w (mm)	d (mm)	d' (mm)	a (mm)	a/d	A_s (mm ²)	ρ_l	V_u (kN)	V_{flex} (kN)	f_{ck} (MPa)	f_c (MPa)
HASAN KATKHUDA, NASIM SHATARAT, (2016).	R100-3	100%	200	267	33	800	3,0	1017,9	0,019	46,445	124,6	19,2	23,2
	T100-3	100%	200	267	33	800	3,0	1017,9	0,019	55,61	128,5	22,6	26,6
KNAACK, KURAMA, M.ASCE, (2014).	S100-1a	100%	150	200	50	760	3,8	390,0	0,013	36,4	52,8	35,1	39,1
	S100-1b	100%	150	200	50	760	3,8	390,0	0,013	38	52,8	35,1	39,1
	S100-2a	100%	150	200	50	760	3,8	390,0	0,013	39,9	52,8	35,2	39,2
	S100-2b	100%	150	200	50	760	3,8	390,0	0,013	36,1	52,8	35,2	39,2
IGNJATOVIC, (2013).	RAC1000-1b	100%	200	235	45	1000	4,3	1922,3	0,041	69,28	163,2	30,5	34,5
SANG-WOO KIM, et al. (2013).	RARAC100-L2.5	100%	200	360	40	900	2,5	381,6	0,005	59,78	74,5	18,56	22,56
	RARAC100-M2.5	100%	200	360	40	900	2,5	597,6	0,008	70,07	105,2	18,56	22,56
	RARAC100-H2.5	100%	200	360	40	900	2,5	1159,2	0,016	84,77	175,2	18,56	22,56
	RARAC100-H3.5	100%	200	360	40	1170	3,3	1159,2	0,016	57,77	134,8	18,56	22,56