



Karoline Dantas dos Santos

**Resistência ao Arrancamento de Pinos de
Aço Embutidos em Elementos Estruturais
com Agregado Reciclado de Concreto**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

Dissertação orientada pelo Professor Maurício de Pina Ferreira

Belém – Pará – Brasil

2018

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



Karoline Dantas dos Santos

**Resistência ao Arrancamento de Pinos de Aço
Embutidos em Elementos Estruturais com
Agregado Reciclado de Concreto**

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 Instituto de Tecnologia/UFPA-Belém-PA**

S237r Santos, Karoline Dantas dos.

Resistência ao arrancamento de pinos de aço embutidos em elementos estruturais com agregado reciclado de concreto / Karoline Dantas dos Santos. — 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 - Reaproveitamento. 2. Agregados (materiais de construção). 3. Resíduos como materiais de construção. I. Título.

CDD 23. ed. – 6 2 0 . 1 3 6

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



Karoline Dantas dos Santos

Resistência ao Arrancamento de Pinos de Aço Embutidos em Elementos Estruturais com Agregado Reciclado de Concreto

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFPA. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Maurício de Pina Ferreira
Faculdade de Engenharia Civil – UFPA
(Orientador)

Prof. José Márcio Fonseca Calixto
Departamento de Construção Civil – UFMG
(Examinador Externo)

Prof.^a Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro
Faculdade de Engenharia civil – UFPA
(Examinador Externo)

Prof. Bernardo Nunes de Moraes Neto
Faculdade de Engenharia Civil – UFPA
(Examinador Interno)

Belém, 30 de julho de 2018.

Resumo

A utilização do concreto com agregado reciclado tem sido amplamente discutida em literaturas atuais, no sentido de promover uma alternativa ao concreto convencional. Para viabilizar a utilização deste novo material, torna-se necessária a avaliação de seu desempenho quando aplicado em estruturas de concreto armado. Dentre as diversas aplicações do concreto estrutural, destaca-se neste trabalho a sua utilização na indústria de pré-moldados, que vem ganhando grande espaço no cenário atual. Um dos pontos críticos no dimensionamento do concreto pré-fabricado recai sobre a transferência de esforços entre os elementos estruturais. Para otimizar estas regiões de ligação é comum a utilização de conectores metálicos embutidos no concreto, onde o desempenho da interação conector-concreto está vinculado diretamente ao comprimento de embutimento efetivo do conector, à resistência à tração do concreto e às condições de fissuração da peça. Neste sentido, esta pesquisa avalia o impacto da incorporação de agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC), no comportamento e na resistência ao arrancamento de pinos metálicos embutidos em concreto armado. Para isso, foi executado um programa experimental com 12 prismas, medindo 500x200x900 mm, com conectores metálicos isolados com cabeça, de embutimento efetivo $h_{ef} = 110\text{mm}$, dimensionadas para romper pelo cone de concreto, e resistência à compressão $f_c = 30\text{ MPa}$. Os espécimes foram divididos em 3 séries de ensaio com 4 primas cada, armados com diferentes taxas de armadura de flexão, $\rho\% \in [0.5;3.5]$, e para cada série foi atribuído percentuais distintos de AGRC, iguais a 0, 30 e 100%. Adicionalmente, foi verificado através da variação da relação entre a resistência experimental e teórica, se as prescrições normativas FIB BULLETIN (2011) e ACI 318 (2014) descrevem de maneira satisfatória a estimativa de resistência da ligação conector-concreto reciclado. Os resultados obtidos mostraram que a carga última ao arrancamento, de maneira geral, independe do teor de substituição de AGRC, ao passo que o acréscimo de área de aço influenciou diretamente no nível de fissuração da peça, aumentando a capacidade resistente da ligação. A avaliação das normas mostrou resultados equivalentes para todos os níveis de substituição de AGRC, em contrapartida, observou-se que a taxa de armadura é negligenciada pelas prescrições.

Palavras-chave Concreto reciclado, Agregado reciclado, Arrancamento, Conector metálico

Abstract

The use of concrete with recycled aggregate has been widely discussed in current literature in the sense of promoting an alternative to conventional concrete. In order of viability, it is necessary to measure its performance when applied to reinforced concrete structures. Among the different applications of the structural concrete, this work features its use in the pre-cast industry, which has been acquiring an important space in the current scenario. One of the critical points in the design of pre-fabricated concrete lies in the load transfer between structural elements. To optimize these connection regions, it is usually used headed studs embedded in concrete, where the performance of the interaction between connector-concrete is directly bounded to the effective embedment depth of the studs, to the tensile strength of concrete and to the cracking conditions of the structure. This research evaluates the impact of the incorporation of recycled concrete aggregate (RCA) on the behavior and the pullout strength of embedded headed stud in RC. Therefore, an experimental program of 12 concrete prisms was executed, measuring 500x200x900 mm, with metal headed isolated stud with effective, embedment depth $h_{ef} = 110$ mm, designed for failure in the concrete cone, and concrete strength $f_c = 30$ MPa. The specimens were divided equally in 3 series of 4 prisms, reinforced with different bending reinforcement ratio, $\rho\% \in [0.5;3.5]$, and each series was assigned to a distinct RCA substitution ratio of 0%, 30% and 100%. Additionally, it was verified through the relation between experimental and theoretical strength whether the codes FIB BULLETIN (2011) and ACI 318 (2014), satisfactorily describe the estimative of strength of the interface between connector and concrete made of RCA. The results had shown that in general the ultimate pullout load does not depend of the substitution ratio of RCA, while the increasement of steel area has directly influenced the cracking condition of the specimens, increasing the connection strength. The codes had shown equivalent results for all substitution ratios of RCA, on the other hand, it was observed that the reinforcement ratio may have been neglected by the codes.

Keywords: Recycled concrete; Recycled aggregate; Pullout; headed stud.

À minha mãe, Ediva Camelo.

Agradecimentos

Em toda a minha vida sempre tive a convicção de que não somos suficientes em nada, sempre precisamos de algo ou alguém que nos motive, incentive, ajude, ou até mesmo, na ausência de alguma prestatividade, apenas se faça presente. Nunca vi a dependência de ajuda como algo ruim, muito pelo contrário, a colaboração entre os indivíduos dá sentido à palavra humanidade, sob meu ponto de vista.

Início esta seção de agradecimentos, falando sobre alguém que admiro e tenho profunda amizade, o meu orientador, Prof. Maurício de Pina Ferreira, que é um dos meus grandes motivadores na vida acadêmica e profissional. Agradeço imensamente por todo o auxílio, orientação, paciência e compreensão, mesmo nos momentos em que fui falha, que não foram poucos, por sinal. Saiba que é um profissional admirável e é um exemplo para todos nós do NUMEA. Espero que nossa parceria, que nasceu ainda no meu período de graduação, perdure por muitos anos.

Agradeço também à Professora Luciana Cordeiro, que coorientou brilhantemente esta pesquisa. Deixo aqui a minha admiração por esta profissional, que se mostrou totalmente solícita no desenvolvimento de todas as etapas deste trabalho, sobretudo, na parte de materiais.

O andamento desta pesquisa contou com a interação de dois polos da UFPa. Início agradecendo aos Laboratórios de Engenharia civil (LEC) e Engenharia Química (LEQ) do Campus de Belém, principalmente aos Técnicos Augusto e Joel, pela ajuda na elaboração das inúmeras etapas deste trabalho, bem como também, aos alunos da escola técnica do estado, que nos ajudaram no processo de beneficiamento ARC. Agradeço também ao CAMTUC e ao NDAE, pela colaboração na execução do programa experimental e acolhimento de nossa equipe na cidade de Tucuruí, bem como a Técnica Franci e ao Prof. Aarão Neto, que sempre mostraram disponibilidade a sanar nossas dificuldades.

Durante meus quase sete anos de permanência como estudante e hoje servidora da UFPa, sempre tive a sorte de cruzar com pessoas que, de alguma forma, fizeram muita diferença na minha vida. Sem dúvida, aqui encontrei meus melhores amigos, e desejo leva-los pro resto da vida. Dentre as várias pessoas que participaram direta e indiretamente desta pesquisa, reservo esse espaço para agradecer aos amigos Walter Cancela, Matheus Kenji e Allan Cardoso, que caminharam junto comigo neste desafio que foi a utilização do ARC, especialmente ao Matheus Kenji, que me auxiliou a distância no desenvolvimento dos ensaios experimentais, o que até então era um assunto que eu não dominava. Aos amigos Manoel Mangabeira, Marcus Vinícius e Hamilton Costa, que foram parceiros nas mais adversas situações, deixo aqui a minha admiração pela prestatividade e engajamento em ajudar, mesmo em momentos que estavam sobrecarregados com suas próprias atividades. Por fim, agradeço ao meu amigo e colega de trabalho, Rafael Oliveira, que foi um grande incentivador, me ajudando tanto no campo acadêmico como no profissional e, em vários momentos, na vida pessoal.

Às amigas, Beatriz Luna, Hayanna Karolina, Juliana Carla, Stefânia Medeiros, Mirelle Moreira e Lana Gomes, que estiveram comigo durante todo meu período de graduação e mestrado, e de diversas formas, tornaram a minha vida mais feliz. Deixo aqui meu eterno agradecimentos por terem sido minha segunda família.

Aos meus pais, Edaci Viana e Ediva Camelo e meus irmãos, Lorena, Maira e Toni, agradeço por toda confiança, ajuda, apoio, conselhos, não só durante meu período de mestrado, mas em todos os momentos. Agradeço especialmente à minha mãe, que é muito além do meu melhor exemplo de pessoa, é minha inspiração, é minha força, é minha maior incentivadora e significa absolutamente tudo pra mim. Eu amo muito vocês, e todo meu esforço é no sentido de retribuir toda fé que depositam em mim.

Finalmente, e mais importante, agradeço aquele que conduziu meus passos por toda existência, que carinhosamente tem cuidado de mim e que nunca me abandonou, mesmo nos momentos mais difíceis. Hoje, finalizo mais uma etapa da minha vida, e dentre tantas conquistas que já tive, essa fora a mais penosa, e sem o auxílio espiritual de Deus, sem dúvida, este caminho seria muito mais difícil.

Lista de Figuras

Figura	Página
Figura 1-1 - Aterro de resíduos para concreto pré-moldado e processo de demolição para descarte (FIOL <i>et al.</i> , 2018)	18
Figura 1-2 – Sistema de transferência de esforços entre peças pré-moldadas com conector metálico com cabeça	23
Figura 2-1 - Influência da resistência à compressão do concreto de origem na absorção de água do AGRC, KOPER (2017)	28
Figura 2-2 Efeitos da adição de ARC em 28 dias, adaptado de DHIR & PAINE, (2004)	30
Figura 2-3 - Relação entre tração e compressão, adaptado de CAKIR (2014)	31
Figura 2-4 Curva tensão deformação traçada a partir do monitoramento de ensaios de compressão axial e tração diametral, adaptado de BUI <i>et al.</i> (2017)	32
Figura 2-5 - Comportamento do módulo de elasticidades do concreto em função da adição de AGRC, adaptado de GOMES e BRITO (2009)	33
Figura 2-6 - Zonas de transição do concreto com agregado reciclado após coloração com solução de fenolftaleína, adaptado de LEE e CHOI (2013)	34
Figura 2-7- Tipos de conectores pré-instalados adaptado de COSTA H. D. (2016)	35
Figura 2-8 - Tipos de conectores pós-instalados adaptado de COSTA H. D. (2016)	35
Figura 2-9 – Modos de ruptura de conectores submetidos à tração:	37
Figura 2-10 – Curva carga-deslocamento idealizada para conectores submetidos à tração, adaptado de FUCHS <i>et al.</i> , (1995)	39
Figura 2-11 – Relação carga-deslocamento de conectores com cabeça e conector de segurança, (COSTA, H. D., 2016 apud REHM <i>et al.</i> ,1988)	40
Figura 2-12 – Ângulo do cone de concreto em função do embutimento de ancoragem efetivo, adaptado de FUCHS <i>et al.</i> , (1995)	40
Figura 2-13 – Resultados da extensômetro do cone de concreto (COSTA, H. D., 2015 apud ELIGEHAUSEN e SAWADE, 1989)	41
Figura 2-14 - Curva carga-deslocamento de conectores com cabeça submetidos à tração em concreto fissurado e não fissurado, adaptado de FURCHE e DIETERLE, (1986)	42
Figura 2-15 – Projeção do cone de ruptura de 4 e 2 conectores com pequeno espaçamento, adaptado de COSTA, H. D. (2016)	43
Figura 2-18 – Influência do diâmetro da cabeça do conector.	45
Figura 2-19 - Influência da abertura de fissura na resistência à tração de conectores de segurança e conectores com cabeça, adaptado de ELIGEHAUSEN (1984)	45

Figura 2-20 - Razão entre carga última de conectores instalados em concreto fissurado e instalados em concreto não fissurado em função da abertura de fissuras, adaptado de ELIGEHAUSEN e BALOGH (1995)	46
Figura 2-21 - Domínios de estado limite último de uma seção transversal, adaptado da NBR 6118 (2014)	49
Figura 3-1 – Ordem ideal de mistura de materiais para a confecção os concretos:	56
Figura 3-2 – Sistema de formas: <i>a) – Vista sistema de formas; b) – Vista locação de armaduras e fixação de pinos metálicos</i>	58
Figura 3-3 - Arranjo geral das armaduras de flexão e cisalhamento e posicionamento do conector nos espécimes	60
Figura 3-4 – Armaduras executadas, espécime do tipo F1-0.5	60
Figura 3-5 – Projeto executivo do conector metálico utilizado	61
Figura 3-6 – Projeto executivo para soldagem de cabeça e porca na haste do conector	62
Figura 3-7 Disposição dos LVDT's para leitura de deslocamentos do conector metálico:	63
Figura 3-8 - Instrumentação dos espécimes	65
Figura 3-9 – Extensometria da armadura de flexão e cone de concreto	65
Figura 3-10 – Dispositivos de aplicação e leitura de carga	66
Figura 3-11 – Detalhamento do Sistema idealizado para os ensaios de arrancamento:	67
Figura 3-12 – Sistema de ensaio executado	68
Figura 4-1 – Ensaio de caracterização dos materiais	69
Figura 4-2 - Resistência à compressão do concreto em função do teor de substituição	70
Figura 4-3 – Propriedades mecânicas do concreto em função o teor de substituição de AGRC	71
Figura 4-4 – Superfície de ruptura de corpos de prova cilíndricos submetidos a tração por compressão diametral	72
Figura 4-5 – Comportamento carga x deslocamento dos espécimes por série	74
Figura 4-6 – Comparativo de comportamento carga x deslocamento entre séries com diferentes substituições de AGRC	75
Figura 4-7 – Comportamento carga x deslizamento do conector dos espécimes por série	76
Figura 4-8 - Comparativo de comportamento carga x deslocamento entre séries com diferentes substituições de AGRC	77
Figura 4-9 – Deformações nas armaduras de flexão dos espécimes por série de ensaio	78
Figura 4-10 – Deformações na haste do conector metálico	79
Figura 4-11 – Deformações registradas no cone de concreto por espécimes da Série 0%	81
Figura 4-12 – Deformações registradas no cone de concreto por espécimes da Série 30%	82
Figura 4-13 - Deformações registradas no cone de concreto por espécimes da Série 100 %	83
Figura 4-14 – Relação carga abertura de fissuras por série	84
Figura 4-15 - Comparativo de <i>carga x abertura de fissuras</i> entre séries com diferentes substituições de AGRC	85
Figura 4-16 – Vista lateral e em planta dos prismas da Série 0% ensaiados	86
Figura 4-17 - Vista lateral e em planta dos prismas da Série 30% ensaiados	87

Figura 4-18 – Vista lateral e em planta dos prismas da Série 100% ensaiados	88
Figura 4-19 – Fator k, Exp em função da taxa de armadura de flexão	90
Figura 4-20 – Fator k, Exp em função do teor de substituição de AGRC	91
Figura 4-21 – Avaliação do fator λ em função teor de AGRC	91
Figura 7-1 - Armadura espécime do tipo F1-0.5	102
Figura 7-2 - Armadura espécime F2-1.1	103
Figura 7-3 - Armadura espécime F3-2.2	104
Figura 7-4 - Armadura espécime F4-3.5	105

Lista de Tabelas

Tabela	Página
Tabela 3-1 – Caracterização AGRC	52
Tabela 3-2 – Caracterização AGN	53
Tabela 3-3 – Caracterização AM	54
Tabela 3-4 - Características físicas e mecânicas do cimento Portland CP V ARI RS	55
Tabela 3-5 – Traço para concreto	56
Tabela 3-6 – Esquema de concretagem	57
Tabela 3-7 - Características gerais das séries de ensaio	59
Tabela 4-1 – Resultados gerais de caracterização do concreto	70
Tabela 4-2 – Caracterização do aço	73
Tabela 4-3 – Resistência experimental e previsão teórica de resistência para os prismas ensaiados	89

Lista de Símbolos

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

Símbolo	Significado
α %	teor de argamassa
H%	teor de umidade
AGRC%	teor de substituição de agregado graúdo reciclado de concreto
m	massa unitária
a/c	relação água cimento
bw	largura do espécime
h	altura do espécime
L	comprimento do espécime
ρ_f %	taxa de armadura de flexão
f_c	resistência à compressão do concreto
γ_{cim}	massa específica cimento
γ_{areia}	massa específica da areia
γ_{AGRC}	massa específica do agregado graúdo de concreto reciclado
γ_{AGN}	massa específica do agregado graúdo natural
α	ângulo de ruptura do cone de concreto
c	distância do conector até a borda
δ	deslocamento do conector
d_h	diâmetro da cabeça do conector
$d_{máx}$	diâmetro máximo do agregado
d_o	dimensão máxima do elemento estrutural em que não ocorrerá a influência do efeito de escala
d_s	diâmetro da haste do conector
Δw	variação da abertura da fissura
ε	deformação do concreto
E_c	módulo de elasticidade do concreto
f_c	resistência à compressão do concreto em corpo de prova cilíndrico

f_{cc}	resistência à compressão do concreto em corpo de prova cúbico
f_{ct}	resistência à tração do concreto
f_y	tensão de escoamento do aço
G_f	energia da fratura do concreto
G_{fr}	energia da fratura do concreto de referência
h_0	constante empírica, sendo o h_{ef} que que não possui influência de efeito de escala
h_{ef}	embutimento de ancoragem efetivo do conector
h_n	embutimento de ancoragem nominal do conector
k_1	fator que considera o estado de fissuração do concreto
k_1, k_2, k_3	fatores de calibração do modelo teórico
$k_{c,de}$	rigidez do cone de concreto
k_{IC}	rigidez da fratura do cone de concreto
λ	fator que considera a relação entre N_u e $N_{u,teo}$
l_1	comprimento de ancoragem da armadura de ancoragem no cone de concreto
l_b	comprimento máximo da fissura do cone de concreto
N	carga de tração solicitante do conector
N_u	carga de ruptura do conector
$N_{u,exp}$	carga de ruptura experimental do cone de concreto
$N_{u,ncr}$	carga de ruptura do cone de concreto de conector em concreto fissurado
$N_{u,uncr}$	carga de ruptura do cone de concreto de conector em concreto não fissurado
N_u^o	carga de ruptura do cone de concreto sem efeito de espaçamento e de borda
s	espaçamento entre conectores
s_1	espaçamento entre conectores na direção x
s_2	espaçamento entre conectores na direção y
σ_N	tensão nominal na ruptura do cone de concreto
s_r	espaçamento entre barras longitudinais do elemento de concreto
w	abertura da fissura
x	comprimento da fissura do cone de concreto

1.	INTRODUÇÃO	17
1.1.	Justificativa	22
1.2.	Objetivos	24
1.2.1.	Objetivo geral	24
1.2.2.	Objetivos específicos	24
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1.	Agregado graúdos reciclados de concreto (AGRC)	25
2.1.1.	Caraterísticas dos agregados graúdos reciclados de concreto	25
2.1.2.	Concreto com AGRC	29
2.1.3.	Propriedades gerais no estado fresco	29
2.1.4.	Propriedades no estado endurecido	30
2.2.	Arrancamento em concreto armado	35
2.2.1.	Comportamento de conectores com cabeça embutidos em concreto armado	36
2.2.2.	Conectores instalados em concreto não fissurado	36
2.2.3.	Comportamento de conectores instalados em concreto fissurado	41
2.2.4.	Fatores que influenciam na resistência ao arrancamento de conectores embutidos em elementos de concreto	43
2.3.	Recomendações normativas	47
2.3.1.	Dimensionamento ao arrancamento segundo FIB BULLETIN 58 (2011)	47
2.3.2.	Dimensionamento ao arrancamento segundo ACI 318 (2014)	48
2.3.3.	Dimensionamento à flexão NBR 6118 (2014)	48
3.	PROGRAMA EXPERIMENTAL	51
3.1.	Considerações gerais	51
3.2.	Caracterização dos materiais	51
3.2.1.	Origem, beneficiamento, e caracterização do AGRC	51
3.2.2.	Beneficiamento e Caracterização do agregado graúdo natural	53
3.2.3.	Caracterização do agregado miúdo	54
3.2.4.	Caracterização do cimento Portland	54
3.3.	Dosagem de concretos com 0, 30 e 100 % de AGRC	55
3.3.1.	Propriedades no estado fresco	56
3.4.	Concreto, moldagem e cura	57
3.5.	Características da série de ensaios de arrancamento	58
3.6.	Confecção dos espécimes	61
3.6.1.	Armadura de flexão e cisalhamento	61

3.6.2.	Conector	61
3.7.	Instrumentação	63
3.7.1.	Deslocamento vertical	63
3.7.2.	Deformação nas armaduras, conector e concreto	63
3.8.	Sistema de ensaio	66
4.	RESULTADOS	69
4.1.	Propriedades mecânicas dos materiais	69
4.2.	Deslocamento verticais	73
4.3.	Deslizamento do conector	75
4.4.	Deformações na armadura de flexão	77
4.5.	Deformações da haste do conector	79
4.6.	Deformações no cone de ruptura do concreto	80
4.7.	Abertura de fissuras	83
4.8.	Modos de ruína e resistência ao arrancamento	85
5.	CONCLUSÕES	92
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
7.	ANEXO A	102

1. Introdução

Segundo SOUZA *et al.* (2015), que avaliaram os dados da economia brasileira em um período de 1996 a 2013, a indústria da construção civil contribuiu em média com cerca de 5% do PIB brasileiro. Trata-se de um setor importante, cujo desenvolvimento normalmente está associado ao bom desempenho da economia do país, mas que requer atenção para que ele se enquadre dentro dos preceitos de sustentabilidade, principalmente no que se refere à gestão de resíduos sólidos de construção. Neste contexto, o uso de resíduos de demolição na produção de agregados para uso na fabricação de concreto é um tema com importância científica e tecnológica, uma vez que eles podem contribuir tanto pelo fato de agregar valor e função à determinados tipos de resíduos, como podem contribuir para a redução do consumo de agregados naturais. Existem vários tipos de agregados reciclados, merecendo destaque os agregados reciclados de concreto (ARC), que podem se apresentar na sua forma graúda (AGRC) ou miuda.

De maneira geral, concretos fabricados com agregados reciclados apresentam um desempenho inferior em relação aos concretos com agregados naturais. Entretanto, trabalhos realizados por autores como OMARY *et al.* (2016), ETXEBERRIA *et al.* (2007) e EVANGELISTA *et al.* (2007), mostraram que concretos elaborados com agregados reciclados de concreto, podem ter propriedades mecânicas semelhantes às de concreto com agregados naturais, ressaltando-se que o desempenho destes concretos está condicionado, principalmente, à qualidade do agregado reciclado utilizado.

Autores como KATZ (2003), ETXEBERRIA (2007), CASUCCIO (2008) e MATIAS (2013), comentam que AGRC de boa qualidade, geralmente, são aqueles que passam por um processo mais rigoroso de beneficiamento e triagem. A etapa de beneficiamento engloba a moagem do concreto primário, que além de ajustar a granulometria do material, retira parte da argamassa aderida. A pasta antiga aderida ao agregado também influencia nas propriedades do ARC, uma vez que ela atribui às partículas maior porosidade e menor densidade. HANSEN (1986), KUBISSAA (2015) e KOPER (2017) afirmam que a qualidade do agregado está também fortemente relacionada à relação água-cimento do concreto de origem. Por este motivo, concretos de maior resistência produzem agregados reciclados de maior qualidade, e conseqüentemente, concretos com melhores propriedades.

Outro aspecto muito importante indicado pela literatura está relacionado com os efeitos benéficos da otimização da curva granulométrica dos agregados reciclados. Trabalhos como os de BUI *et al.*, (2017) e KUBISSAA (2015) mostram que é possível obter concretos com AGRC com desempenho semelhante ou até melhor do que aquele feito com agregados naturais apenas utilizando processos de mistura dos agregados mais adequados.

Considerando o cenário brasileiro, percebe-se que a indústria de pré-moldados tem mostrado grande interesse pelo consumo de resíduos da construção civil beneficiados na forma de agregados reciclados de concreto (ARC). A Figura 1.1 mostra o aterro de uma indústria de pré-moldados e o processo de demolição das peças para posterior descarte. No entanto, seu uso no país têm se restringido à aplicações para a fabricação, principalmente, de produtos com menor valor comercial, como artefatos de concreto sem função estrutural. Os agregados graúdos reciclados de concreto vem sendo usados na fabricação de diferentes tipos de blocos, painéis para piso e alvenaria, dentre outros produtos.



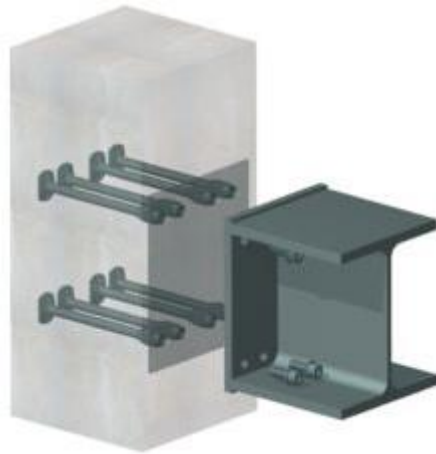
Figura 1-1 - Aterro de resíduos para concreto pré-moldado e processo de demolição para descarte (FIOL *et al.*, 2018)

A nível internacional, a *British Precast Concrete Federation*, publicou em 2013 um documento que tem como objetivo ajudar a remodelar os padrões de sustentabilidade da indústria da construção civil. Intitulado *Precast Sustainability Strategy and Charter*, o documento apresenta diretrizes e propõe ações para que a indústria de pré-fabricados de concreto opte pela reutilização de seus resíduos na fabricação de novos elementos. Trabalhos como os de PEDRO *et al.* (2017), SALESA *et al.* (2017), FIOL *et al.* (2018), mostram que

é possível produzir concretos com agregados reciclados que atendam aos requisitos mecânicos para aplicações estruturais.

A utilização do concreto com AGRC com função estrutural tem sido amplamente discutida cientificamente, como no caso do trabalho de SEARA-PAZ *et al.* (2018), que investigaram experimentalmente o efeito da substituição de agregados naturais por agregados graúdos reciclados de concreto tanto no comportamento como na resistência à flexão de vigas de concreto armado. As conclusões deste estudo são animadoras e mostraram que as vigas com agregados reciclados apresentaram desempenho similar ao observado para as vigas com agregados naturais, tanto em relação aos estados limites de serviço (padrão de fissuração e deslocamentos imediatos) quanto em relação à resistência e à ductilidade à flexão. No entanto, para outros modos de solicitação, como o cisalhamento por exemplo, muitos trabalhos indicam que a substituição de agregados naturais por agregados reciclados afeta negativamente o desempenho estrutural, como concluem KATKHUDA e SHATARAT (2018), dentre outros.

No caso de estruturas pré-moldadas de concreto ou de estruturas mista de aço e concreto, são muitas as situações estruturais onde é necessário transmitir esforços de tração entre diferentes elementos estruturais, o que muitas vezes é feito através do uso de conectores de aço com cabeça. A Figura 1.2 ilustra um sistema de ligação universal comercializado pela HALFEN. A Figura 1.3 ilustra algumas aplicações de conectores de aço, como no caso de ligações semi-rígidas em sistemas reticulados pré-moldados de concreto, em ligações entre painéis pré-moldados de concreto ou ainda em ligações em estruturas mistas.

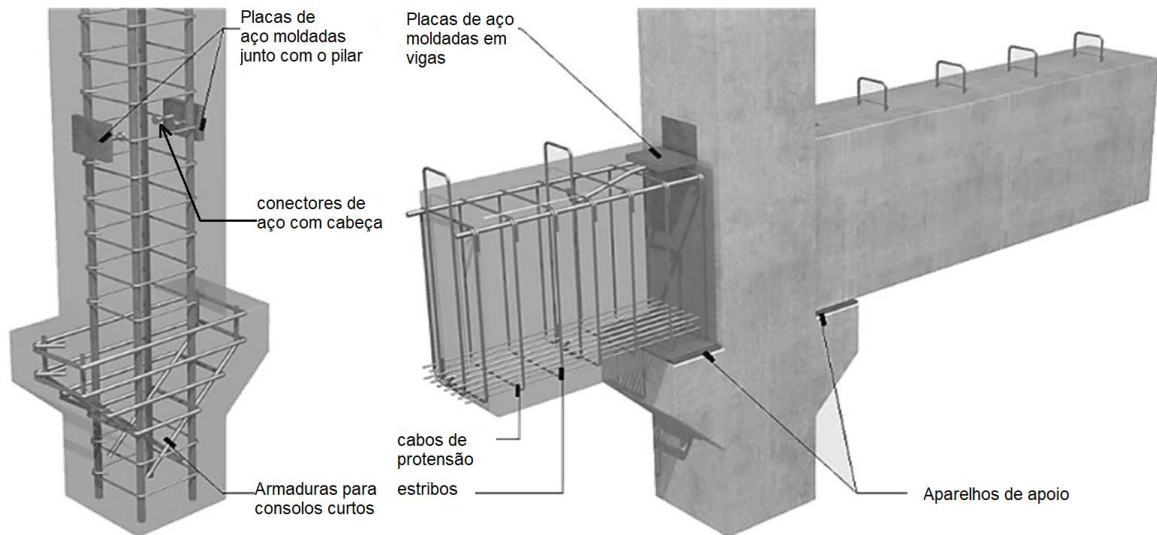


a) Sistema de conexão universal



b) Conector de aço

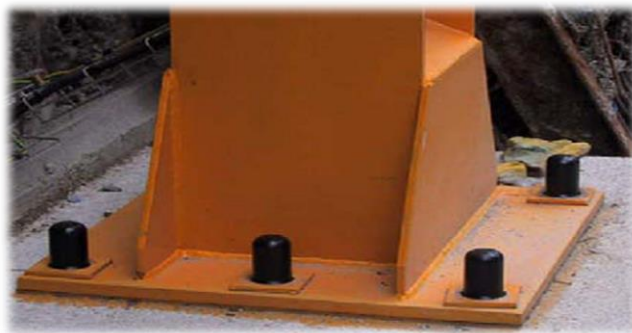
Figura 1.2 – Sistema de conexão estrutural (disponível em <http://www.halfen.com>)



a) Ligações semi-rígidas em estruturas pré-moldadas de concreto



b) Ligações entre painéis pré-moldados de concreto



c) Ligação entre pilar de aço e fundação de concreto

Figura 1.3 – Exemplos de aplicação de conectores de aço em ligações estruturais

O uso de conectores com cabeça agrega importante vantagens mecânicas, uma vez que eles permitem que a transmissão de esforços de tração seja feita não apenas por aderência entre a barra e o concreto, mas também através de ancoragem mecânica na região da cabeça do

conector, conforme ilustrado na Figura 1.4a. A resistência ao arrancamento de conectores de aço com cabeça vêm sendo foco de diversas pesquisas científicas, como as de INFASO (2012), SEGLE *et al.* (2013) e COSTA (2016). O desempenho desta ligação está condicionado, principalmente, ao embutimento efetivo do conector, que delimita o plano de formação do cone de ruptura do concreto, ilustrado na Figura 1.4b. A ruptura por arrancamento do cone de concreto ocorre de forma frágil e pode ser afetada tanto pela resistência quanto pelo tipo de agregado.

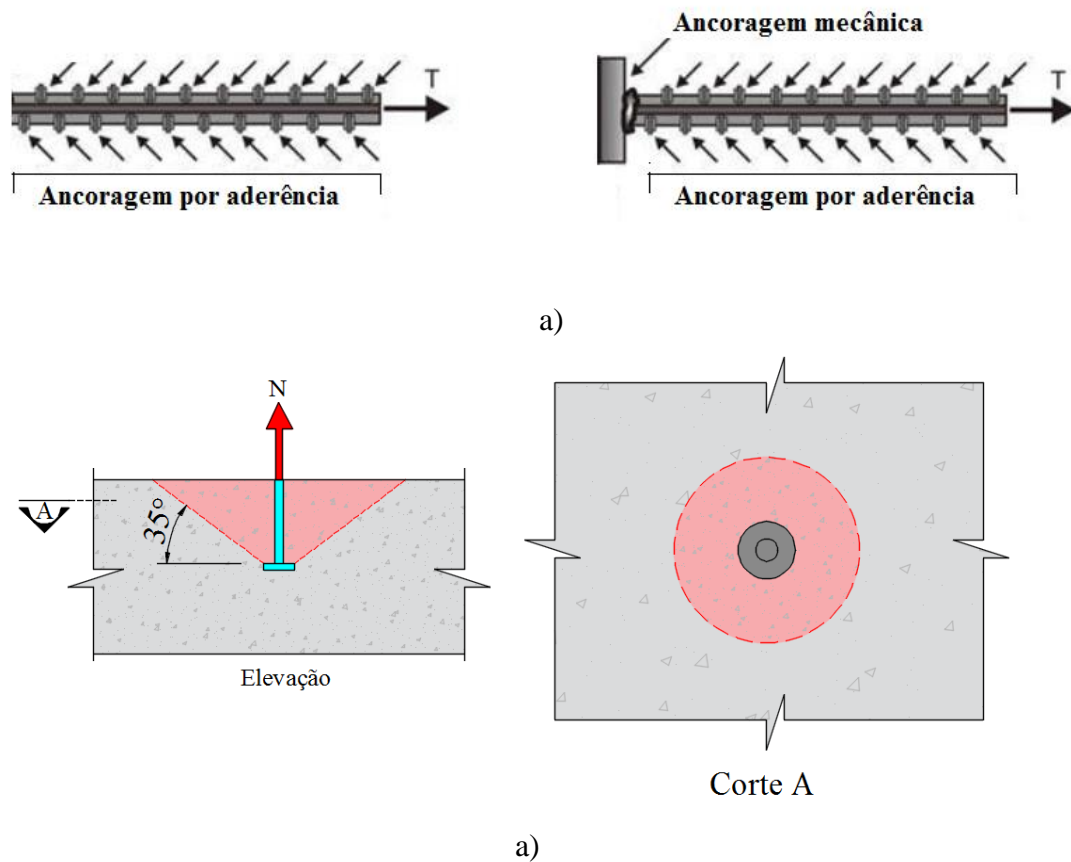


Figura 1.4 – Conectores de aço embutidos em concreto. a) *mecanismos de transferência de forças de tração do aço para o concreto, Thompson, et al. (2003)*; b) *ruína por arrancamento do cone de concreto*

1.1. Justificativa

À medida que a indústria da construção civil se impulsiona a sustentabilidade torna-se mais emergente e a reutilização dos resíduos gerados por esta indústria são primordiais. No campo da engenharia civil, o uso de resíduos de demolição como agregados tem sido amplamente explorado no sentido de fornecer uma alternativa aos agregados naturais, utilizados no concreto tradicional. Apesar de muitas vantagens visíveis associadas à iniciativa de reutilização do ARC em concretos, o material não é fabricado em escala comercial para substituir o concreto com agregado natural, usado como concreto estrutural no Brasil, atualmente.

O processo de produção e triagem de peças pré-moldados gera uma quantidade significativa de resíduos de concreto, que são bastante apropriados para a fabricação de ARC, uma vez que podem apresentar uma quantidade menor de contaminantes do que os ARCs oriundos de demolição. A aplicação de agregados reciclados dentro da própria indústria de pré-fabricados, além de trazer características sustentáveis, pode promover benefícios econômicos ao empreendimento. Publicações recentes, como THOMAS *et al.* (2016) SALESA *et al.* (2017), NOVÁKOVÁ e MIKULICA (2017) e PEDRO *et al.* (2017), avaliam as propriedades de concretos com ARC oriundos da indústria de pré-fabricados, e obtiveram resultados satisfatórios em relação as propriedades no estado fresco e endurecido do material. GONZÁLEZ *et al.* (2017), por exemplo, já avaliam a aplicação de concreto com agregado reciclado de tijolo na confecção de vigas pré-moldadas, e obtiveram resultados otimistas quando a aplicação do material.

Inúmeros autores têm buscado avaliar o desempenho do concreto com agregado reciclado em estruturas armadas. Trabalhos de SEARA-PAZ *et al.* (2018) e KATKHUDA e SHATARAT (2018), por exemplo, avaliam vigas armadas sujeitas à flexão e a cisalhamento, respectivamente. Ou ainda, trabalhos como o de FRANCESCONI *et al.* (2018), que já avaliam o comportamento de lajes de concreto com agregado reciclado sujeitas a punção. Entretanto, verifica-se que a literatura disponível, tem limitado suas análises, ainda, em peças usuais de concreto armado, como vigas, lajes, blocos de fundação, etc. Considerando a versatilidade na aplicação do concreto na construção civil, estudos adicionais, que levem em consideração outras condições de projeto, também precisam ser feitos.

Dentre as diversas aplicações do concreto estrutural, destaca-se neste trabalho a sua utilização na indústria de pré-moldados, que vem ganhando grande espaço no cenário atual. Um dos pontos críticos no dimensionamento do concreto pré-fabricado recai sob a transferência de esforços entre os elementos estruturais. Para otimizar estas regiões de ligação, é comum a utilização de conectores metálicos embutidos no concreto, que é exemplificado na Figura 1-2, onde o desempenho da interação conector-concreto está vinculado diretamente ao comprimento de embutimento efetivo do conector, à resistência à tração do concreto e às condições de fissuração da peça

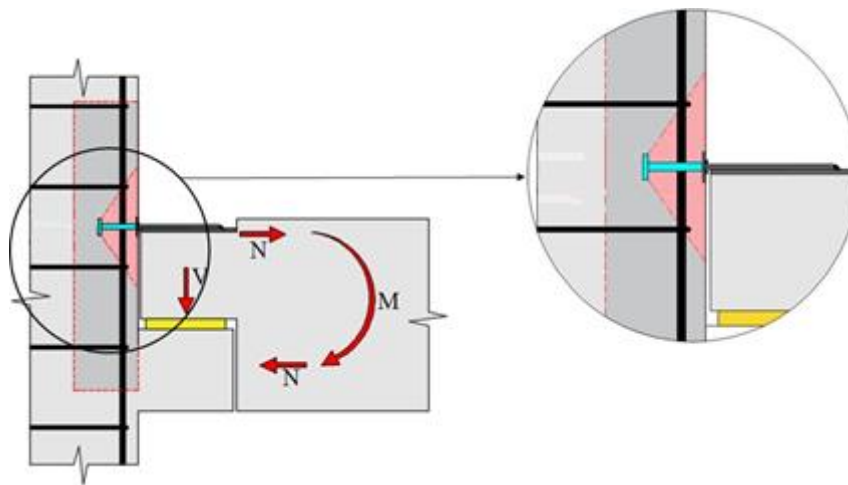


Figura 1-2 – Sistema de transferência de esforços entre peças pré-moldadas com conector metálico com cabeça

Atualmente, embora o campo da pesquisa esteja caminhando no sentido de promover a avaliação do concreto com agregado reciclado como material estrutural, não se tem encontrado relatos científicos acerca de seu comportamento, quanto à solitação de arrancamento de pinos metálicos embutidos. Neste sentido, sabendo que o teor de substituição de ARC pode alterar as propriedades do concreto, e tendo em vista que o desempenho de ligações feitas entre elementos estruturais com conector metálico, dependem também das propriedades mecânicas do material utilizado, torna-se fundamental a verificação experimental da problemática, no sentido de fornecer embasamento científico necessário ao emprego do material.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar a influência da substituição de agregados graúdos naturais por agregados graúdos reciclados de concreto (AGRC) na resistência ao arrancamento de conectores de aço com cabeça embutidos em concreto armado.

1.2.2. Objetivos específicos

- Avaliar experimentalmente a influência do teor de substituição de 30% e 100% de AGRC no comportamento e na resistência ao arrancamento do concreto de pinos de aço;
- Avaliar se o controle da fissuração exercido pela variação da taxa de armadura de flexão influencia no comportamento e na resistência ao arrancamento de pinos embutidos em elementos de concreto armado
- Verificar se os modelos normativos são adequados para dimensionar a ligação pino-concreto com AGRC

2. Revisão bibliográfica

2.1. Agregado graúdos reciclados de concreto (AGRC)

A ABNT NBR 9935 (2011) define como agregado reciclado de resíduo de construção civil, o material granular obtido através de beneficiamento de resíduos de construção ou demolição da construção civil, previamente triados e pertencentes a classe “A” de resíduos sólidos, e ainda, que podem ser classificados em agregado reciclado de concreto (ARC) ou reciclado misto (ARM). A norma ainda considera que o ARC é composto na sua fração graúda de no mínimo 90% em massa de fragmentos a base de cimento Portland e rochas.

Segundo BEHERA *et al.* (2014), ARC é o material tipicamente processado pelo esmagamento de estruturas de concreto recentes ou antigas. LI *et al.* (2008) comentam que os detritos de demolição podem ser esmagados por vários trituradores, como triturador de mandíbulas, moinho de martelos, triturador de impacto e triturador de cone ou até mesmo manualmente com a utilização de martelo.

Autores MCNEIL e KANG (2013), apontam que as principais propriedades dos AGRC são: densidade, porosidade, absorção de água, formato do agregado, composição granulométrica e a sua resistência à abrasão.

2.1.1. Características dos agregados graúdos reciclados de concreto

2.1.1.1. Forma, textura superficial das partículas e granulometria AGRC

É de senso comum que a forma, textura e granulometria das partículas dos agregados influenciam diretamente nas propriedades, tanto no estado fresco como no estado endurecido, dos concretos produzidos. O processo de beneficiamento e triagem do AGRC governa as características dos agregados reciclados, uma vez que influencia na quantidade de argamassa aderida às partículas e na distribuição granulométrica do material.

BEHERA *et al.* (2014), classificam os agregados reciclados quanto à forma e estrutura das partículas como sendo de superfície rugosa e forma irregular, em função da presença da antiga argamassa aderida. De acordo com BUTLER *et al.* (2011), o formato irregular e rugoso característico dos agregados reciclados, provocam uma melhora na ligação entre o

agregado e a nova matriz cimentante. Por outro lado, MCNEIL e KANG (2013) comentam que a rugosidade destas partículas afeta negativamente a trabalhabilidade dos concretos, uma vez que o deslizamento entre os grãos fica comprometido.

KUBISSA *et al.* (2015) concluíram que o agregado de concreto reciclado utilizado no estado seco, como substituição de no máximo de 50% do agregado natural, pode ser utilizado sem nenhum meio tecnológico adicional ou mudanças na composição granulométrica da mistura de concreto. No entanto, o autor ressalta, que algumas mudanças na consistência do concreto devem ser esperadas. Adicionalmente, o autor relata que concretos de alta resistência podem ser obtidos através de melhorias na distribuição granulométrica do AGRC.

2.1.1.2. Quantidade de argamassa aderida, massa específica, unitária e absorção de água no agregado reciclado de concreto

De acordo com vários autores, como HANSEN (1986), KATZ (2003) e CASUCCIO (2008), a característica mais notável do ARC é a argamassa antiga aderida aos grãos, que atribui baixa densidade, porosidade, maior absorção de água, irregularidade e rugosidade ao agregado reciclado de concreto. Estas características influenciam diretamente nas propriedades dos concretos produzidos a partir desses materiais

HANSEN (1983) comenta que o volume de argamassa residual em AGRC varia de 25% a 60%, de acordo com o tamanho do agregado. Já em estudos elaborados por NASSAR *et al.* (2012) indicam que pode ser encontrado cerca de 20% de argamassa anexa à superfície do AGRC, para tamanhos de partículas entre 20 e 30 mm. A quantidade de argamassa aderida pode ser controlada através do processo de beneficiamento e triagem do AGRC.

O beneficiamento do material pode ser feito com utilização de diversos tipos de trituradores que têm diferentes consequências sobre as propriedades físicas e mecânicas dos AGRC, o que por sua vez, influenciam nas prioridades do concreto, (MATIAS, 2013). ETXEBERRIA (2007) relata que trituradores de mandíbula são usados principalmente para esmagamento primário, já os trituradores secundários, como os de impactam, resultam em AGRC de melhor qualidade, ao passo que removem uma maior quantidade de argamassa aderida nas partículas do AGRC. Por outro lado, OLONGO e PADAYACHEE (2012) atribuem ao processo de esmagamento do material a responsabilidade pelo desenvolvimento de fissuras

no agregado, tornando as partículas mais fracas e suscetíveis à permeabilidade e absorção de água.

Quanto a densidade, de acordo com alguns autores como PADMINI *et al.* (2009), BEHERA *et al.* (2014), OMARY *et al.* (2016) e SARAVANAKUMAR *et al.* (2016), a quantidade de argamassa presente nos grãos reduz a densidade específica e unitária do AGRC. Neste sentido, os agregados reciclados, geralmente, são mais leves do que os agregados naturais. De acordo com AKBARNEZHAD (2013), a presença de uma maior proporção da argamassa intrinsecamente menos densa, em face ao agregado, resulta em uma diminuição da densidade aparente e aumento da absorção de água do AGRC.

SARAVANAKUMAR *et al.* (2016), verificaram que o tratamento químico através HCl, H₂SO₄, HNO₃ e HCl melhoraram a densidade do material em cerca de 5%, considerando que em seus estudos a densidade dos agregados reciclados é, em média, 15% menor do que a de agregados naturais. Entretanto, o excesso de processos na intenção de melhorar as propriedades do AGRC, pode atribuir ao material reciclado uma baixa eficiência energética, ao passo em que o processo produtivo se torna oneroso.

Outra hipótese que deve ser discutida acerca da argamassa aderida ao concreto, além da quantidade, é a qualidade desta argamassa. Estudos realizados por HANSEN (1986), apontam que qualidade do ARC está fortemente relacionada com a relação água cimento (a/c) do concreto de origem. Neste sentido, concretos com maior resistência produzem agregados reciclados de melhor qualidade, uma vez que estes materiais são menos porosos e mais densos.

KUBISSAA (2015) comenta que a absorção de água dos agregados reciclados está fortemente relacionada a absorção de concretos produzidos a partir do material. Adicionalmente, o autor sugere que a absorção de água desses concretos pode ser controlada com a redução da relação a/c.

Estudos realizados por KOPER (2017) através de um programa experimental, que mapeou os agregados reciclados de acordo com o concreto de origem, constatou que a menor absorção de água de agregados reciclados é obtida através de concretos de maior resistência,

como pode ser verificado na Figura 2-1. O autor ainda comenta que a absorção de água AGRC pode ser até quatro vezes maior do que a dos agregados naturais.

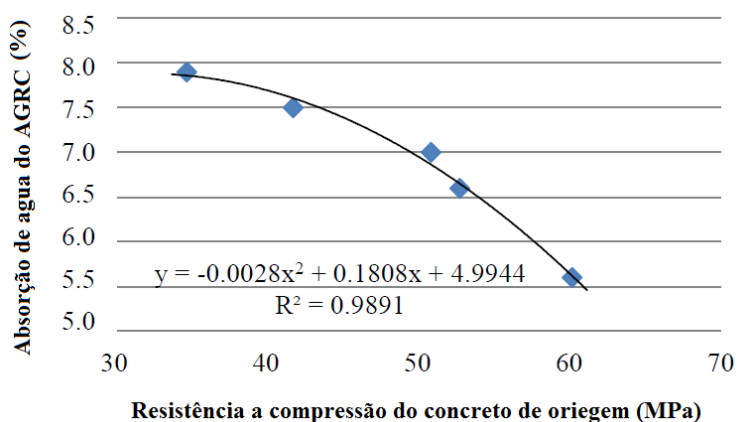


Figura 2-1 - Influência da resistência à compressão do concreto de origem na absorção de água do AGRC, KOPER (2017)

CORDEIRO (2013) relata que os grãos de menor granulometria apresentam menor massa específica e maior taxa de absorção água que os grãos de maior dimensão. A autora atribui esta característica ao fato destas partículas menores serem compostas, em sua maioria, de argamassa triturada.

2.1.1.3. Resistência à abrasão

De acordo com AKBARNEZHAD (2013), a resistência à abrasão é uma propriedade importante dos agregados e 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. De acordo com OMARY *et al.* (2016) o AGRC tem em média menor resistência à abrasão e ao impacto em relação ao AGN.

Através de um programa experimental realizado por SARAVANAKUMAR *et al.* (2016), utilizando ensaio Los Angeles, foi observado um desgaste de 47% para AGRC e 24% para agregados naturais. Neste sentido, mesmo com o maior índice de abrasividade, os agregados reciclados enquadram-se no limite aceitável para o ensaio de abrasão Los Angeles, para aplicações em concretos estruturais, segundo o autor.

2.1.2. Concreto com AGRC

2.1.3. Propriedades gerais no estado fresco

De maneira geral, os fatores principais que influenciam na trabalhabilidade de concretos com AGRC são a porosidade intrínseca à argamassa aderida, forma irregular e a textura áspera dos grãos. Na literatura, é comum a descrição de que a trabalhabilidade para este material é inversamente proporcional a sua relação água-cimento, ao passo que concretos com maior taxa e substituição de AGRC tendem ao declínio na resistência à compressão, em função da maior demanda de água.

Segundo KUBISSA (2015), a adição de ARC influencia na consistência de concretos, ao passo que a perda da trabalhabilidade está relacionada a alta absorção intrínseca aos AGRC. O autor também comenta que para substituições de 100% de AGRC esta condição é mais evidente.

MALEŠEV *et al.* (2010) relatam que em função da argamassa aderida, a tecnologia na produção do concreto com agregado reciclado é diferente do processo de produção de concreto com agregado natural. Para otimizar o processo produtivo, o autor comenta a cerca da pré saturação dos agregados reciclados, que pode ajudar no processo de mistura.

O trabalho desenvolvido por TABOADA *et al.* (2017) correlaciona a perda de trabalhabilidade ao tempo de mistura dos materiais. Os autores observaram que em até 45 minutos de mistura os concretos com substituições de 20 a 100% de AGRC não apresentam perdas consideráveis na trabalhabilidade do material. Adicionalmente, observaram a perda da trabalhabilidade em 90 minutos de mistura.

PADIMINI *et al.* (2009) em sua pesquisa observaram que o tamanho do agregado influencia diretamente na trabalhabilidade do concreto, segundo os autores, quanto maior a dimensão máxima do agregado, menor a absorção de água e melhor a trabalhabilidade do concreto.

2.1.4. Propriedades no estado endurecido

2.1.4.1. Resistência à compressão

A resistência à compressão dos concretos com agregado reciclado, de acordo com CABRAL *et al.* (2010), MCNEIL e KANG (2013), BEHERA *et al.* (2014) e KUBISSA (2015) está fortemente relacionada com as propriedades dos agregados reciclados utilizados, bem como seu teor de substituição em concretos.

Autores como DHIR & PAINE, (2004) e LIMBACHIYA *et al.* (2012) relatam em seus trabalhos que para fins práticos, a substituição de até 30% de agregados graúdos de concreto reciclado tem pequenos efeitos sobre a resistência à compressão, como pode ser verificado na Figura 2-2. Para o mesmo nível de substituição de 30 % de ARC, KUBISSA (2015) expõe uma melhora significativa na resistência à compressão em cerca 19,4%, apenas com o melhoramento da distribuição granulométrica dos agregados reciclados.

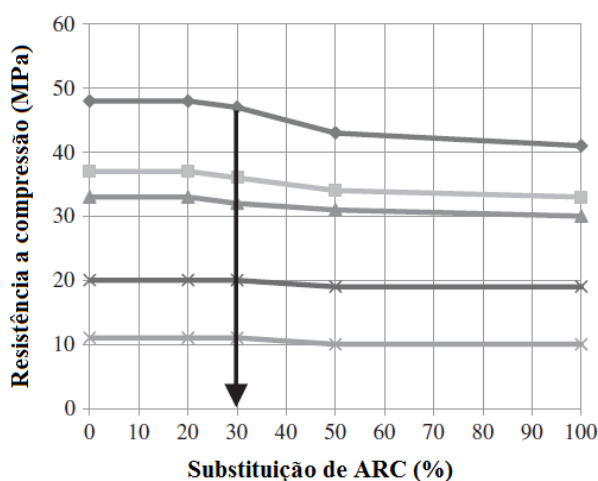


Figura 2-2 Efeitos da adição de ARC em 28 dias, adaptado de DHIR & PAINE, (2004)

Já para teores de substituição mais altos, MCGINNIS *et al.* (2017) obtiveram em seus ensaios uma redução na resistência à compressão de 16,6% para 50% de adição de ARC e 26,4 % para substituição de 100%. Resultados mais drásticos foram encontrados na pesquisa de YANAGIBASHI *et al.* (2005) onde o percentual de substituição de 100% levou a uma queda na resistência dos concretos em até 76%.

TABSH e ABDELFATAH (2009), comenta que a redução da resistência à compressão de concretos com ARC é mais notável quando analisados resultados de concretos de resistência convencional. Para concretos de alta resistência, de 50 MPa, por exemplo, é possível se obter resultados de resistências compatíveis com os obtidos utilizando agregados naturais. Neste sentido, é importante destacar que a fragilidade dos concretos de resistência convencional está vinculada diretamente a zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado, já para concretos de maior resistência, a fragilidade está ligada ao próprio agregado. Deste modo, torna-se sensato correlacionar a queda na resistência a compressão dos concretos com AGRC em relação aos concretos com agregado natural (NA) de resistência convencional, à existência de uma segunda zona de transição AGRC, presente na interface entre a argamassa antiga e agregado do concreto de origem.

Na literatura, existem inúmeras pesquisas acerca do melhoramento da resistência à compressão do concreto com ARC. Neste sentido, observa-se de modo geral, que através da otimização da distribuição granulométrica dos agregados e correção da relação água cimento, é possível a confecção de concretos com maiores teores de substituição de AGRC, mantendo a resistência requerida.

2.1.4.2. Resistência tração

CAKIR (2014) determinou, através de ensaios de tração por compressão diametral, que a resistência à tração dos concretos com adição de agregado reciclado é menor em relação aos concretos convencionais. O autor também comenta que a resistência à tração para concretos com ARC aumenta em função de sua resistência a compressão, como pode ser verificado na Figura 2-3.

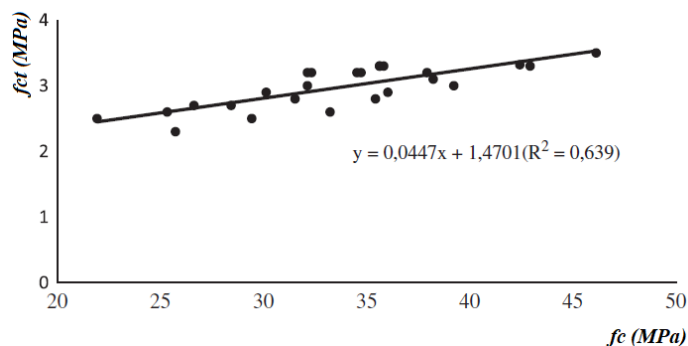


Figura 2-3 - Relação entre tração e compressão, adaptado de CAKIR (2014)

SILVA (2015), concluiu, em uma vasta revisão da literatura acerca das propriedades do concreto com ARC, que a resistência à tração diminui com o aumento da adição de ARC. No entanto, o autor salienta que este efeito pode ser controlado através da seleção apropriada dos agregados reciclados utilizados, da melhor distribuição granulométrica das partículas e de processos de misturas adequados.

O trabalho realizado por KUBISSA (2015), obteve, apenas através da otimização da distribuição granulométrica dos agregados reciclados, resultados satisfatórios para a resistência à tração do material. Neste estudo o concreto feito com o uso de ARC atingiu maior resistência à tração do que o concreto sem ARC. O melhor resultado obtido foi o aumento de 19,8% na resistência à tração de concretos com substituição de 30% de ARC. Autores como DUAN e POON (2014) relatam um melhor desempenho da resistência à tração do concreto com AGRC, em relação a concretos com agregados naturais, e atribuem esta melhora a irregularidade da superfície dos grãos, que possibilita uma melhor aderência entre a matriz cimentante e o ARC.

BUI *et al.* (2017) introduziram um novo método de mistura para a confecção de concretos e, através do melhoramento da granulometria dos ARC, mostram que é possível a confecção de concretos reciclados com propriedades que se aproximam bastante das encontradas utilizando apenas AN, como mostra a curva tensão deformação traçada pelo autor na Figura 2-4. Os autores relatam uma melhora de cerca de 5% na resistência a tração com a utilização do novo método de mistura.

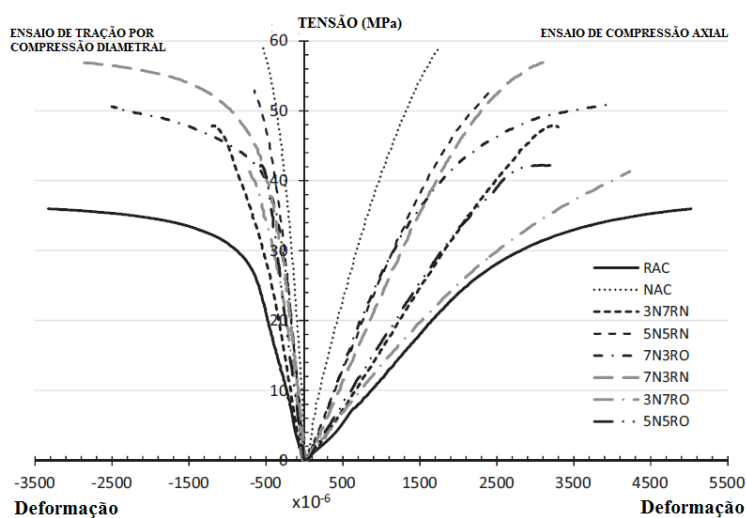


Figura 2-4 Curva tensão deformação traçada a partir do monitoramento de ensaios de compressão axial e tração diametral, adaptado de BUI *et al.* (2017)

O trabalho de BUI *et al.* (2017) contou com a execução de 6 traços, onde se variou, além do percentual de substituição ARC, a granulometria dos agregados. Para via de análise, as séries de nomenclatura RAC e NAC, correspondem aos traços de referência, com 100% e ARC e 100% de AN, respectivamente, na fração graúda. Para as séries com substituição, as terminadas em “N”, indicam a presença do método diferenciado de mistura de agregados, e as terminadas em “O”, indicam mistura convencional. Os autores ainda variam a taxa de substituição de ARC em faixas 30, 50 e 70%.

2.1.4.3. Módulo de elasticidade

Segundo SILVA (2016), os fatores que podem afetar o módulo de elasticidade de concretos com AGRC são a taxa de substituição, tamanho e qualidade dos agregados, procedimento de mistura, condições de cura, adições e teor de de adições e idade do concreto. DHIR e PAINE, (2004) observaram que a adição de até 30% AGRC exerce pouco efeito sob o módulo de elasticidades de concretos. No entanto, trabalhos como de XIAO *et al.* (2005) e GOMES e BRITO (2009), concluíram que concretos com 100% AGRC podem apresentar redução de 20 a 40 % nos resultados de módulo de elasticidade comparados com concretos feitos integralmente com agregados naturais. A Figura 2-5 mostra o decréscimo do módulo de elasticidade em função da adição de AGRC.

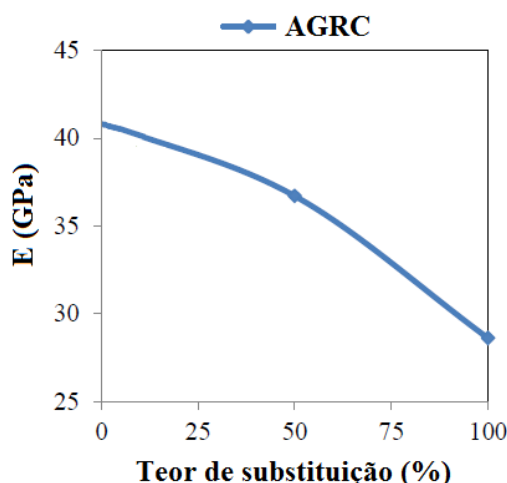


Figura 2-5 - Comportamento do módulo de elasticidades do concreto em função da adição de AGRC, adaptado de GOMES e BRITO (2009)

Estudos realizados por BEHERA *et al.* (2014), indicam que módulo de elasticidade dos concretos com AGRC é afetado pela porosidade intrínseca à argamassa aderida. Além disso,

o autor comenta acerca das características da zona de transição (ZTI) entre a argamassa antiga e o agregado natural do concreto de origem, que possui ligação fraca devido à presença de vazios e fissuras causadas pelo processo de beneficiamento. Quanto as ZTI's, OLONGO e PADAYACHEE N (2012) e LEE e CHOI (2013) relatam ainda a existência de duas zonas de transição no concreto reciclado, uma oriunda da interface entre o agregado e a antiga argamassa, e outra entre o agregado reciclado e a nova matriz cimentante, como pode ser verificada na Figura 2-6.

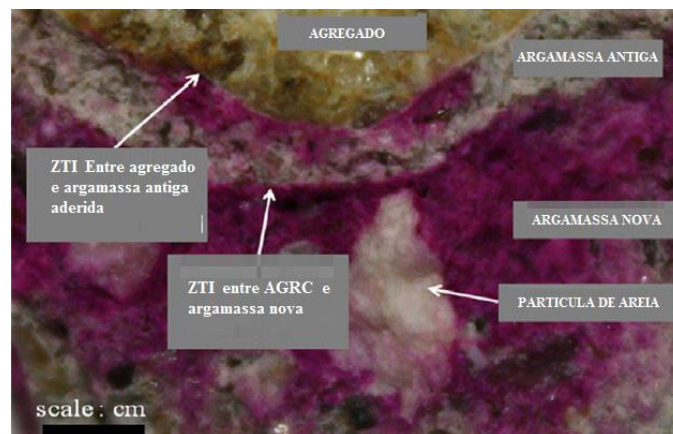


Figura 2-6 - Zonas de transição do concreto com agregado reciclado após coloroção com solução de fenolftaleína, adaptado de LEE e CHOI (2013)

De acordo com MEHTA e MONTEIRO (1994), as ZTIs servem como ponte entre a matriz de argamassa e as partículas de agregado graúdo. Mesmo quando os componentes individuais são de alta rigidez, a rigidez do concreto pode ser baixa devido a rupturas nessas pontes, isto é, vazios e microfissuras na zona de transição interfacial, que não permitem transferência de tensão. Levando em consideração a natureza fraca entre as zonas de transição do concreto com agregado reciclado, é justificável a redução do módulo de elasticidade do material com o incremento de AGRC.

2.2. Arrancamento em concreto armado

Conectores metálicos, usualmente, são utilizados para a transferência de esforços entre elementos estruturais. Estes dispositivos podem ser instalados antes ou após a concretagem, podendo ser do tipo pré-instalado ou pós-instalado. Existe uma grande variedade de conectores metálicos, e além do modo de instalação, eles também se diferem pelos mecanismos de transferência de esforços, como pode ser consultado na Figura 2-7 e Figura 2-8.

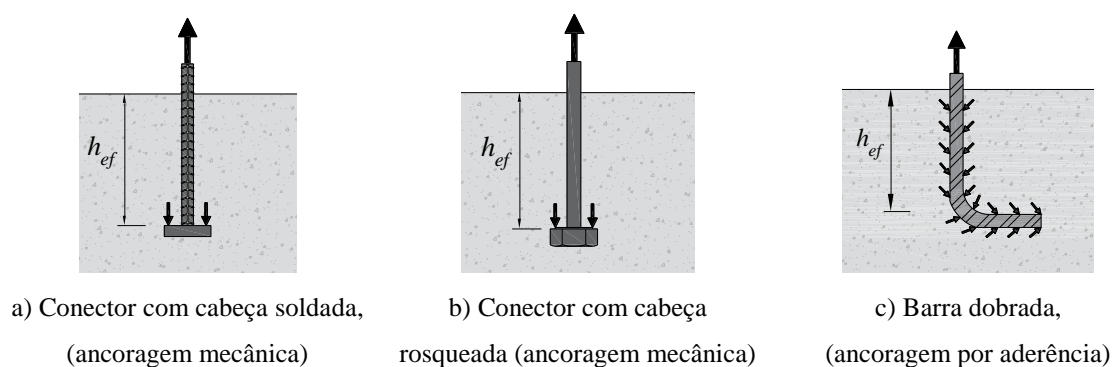


Figura 2-7- Tipos de conectores pré-instalados adaptado de COSTA H. D. (2016)

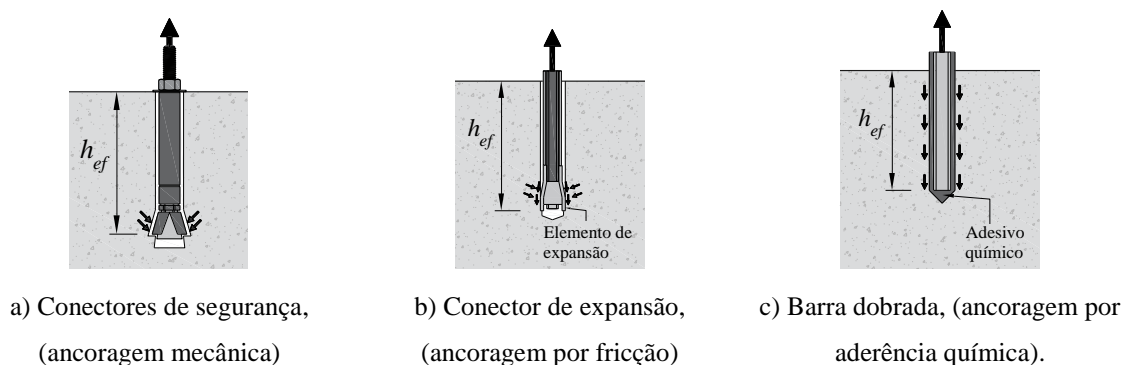


Figura 2-8 - Tipos de conectores pós-instalados adaptado de COSTA H. D. (2016)

Conectores são comumente caracterizados pelo seu embutimento de ancoragem nominal. Este embutimento é a profundidade necessária para a instalação do conector, sendo ele pré-instalado ou pós-instalado. De acordo com ACI 318 (2014) o h_{ef} , é o embutimento ao qual se desenvolve os mecanismos de transferência dos esforços ao concreto. Para conectores com cabeça, o comprimento de embutimento efetivo é medido da superfície superior da cabeça do conector à superfície do concreto

No que tange os conectores com cabeça pré-instalados submetidos à tração, o mecanismo de transferência ocorre principalmente pela ancoragem mecânica, que ocorre devido o contato direto da cabeça do conector com o concreto. Esta interação pode gerar grandes tensões de compressão localizadas na região de confinamento (RAPOSO *et al.*, 2005),

Outro mecanismo de transferência de esforços dos pinos metálicos é a ancoragem por aderência, que é promovido, principalmente, pelo atrito entre as nervuras da haste metálica e o concreto. WRIGHT e McCABE (1997), em termos de ancoragem, mensuram que contribuição da aderência da barra é cerca de 25%, sendo os outros 75% resistentes atribuídos à ancoragem mecânica provocada pela cabeça do conector.

2.2.1. Comportamento de conectores com cabeça embutidos em concreto armado

2.2.2. Conectores instalados em concreto não fissurado

A cerca do comportamento de conectores metálicos instalados em concretos não fissurados, é necessário compreender o mecanismo de transferência de esforços intrínseca à ligação. Quanto ao estado limite último, conectores possuem 5 modos de ruptura: ruptura pelo escoamento da barra do conector, ruptura do cone de concreto, ruptura por destacamento lateral, ruptura por deslizamento e ruptura por fendilhamento. Os modos de ruptura estão ilustrados na Figura 2-9

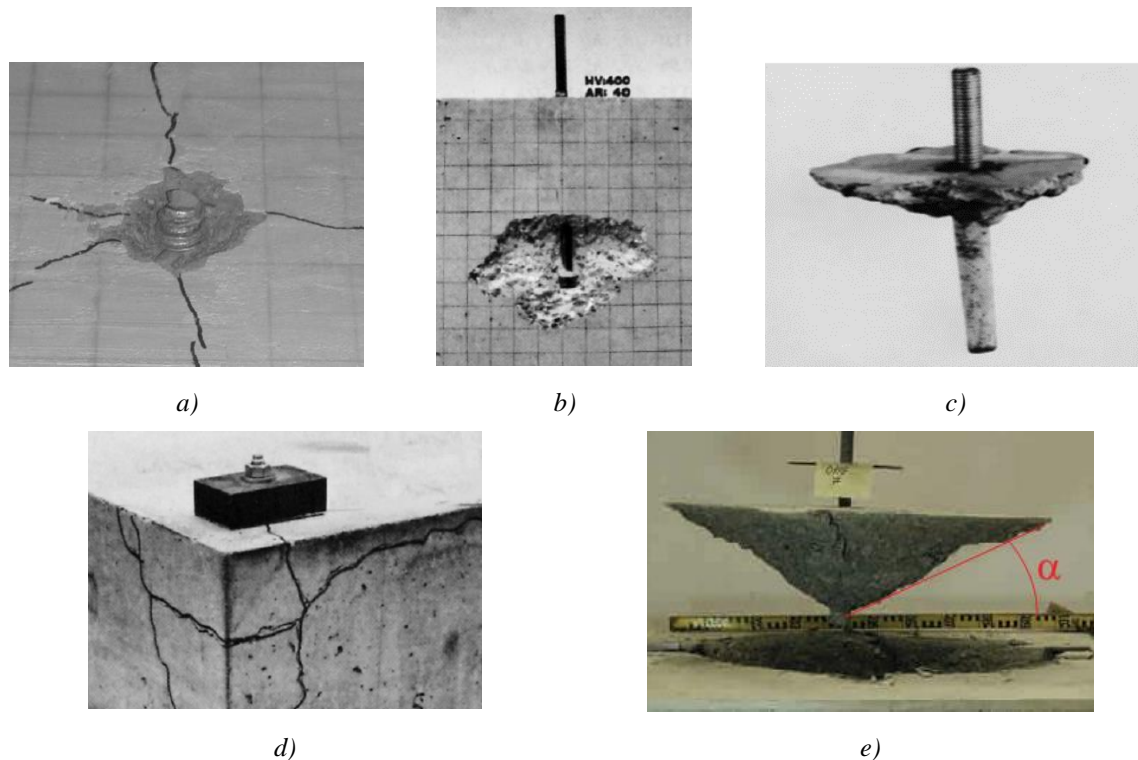


Figura 2-9 – Modos de ruptura de conectores submetidos à tração: a) *Ruptura do aço do conector* (PETERSEN *et al.* 2013); b) *Ruptura por destacamento lateral* (ELIGEHAUSEN *et al.*, 2006); c) *Ruptura por deslizamento* (ELIGEHAUSEN *et al.*, 2006); d) *Ruptura por fendilhamento do concreto* (ELIGEHAUSEN *et al.*, 2006); e) *Ruptura do cone de concreto* (NILSSON e ELFGREN, 2009)

ELIGEHAUSEN *et al.* (2006), no que diz respeito à ruptura por escoamento do aço, relatam que a falha ocorre quando o esforço de tração supera a carga última ($N_{u,fy}$) e consequentemente a barra se rompe por estrição do aço, os autores indicam que a resistência quanto a este modo de ruptura pode ser calculada pela Equação 2-1.

$$N_{u,fy} = f_y \times A_s \quad \text{Equação 2-1}$$

Onde:

$N_{u,fy}$ é em carga de ruptura por escoamento do conector (N);

f_y é tensão de escoamento do aço (N/mm²);

A_s é a área da seção transversal da barra de aço do conector (mm²);

A ruptura por escorregamento ou falha de ancoragem é caracterizada pelo deslizamento entre o conector metálico e o concreto. Segundo ELIGEHAUSEN *et al.* (2006) este tipo de ruptura

é comum em conectores do tipo pós-instalados. O Autor também comenta que quando a distância do conector até a borda do elemento de concreto é menor que $1,5h_{ef}$, pode ocorrer a ruptura por destacamento lateral da peça. A ruptura ocorre pela propagação de tensões transversais oriundas do mecanismo de ancoragem quando solicitado à tração. A propagação destas tensões transversais também pode ocasionar a ruptura por fendilhamento, ao passo que o fenômeno ocorre pela formação de fissuras paralelas ao conector. O fendilhamento é comumente observado em estruturas de pequena espessura ou em conectores instalados próximos as bordas.

A ruptura do cone de concreto é caracterizada pela formação de uma fissura circunferencial ao conector. Este modo de ruptura ocorre pelo acúmulo de tensões na cabeça do conector, que gera solicitações de tração no concreto, e provoca a fissuração do material. Quando esta solicitação supera a resistência à tração do material ocorre o destacamento do cone de concreto. A fissura que delimita o cone se inicia na cabeça do conector, onde o distúrbio de tensões é mais intenso, e se propaga até a superfície do elemento de concreto numa inclinação (α) (ELIGEHAUSEN *et al.*, 2006).

É fundamental conhecer a resposta carga-deslocamento a fim de avaliar a ductilidade no estado limite último na ligação conector-concreto. O comportamento carga-deslocamento pode variar consideravelmente para cada modo de ruptura. Na Figura 2-10, pode ser verificado o comportamento da curva carga-deslocamento para cada modo de ruptura (ELIGEHAUSEN *et al.*, 2006).

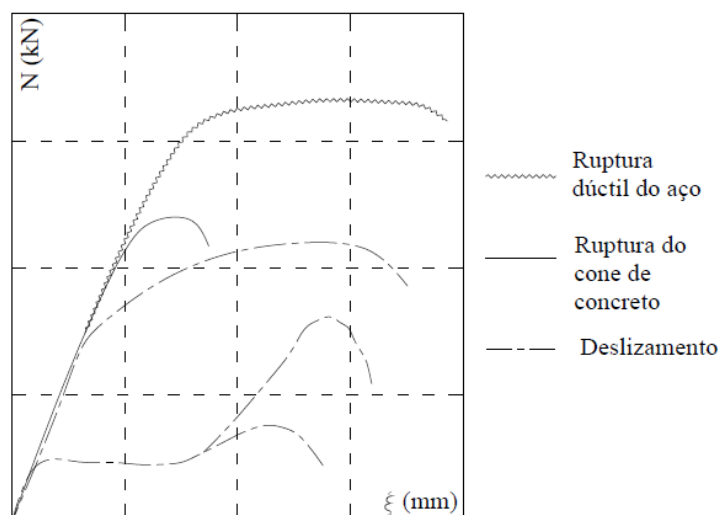
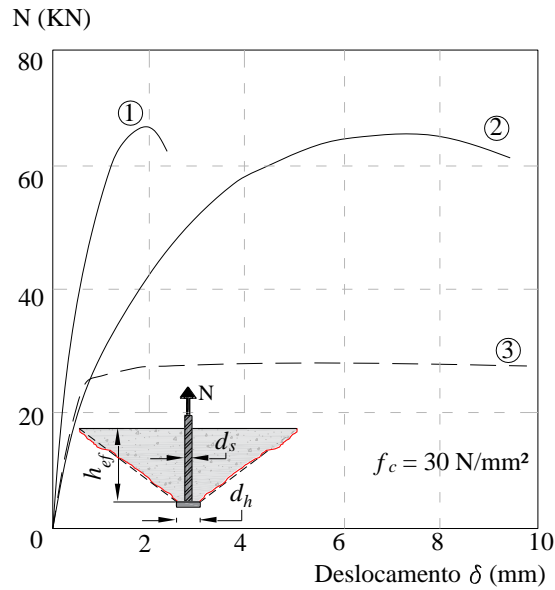


Figura 2-10 – Curva carga-deslocamento idealizada para conectores submetidos à tração, adaptado de FUCHS *et al.*, (1995)

No caso de ruptura por deslizamento, a relação carga-deslocamento cresce continuamente e a carga de ruptura ocorre com elevado deslocamento. Nos casos onde a capacidade resistente do concreto é menor do que a do dispositivo metálico, ocorrerá a ruptura frágil do conjunto conector-concreto, caracterizada pela formação do cone de concreto. Na condição em que a resistência do concreto e o embutimento do conector são suficientes, ainda pode ocorrer a ruptura dúctil da haste.

Conforme o ACI 355.1R (1991), no caso da ruptura do conector, a ductilidade dependerá da relação entre tensão última da ligação e a tensão de escoamento do aço. O deslocamento inelástico da cabeça do conector é esperado devido às deformações no concreto sob a cabeça em pequenas cargas. Quando se aumenta a área de ancoragem mecânica, há uma redução no deslocamento, mas exerce pouca influência na resistência última de tração da haste, como pode ser verificado na Figura 2-11.



Linha	Tipo de conector	d_s (mm)	d_h (mm)	h_{ef} (mm)	Modo de ruptura
①	com cabeça	19	32	80	cone de concreto
②	de segurança	12	18	80	cone de concreto
③	com cabeça	9,5	19	68	escoamento do aço

Figura 2-11 – Relação carga-deslocamento de conectores com cabeça e conector de segurança, (COSTA, H. D., 2016 apud REHM *et al.*,1988)

O conhecimento do plano de ruptura é fundamental para a determinação da resistência à tração de conectores. Autores como ELIGEHAUSEN e SAWADE (1989), ELIGEHAUSEN *et al.* (1992) e OZBOLT e ELIGEHAUSEN (1990), relatam que a fissura de ruptura ocorre a 35° em relação a cabeça do conector. Os autores também comentam que a inclinação não depende do embutimento efetivo, como pode ser verificado nos resultados da pesquisa de FUCHS *et al.*, (1995), na Figura 2-12.

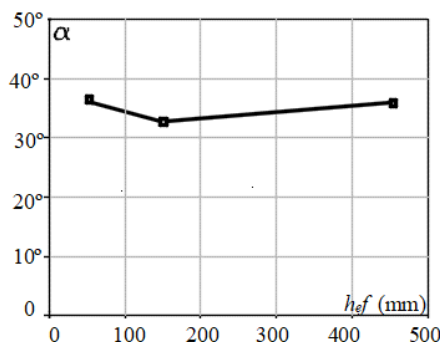


Figura 2-12 – Ângulo do cone de concreto em função do embutimento de ancoragem efetivo, adaptado de FUCHS *et al.* (1995)

A pesquisa de ELIGEHAUSEN e SAWADE (1989) permitiu compreender melhor a geometria e formação do plano de ruptura, através da instrumentação com extensômetros posicionados perpendicularmente ao longo da projeção da fissura do cone de concreto. Os resultados obtidos para estágios de carregamento de 30% e 90% da carga de ruptura são mostrados na Figura 2-13, observa-se que com o acréscimo de carga, a região com grandes gradientes de deformações se desloca da área carregada (cabeça do conector) em direção à superfície de concreto. Com base nas deformações medidas, os autores calcularam a distribuição de tensões na superfície de ruptura do cone, conforme mostrado na Figura 2-13a. A redistribuição de tensões provocada pelo crescimento estável da fissura pode ser observada pela mudança de posição do ponto máximo de tensões de tração em direção à superfície do concreto, conforme aumenta o carregamento. Os resultados mostram que a fissura que define o plano de ruptura surge com cerca de 30% da carga última, inicialmente próxima à cabeça do conector, e segue em direção à superfície do concreto. A Figura 2-13b mostra que resistência máxima ao arrancamento ocorre quando o comprimento da fissura (x) alcança aproximadamente 45% do seu comprimento total (l_b), o que significou uma área fissurada na superfície do cone de 50% para o conector com comprimento de ancoragem 130 mm.

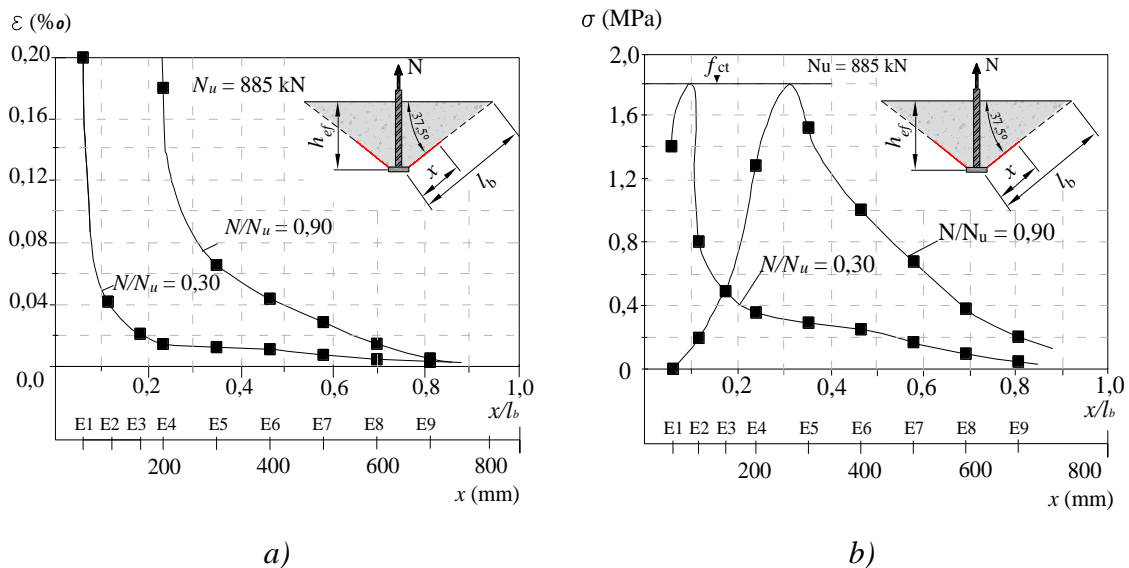


Figura 2-13 – Resultados da extensômetro do cone de concreto (COSTA, H. D., 2015 apud ELIGEHAUSEN e SAWADE, 1989): a) Distribuição das deformações perpendiculares a superfície; b) Distribuições de tensões de tração perpendicular à superfície de ruptura

2.2.3. Comportamento de conectores instalados em concreto fissurado

A maior parte dos modelos teóricos disponíveis na literatura são baseados em resultados experimentais de conectores embutidos em concreto não fissurado. Entretanto, em termos práticos, há muitas situações em que o concreto de embutimento pode apresentar fissuração, em peças submetidas a flexão por exemplo, ou ainda, fissuras oriundas da retração do concreto. A nível de pesquisa, ensaios de tração de conectores em concreto fissurado são realizados por indução de abertura de fissuras (w), de (ELIGEHAUSEN *et al.*, 2004).

Quando estas fissuras ocorrem na região de instalação do conector, o comportamento carga-deslocamento, bem como a resistência última de tração serão influenciados consideravelmente. A exemplo disso, podemos citar o trabalho realizado por FURCHE e DIETERLE (1986), que através de um programa experimental estabelece a comparação entre os resultados de ensaios realizados em concreto fissurado e não fissurado. Como pode ser verificado na Figura 2-14, o concreto fissurado apresenta perda de resistência.

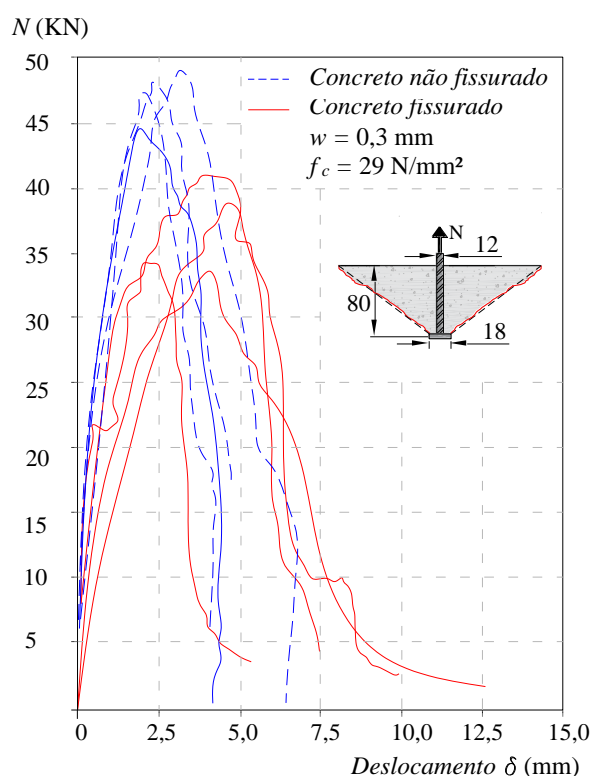


Figura 2-14 - Curva carga-deslocamento de conectores com cabeça submetidos à tração em concreto fissurado e não fissurado, adaptado de FURCHE e DIETERLE, (1986)

Através uma análise numérica por elementos finitos não linear, ELIGEHAUSEN e OZBOLT (1992) forneceram uma base para melhor compreender a perda de resistência do cone de

concreto em concreto fissurado. As análises previram que o formato do cone de concreto na ruptura é o mesmo tanto para concreto fissurado, como para concreto não fissurado. O modelo teórico pressupõe que em concreto não fissurado, os esforços de reação se distribuem radialmente simétricos no concreto, e para concreto fissurado, apenas uma pequena fração dos esforços é absorvida pelo material na direção da fissura.

2.2.4. Fatores que influenciam na resistência ao arrancamento de conectores embutidos em elementos de concreto

2.2.4.1. Efeitos de espaçamento

A capacidade máxima de tração de conectores isolados é desenvolvida quando há um espaçamento suficiente entre conectores adjacentes ou borda livre do elemento de concreto. Em relação ao espaçamento (s) entre conectores, de acordo com o ACI 318 (2014), a inclinação do ângulo de ruptura (α) será cerca de 35° e a projeção do cone de ruptura na superfície do concreto tem um diâmetro de $3h_{ef}$, então, para que um grupo de conectores desenvolva sua carga máxima de tração é necessário haver um espaçamento entre conectores de $3h_{ef}$, de modo que se evite a sobreposição dos cones de concreto de conectores adjacentes, como ilustrado na Figura 2-15.

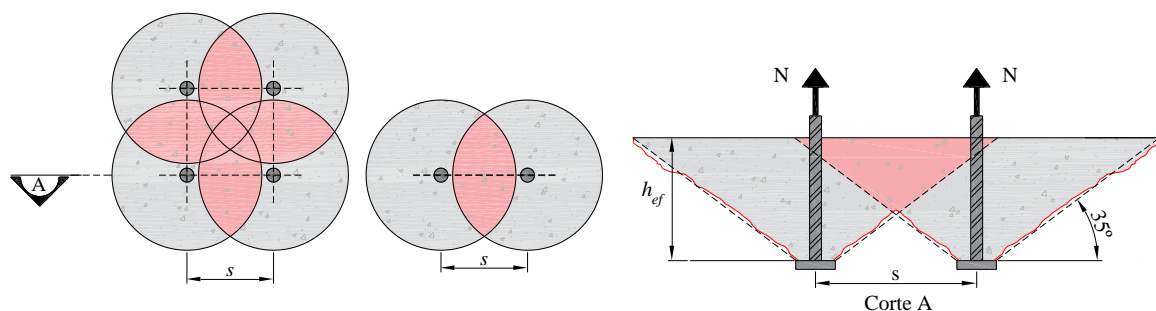


Figura 2-15 – Projeção do cone de ruptura de 4 e 2 conectores com pequeno espaçamento, adaptado de COSTA, H. D. (2016)

Se o espaçamento for obedecido, não havendo sobreposição de cones de ruptura, a capacidade resistente será equivalente a somatória das resistências máximas de cada conector. Entretanto, se a distância (s) que separa dois conectores for inferior ao limite de $3h_{ef}$, a resistência do grupo de conectores será reduzida.

É recomendável que os conectores sejam instalados distantes da borda do elemento de concreto em uma distância mínima (c) de $1,5h_{ef}$ (OZBOLT e ELIGEHAUSEN, 1990). Caso a distância de borda não seja obedecida, a capacidade resistente da ligação sofre redução uma vez que a projeção do cone de concreto é interrompida, neste caso pode ocorrer a ruptura prematura por destacamento lateral ou fendilhamento da peça de concreto.

2.2.4.2. Comprimento de ancoragem (efeito escala)

Segundo BAZANT *et al.* (1984) o efeito de escala é definido pela comparação da resistência nominal (tensão nominal na ruptura, s_N) de estruturas geometricamente similares de diferentes tamanhos. Ainda, o efeito de escala é compreendido como dependente de s_N em relação ao tamanho d da estrutura, onde d é uma característica dimensional do elemento estrutural, sendo compreendido como o embutimento de ancoragem (h_{ef}) do conector, e a tensão nominal na ruptura (s_N) é a razão entre a carga de ruptura do cone de concreto (N_u) e a área da superfície do cone de concreto (A_c).

O embutimento de ancoragem efetivo de conectores é um dos principais parâmetros que influenciam na carga de ruptura. Conforme ELIGEHAUSEN e SAWADE (1989) e ASHOUR e ALQEDRA (2005) a carga de ruptura do cone de concreto é proporcional a $h_{ef}^{1,5}$. O fato de o embutimento ser proporcional a potência de 1,5 evidencia o efeito de escala em conectores embutidos em concreto.

2.2.4.3. Diâmetro da cabeça do conector

Para analisar a influência da cabeça do conector OZBOLT *et al.* (1999) e OZBOLT *et al.* (2007) fizeram duas séries de análises onde variaram o tamanho da cabeça do conector, e mantiveram constantes as propriedades dos materiais e o embutimento. Os autores concluíram que a rigidez e a resistência do cone aumentam com o aumento da relação d_h/h_{ef} , os resultados das pesquisas podem ser consultados na Figura 2-16.

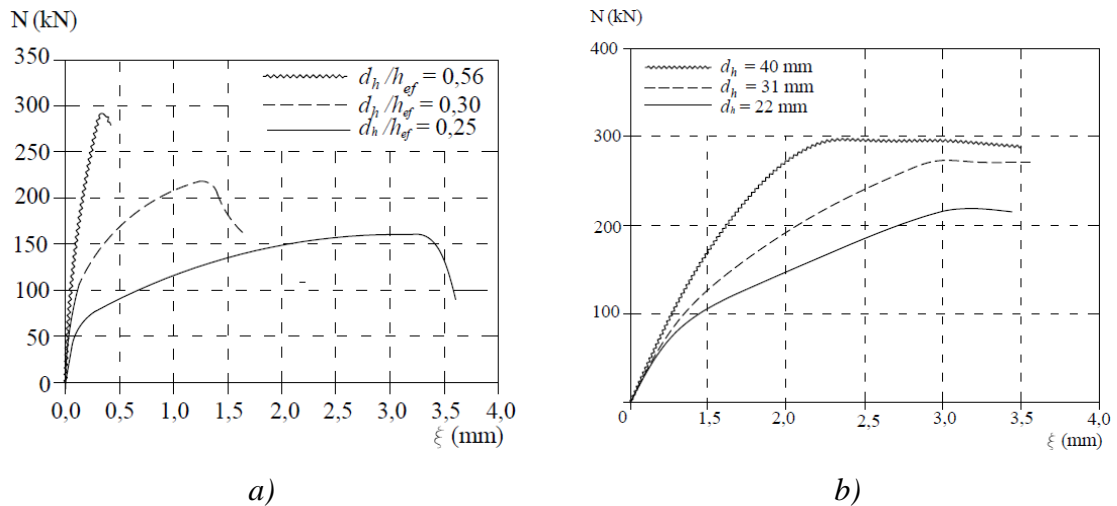


Figura 2-16 – Influência do diâmetro da cabeça do conector. a) Avaliação experimental, adaptado de OZBOLT et al. (1999); b) Avaliação numérica adaptado de OZBOLT et al. (2007)

2.2.4.4. Abertura de fissura

Comumente conectores são instalados em concreto fissurado, fato que pode mudar o comportamento e a resistência da ligação conector-concreto. ELIGEHAUSEN (1984), que é considerado uma das maiores referências na literatura acerca do arrancamento de pinos metálicos, relata que a abertura de fissuras promove a redução da capacidade resistente do cone de concreto. O decréscimo da capacidade de carga em relação a abertura de fissuras pode ser verificado na Figura 2-17.

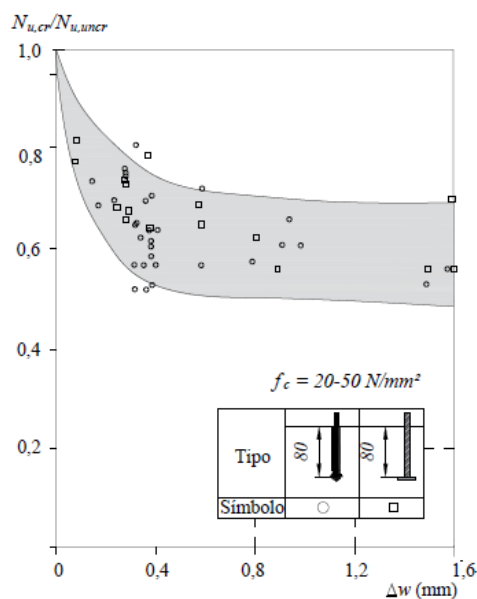


Figura 2-17 - Influência da abertura de fissura na resistência à tração de conectores de segurança e conectores com cabeça, adaptado de ELIGEHAUSEN (1984)

O trabalho de ELIGEHAUSEN e BALOGH (1995), onde foi plotado a relação $N_{u,cr}/N_{u,unck}$ em função da abertura de fissuras no concreto, pode ser consultado na Figura 2-18. Onde, $N_{u,cr}$ é a carga última de tração de conectores instalados em concreto fissurado, e $N_{u,unck}$ é a resistência teórica do conector instalado em concreto não fissurado, com $N_{u,unck}$ sendo calculado pela Equação 2-2.

$$N_{u,unck} = k \times \sqrt{f_{cc}} \times h_{ef}^{1,5} \quad \text{Equação 2-2}$$

Onde:

k é uma constante que depende do tipo de conector, sendo 13,5 para conectores pós-instalados e 15,5 para pré-instalados;

f_{cc} é a resistência à compressão do concreto em corpo de prova cúbico (N/mm²);

h_{ef} é o embutimento de ancoragem efetivo do conector (mm).

A Figura 2-18 mostra a correlação entre carga e abertura de fissuras, onde é possível observar que para abertura de fissuras, em média, de 0,3 mm, a carga última sofre um decréscimo de 25% em relação ao valor esperado para conectores instalados em concreto não fissurado. Os autores ainda relatam que a carga de ruptura é proporcional a abertura de fissuras de pequena espessura (0,2 a 0,4 mm) e atribuem essa proporcionalidade à transferência de tensões através do engrenamento dos agregados.

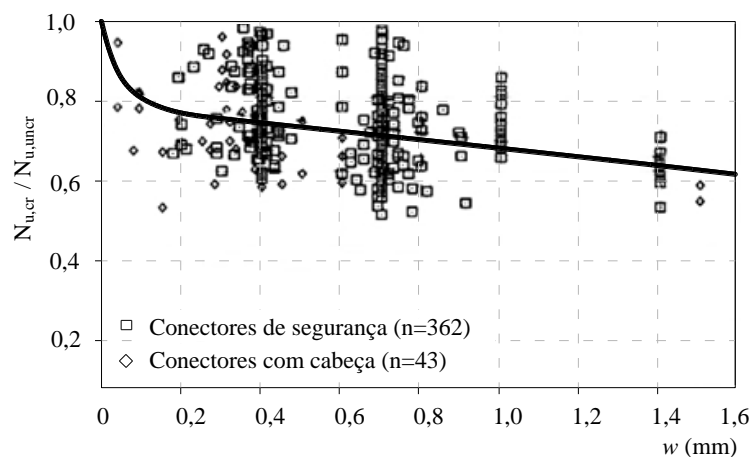


Figura 2-18 - Razão entre carga última de conectores instalados em concreto fissurado e instalados em concreto não fissurado em função da abertura de fissuras, adaptado de ELIGEHAUSEN e BALOGH (1995)

2.3. Recomendações normativas

2.3.1. Dimensionamento ao arrancamento segundo FIB BULLETIN 58 (2011)

A resistência característica à tração de um conector sem efeito de borda ou conectores adjacentes para a ruptura do cone de concreto é calculado conforme a Equação 2-3.

$$N_u = N_u^0 \cdot y_c \quad \text{Equação 2-3}$$

Sendo:

- a) N_u^0 é a resistência característica de um conector sem influência de borda e conectores adjacentes (N), e pode ser calculada através da Equação 2-4.

$$N_u^0 = k_1 \cdot \sqrt{f_c} \cdot h_{ef}^{1,5} \quad \text{Equação 2-4}$$

Onde:

f_c é a resistência à compressão do concreto (N/mm²);

h_{ef} é o embutimento de ancoragem efetivo do conector (mm);

k_1 é uma constante que leva em consideração o estado de fissuração do concreto com valores de 8,9 e 12,7 para concreto fissurado e não fissurado, respectivamente.

- b) O fator y_{re} considera o embutimento efetivo do conector metálico, sendo calculado por pelas Equação 2-5 e Equação 2-6

$$y_{re} = 0,5 + \frac{h_{ef}}{200} \begin{cases} \frac{1}{1} & \text{para } s_r < 150 \text{ mm (para qualquer } d_s) \\ \frac{1}{1} & \text{ou } s_r < 100 \text{ mm (para } d_s \leq 10 \text{ mm)} \end{cases} \quad \text{Equação 2-5}$$

$$y_{re} = 1,0 \begin{cases} \frac{1}{1} & \text{para } s_r \geq 150 \text{ mm (para qualquer } d_s) \\ \frac{1}{1} & \text{ou } s_r \geq 100 \text{ mm (para } d_s \leq 10 \text{ mm)} \end{cases} \quad \text{Equação 2-6}$$

Sendo s_r o espaçamento da armadura do elemento de concreto.

2.3.2. Dimensionamento ao arrancamento segundo ACI 318 (2014)

O modelo proposto assume um prisma de ruptura do concreto com ângulo de aproximadamente 35°, considerando conceitos da mecânica da fratura. A resistência de ancoragem à tração admitindo a ruptura do cone de concreto para um único conector pré-instalado, sem influência de borda ou conectores adjacentes, pode ser estimada pela Equação 2-7

$$N_u = N_u^0 \cdot y_c \quad \text{Equação 2-7}$$

Onde:

- a) N_u^0 é a resistência última de um conector considerando a ruptura do cone de concreto (N) e pode ser calculado a partir da Equação 2-8.

$$N_u^0 = k \cdot \sqrt{f_c} \cdot h_{ef}^{1,5} \quad \text{Equação 2-8}$$

Onde:

k é um fator que considera o tipo de conector, com valor de 10 para conectores com cabeça pré-instalados.

f_c é a resistência à compressão do concreto (N/mm²);

h_{ef} é embutimento de ancoragem efetivo do conector (mm).

y_c é um fator que considera a não fissuração do concreto, possuindo um valor de 1,25 para conectores pré-instalados. Salienta-se que este fator apenas deve ser considerado se for feita uma análise que indique que no local não haverá fissuras.

2.3.3. Dimensionamento à flexão NBR 6118 (2014)

Para o dimensionamento de elementos estruturais submetidos à força normal e a momentos fletores, a NBR 6118 (2014) propõem as seguintes hipóteses básicas para o cálculo de armaduras passivas:

- a) as seções transversais se mantêm planas após a deformação;

A armadura mínima de tração, em elementos estruturais armados ou protendidos deve ser determinada pelo dimensionamento da seção a um momento fletor mínimo dado pela Equação 2-9, respeitada a taxa mínima absoluta 0,15 %

$$M_{d,min} = 0.80 \cdot W_0 \cdot f_{ct,sup} \quad \text{Equação 2-9}$$

Onde,

W_0 é o módulo de resistência da seção transversal bruta de concreto, relativo á fibra mais tracionada

$f_{ctk,sup}$ é a resistência a característica superior do concreto a tração igual a $1,13f_{ct,m}$

$$f_{ct,m} = 0.3 \cdot \sqrt{f_{ck}^2} \text{ (MPa)}$$

2.3.3.2. Estado-limite de serviço

Nos estados-limites de serviço as estruturas trabalham parcialmente no estágio I e parcialmente no estágio II. A separação entre esses dois comportamentos é definida pelo momento de fissuração. Esse momento pode ser calculado pela seguinte Equação 2-10.

$$M_r = \frac{\alpha f_{ct} I_c}{y_t} \quad \text{Equação 2-10}$$

Onde,

α é o fator que correlaciona aproximadamente a resistência à tração na flexão com a resistência à tração direta, e igual a 1,5 para seções retangulares

y_t é a distância do centro de gravidade da seção à fibra mais tracionada

I_c é o momento de inércia da seção bruta de concreto

f_{ct} é a resistência a tração direta do concreto

3. Programa experimental

3.1. Considerações gerais

Este programa experimental tem como objetivo avaliar o comportamento à tração de conectores de aço isolados e pré-instalados em elementos de concreto armado, confeccionadas com diferentes proporções de agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC).

Os elementos foram dimensionados admitindo a ruptura do cone de concreto sem influência de borda. Para evitar a ruína prematura dos elementos por outros modos de ruptura, foram feitas verificações adicionais recomendadas pelo FIB BULLETIN 58 (2011).

As variáveis analisadas no programa experimental dos ensaios de arrancamento foram o teor de substituição do agregado graúdo natural (AGN) pelo AGRC e a variação da taxa de amadurecimento de flexão. A armadura de cisalhamento e comprimento de ancoragem (*hef*) foram constantes para todos os espécimes.

3.2. Caracterização dos materiais

3.2.1. Origem, beneficiamento, e caracterização do AGRC

O agregado reciclado de concreto utilizado nesta pesquisa é oriundo do descarte de corpos-de-prova e estruturas de concreto do Laboratório de Engenharia Civil da UFPA e de concreteiras da cidade de Belém. As amostras foram recolhidas aleatoriamente, apenas restringindo o agregado graúdo do concreto de origem, que deveria ser seixo ou brita. No momento da coleta, algumas precauções foram tomadas afim de evitar resíduos estranhos à finalidade da pesquisa. Salienta-se que, embora não se tenha feito mapeamento da resistência do concreto de origem, o material em questão tem característica de concreto estrutural.

O material recolhido foi beneficiado com a utilização do britador de mandíbula, e após a britagem foram feitos ensaios para verificar a granulometria do material, conforme a ABNT NBR NM 248 (ABNT, 2001). O processo de triagem dos AGRC gerou uma quantidade

significativa de agregados miúdos, provenientes, principalmente, da argamassa antiga aderida aos agregados naturais do concreto de origem. O material passante na peneira 4.8 mm foi removido da composição granulométrica do agregado reciclado utilizado nesta pesquisa.

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 o retido na 4,8 mm. A caracterização do AGRC utilizado na pesquisa pode ser consultado na Tabela 3-1. Avaliando a distribuição granulométrica do AGRC utilizado, segundo as recomendações da NBR 7211 (ABNT, 2005), observa-se que o material se enquadra dentro dos limites de tolerância, para a fabricação de concretos.

Tabela 3-1 – Caracterização AGRC

Peneiras	Massa retida	Retida	Retida acumulada	Prescrição normativa
(mm)	(g)	(%)	(%)	
76	0	0	0	NM 248 (ABNT, 2001)
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			
Modulo de Finura	6.96 mm			
Dimensão máxima	25 mm			
Massa unitária	1,11 Kg/dm ³			NM 45 (ABNT, 1995)
Massa especifica	2,62 g/cm ³			Método LEITE (2011)

As partículas AGRC, geralmente, possuem grande quantidade de vazios pela presença da argamassa aderida aos agregados graúdos do concreto de origem, por este motivo, o método proposto por LEITE (2001) foi utilizado para a determinação da densidade específica do

material. A autora considera em seu método a utilização de vácuo para a retirada do ar presente nas partículas do AGRC, o que faz desta metodologia a mais adequado para a determinação da massa específica do material.

3.2.2. Beneficiamento e Caracterização do agregado graúdo natural

Como agregado graúdo natural (AGN) foi utilizado a brita de origem basáltica, oriunda do município de Tucuruí no Pará. Para sua caracterização, tomou-se por base a determinação de sua massa específica obtida conforme a NBR NM 53 (ABNT, 2009) e massa unitária de acordo com NBR 7251 (ABNT, 1982). A caracterização do material pode ser consultada na Tabela 3-2. No que diz respeito a distribuição granulométrica dos agregados graúdos naturais, levando em consideração as recomendações da NBR 7211 (ABNT, 2005), nota-se que o material não atende os limites estabelecidos, sendo composto em sua maioria, por agregados de 12,5 mm de diâmetro. Este é um problema recorrente nos agregados naturais disponíveis na região.

Tabela 3-2 – Caracterização AGN

Peneiras	Massa retida	Retida	Retida acumulada	Prescrição normativa
(mm)	(g)	(%)	(%)	
76	0	0	0	NBR NM 248 (ABNT, 2001)
50	0	0	0	
38	0	0	0	
25	0	0	0	
19	1400	14	14	
12.5	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 g			
Módulo de Finura	6.96			
Dimensão máxima	25 mm			
Massa unitária	1,34 Kg/dm ³			NBR NM 45 (ABNT, 1995)
Massa específica	2,66 g/cm ³			NBR NM 52 (ABNT, 2002)

3.2.3. Caracterização do agregado miúdo

A areia utilizada neste estudo é proveniente dos curvões de rios próximos à cidade de Tucuruí. A caracterização do agregado miúdo pode ser consultada na Tabela 3-3.

Tabela 3-3 – Caracterização AM

Abertura das Peneiras (mm)	Massa Retida (g)	% retido	% retido acumulado
76	0	0	0
50	0	0	0
38	0	0	0
25	0	0	0
19	0	0	0
12	0	0	0
9.5	0	0	0
4.8	3.74	1	1
2.36	44.55	9	10
1.18	66.07	13	23
0.6	88.08	18	41
0.3	207.49	42	82
0.15	61.52	12	95
0.08	19.85	4	99
0	6.32	1	100
TOTAL	476.64	100	
Modulo de Finura	2.51		
Dimensão máxima	4.8		
Massa unitária	1.67 kg/dm ³		
Massa especifica	2.61 g/cm ³		

3.2.4. Caracterização do cimento Portland

O cimento utilizado nesta pesquisa foi o CP V ARI RS e a caracterização geral do aglomerante pode ser consultada na Tabela 3-4. No que diz respeito às características normatizadas, afere-se que o material cimentante se enquadra nos limites estabelecidos pela NBR 5736 (ABNT, 1991)

Tabela 3-4 - Características físicas e mecânicas do cimento Portland CP V ARI RS

Características	Fabricante	NBR 5736 (ABNT, 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	≥ 1,0
Tempo de Pega (h:m) Fim	04:35	≤ 10,0
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	-

3.3. Dosagem de concretos com 0, 30 e 100 % de AGRC

Para dosagem do concreto feito com AGN e AGRC foram adotadas as curvas de dosagem elaborada por SANTOS *et al.* (2015), que realizou um programa experimental utilizando o método de dosagem IPT/EPUSP proposto por HELENE e TERZIAN (1992).

A densidade dos materiais no método de dosagem IPT/EPUSP influencia diretamente no consumo de cimento do traço. Esta condição deve ser observada no procedimento de dosagem de concreto com substituição de AGRC, uma vez que temos densidades distintas para os diferentes agregados graúdos utilizados e, portanto, diferentes consumos para cada tipo de concreto.

Nesta pesquisa a substituição de agregados se dará na parcela graúdo dos agregados, neste sentido, trabalhou-se com três percentuais de substituição: o de referência, confeccionado com apenas agregados graúdos naturais; os com substituição parcial, onde os agregados graúdos reciclados correspondem à 30% da fração graúda de agregados; e a substituição total, que contém 100% de AGRC na composição granulométrica graúda do concreto. A escolha do teor de substituição parcial, igual a 30%, levou em consideração os resultados de outras pesquisas da literatura, que apontaram este percentual como a substituição que menos afeta as propriedades mecânicas do concreto.

A dosagem dos concretos pode ser consultada a Tabela 3-5, onde pode ser verificado a resistência (f_c) do concreto requerida aos 28 dias, teor de substituição de AGRC, relação água cimento (a/c), massa unitária (m), consumo de cimento (Cc). O teor de argamassa (α_{arg}) dos traços é igual a 51%.

Tabela 3-5 – Traço para concreto

AGRC	Teor de substituição (%)		
	0	30	100
$f_c = 30$ Mpa	Traço		
a/c	0,59	0,60	0,65
m	5,3	5,1	5,2
Cc (kg/m ³)	342,5	343,8	337,2

3.3.1. Propriedades no estado fresco

Através de um teste piloto, para elaboração prévia dos traços, observou-se que a ordem de mistura dos materiais influenciou diretamente na trabalhabilidade do material. Neste sentido, a melhor ordem de mistura observada para as misturas com 30% e 100% de AGRC podem ser consultadas na Figura 3-1a e Figura 3-1b, respectivamente.

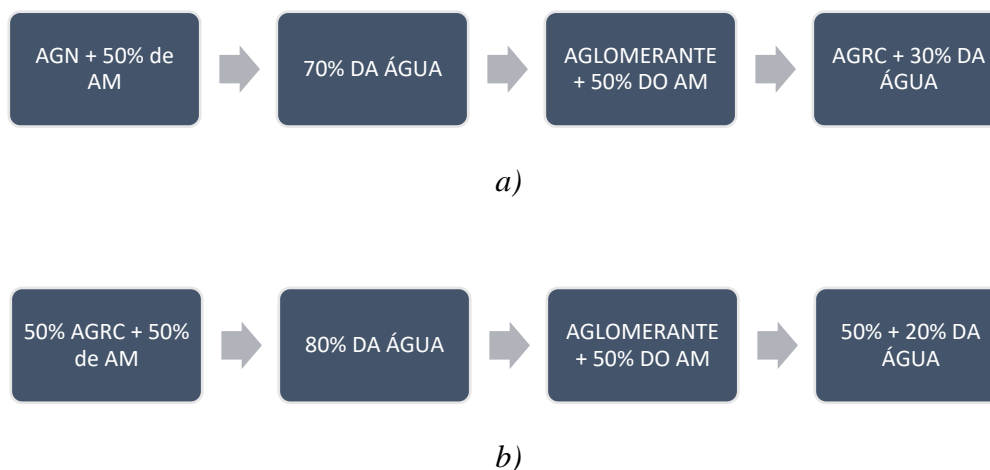


Figura 3-1 – Ordem ideal de mistura de materiais para a confecção os concretos: a) ordem de misturas para concretos com 30% de AGRC; b) ordem de mistura para concretos com 100%

Para verificar a consistência dos traços ensaiados foi realizado o ensaio de abatimento de tronco de cone, segunda a NBR 67 (ABNT, 1998) e para os traços obteve-se abatimentos de 15 ± 2 .

3.4. Concreto, moldagem e cura

Devido a limitação da capacidade do misturador os traços foram subdivididos em duas betonadas para cada teor de substituição. Cada betona foi suficiente para a confecção de dois espécimes e mapeamento dos traços e respectivos espécimes concretados pode ser consultado na Tabela 3-6.

Tabela 3-6 – Esquema de concretagem

Substituição (%)	Traço	Espécime	Concreto	
			a/c	Cc (kg/m ³)
0	T1-0	F1-0.5-0	0.59	342.5
		F3-2.2-0		
	T2-0	F2-1.1-0		
		F4-3.5-0		
30	T1-30	F2-1.1-30	0.60	343.8
		F3-2.2-30		
	T2-30	F1-0.5-30		
		F4-3.5-30		
100	T1-100	F2-1.1-100	0.65	337.2
		F3-2.2-100		
	T2-100	F1-0.5-100		
		F4-3.5-100		

Para confecção das formas foram utilizadas chapas de madeira compensada de 11 mm de espessura, com travamentos em ripas de madeira. As formas foram dispostas em tabuleiro e para garantir o alinhamento dos pinos e evitar excentricidades, uma estrutura aporticada em madeira foi confeccionada para acomodar as hastes metálicas, o sistema de escoramento e formas pode ser consultado na Figura 3-2.



a)



b)

Figura 3-2 – Sistema de formas: a) – *Vista sistema de formas*; b) – *Vista locação de armaduras e fixação de pinos metálicos*

Após a concretagem, os prismas foram mantidos em cura úmida pelas primeiras 24 horas, e após esse período foi feita a molhagem dos espécimes três vezes ao dia, durante sete dias. Para avaliar as características mecânicas do concreto empregado na confecção dos espécimes, utilizou-se a amostragem total, onde retirou-se 6 exemplares de corpos de prova cilíndricos moldadas segundo a NBR 5738 (ABNT, 2015) de cada betonada. As amostras em questão foram mantidas sob as mesmas condições de cura dos prismas concretados e foram utilizadas para ensaios de caracterização do concreto após 28 dias.

3.5. Características da série de ensaios de arrancamento

O programa experimental é composto por 12 conectores metálicos com cabeça, embutidos em prismas de concreto armado, confeccionados com diferentes proporções de agregado graúdo reciclado de concreto. Para verificar a influência do teor de substituição AGRC na resistência à tração dos conectores, optou-se por subdividir o programa em 3 séries de ensaios com 4 exemplares cada. Para cada série, foi atribuído diferentes percentuais de substituição de AGRC na composição granulométrica graúda do material e ainda, dentro de cada série de ensaio, foi atribuída diferentes taxas de armadura de flexão.

As dimensões dos elementos de concreto ensaiados foram 500 x 200 x 900 mm, com teor de substituição de agregado graúdo reciclado AGRC [0;100] %, resistência à compressão do

concreto (f_c) igual a 30 MPa e taxa de armadura de flexão ρ [0.5;3,5] %. Já os conectores metálicos possuem haste (d_s) e cabeça (d_h) igual a 16 e 51 mm, respectivamente. O embutimento efetivo (h_{ef}) do conector metálico nos prismas é 110 mm, a nomenclatura e as características gerais dos espécimes ensaiados podem ser consultadas na Tabela 3-7.

Tabela 3-7 - Características gerais das séries de ensaio

Nomenclatura		Conector			Armadura de flexão				Concreto						
		h_{ef} (mm)	d_s (mm)	d_h (mm)	\varnothing_f (mm)	$n\varnothing_f$	f_{ys} (MPa)	ρ_f %	AGRC %	f_c (MPa)					
SÉRIE 0	F1-0.5-0	110	16	50	10.0	6	500	0.5	0	30					
	F2-1.1-0				12.5	8		1.1							
	F3-2.2-0				20.0	6		2.2							
	F4-3.5-0				25.0	6		3.5							
SÉRIE 30	F1-0.5-30								10.0		6		0.5	30	
	F2-1.1-30								12.5		8		1.1		
	F3-2.2-30								20.0		6		2.2		
	F4-3.5-30								25.0		6		3.5		
SÉRIE 100	F1-0.5-100								10.0		6		0.5	100	
	F2-1.1-100								12.5		8		1.1		
	F3-2.2-100								20.0		6		2.2		
	F4-3.5-100								25.0		6		3.5		

F - ρ_s - AGRC

percentual de AGRC no concreto

taxa de armadura de flexão

série F (indica a variação da taxa de armadura de flexão)

A armadura de cisalhamento foi mantida para todos os espécimes. O arranjo geral das armaduras de flexão e cisalhamento podem ser verificados na Figura 3-3, e um exemplar executado pode ser consultado na Figura 3-4.

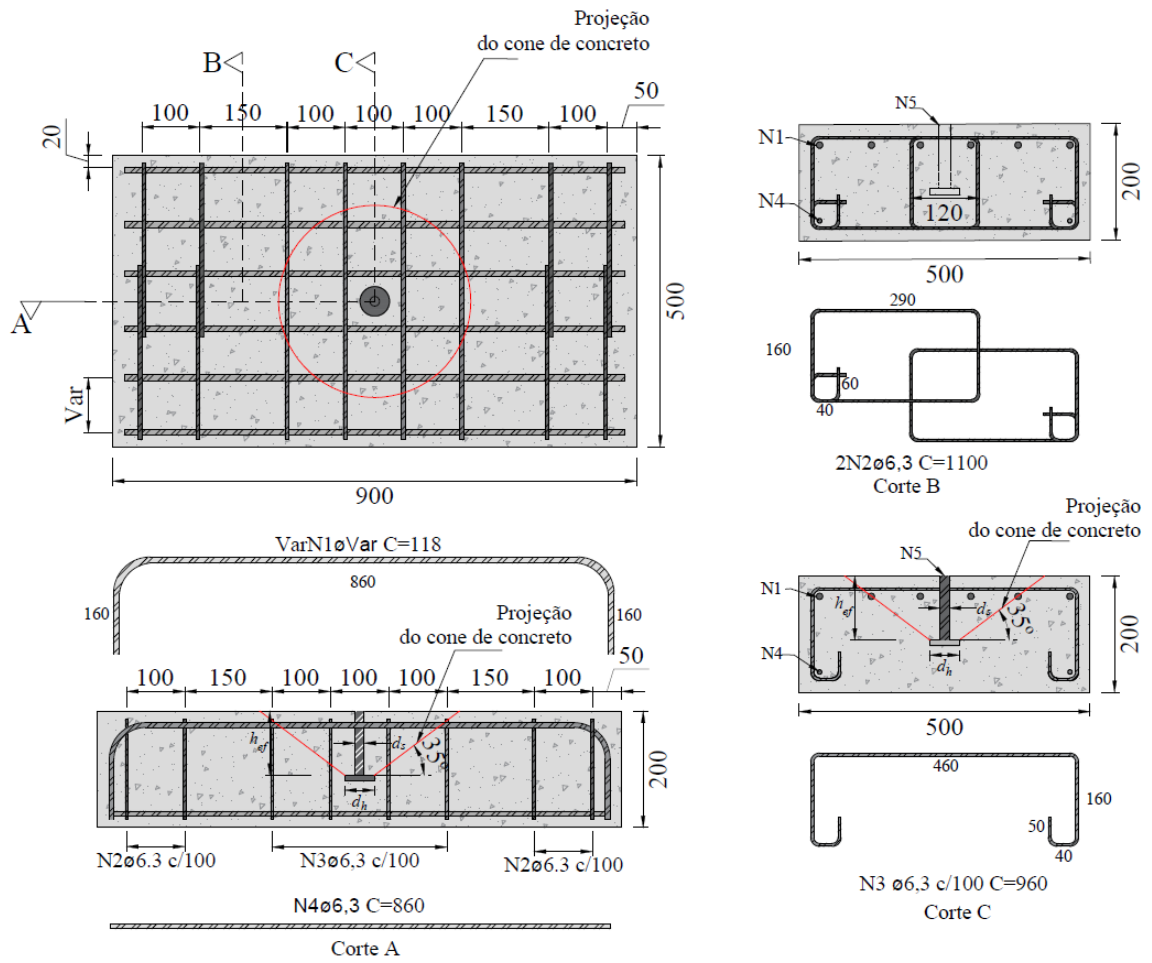


Figura 3-3 - Arranjo geral das armaduras de flexão e cisalhamento e posicionamento do conector nos espécimes



a)



b)

Figura 3-4 – Armaduras executadas, espécime do tipo F1-0.5

3.6. Confeção dos espécimes

3.6.1. Armadura de flexão e cisalhamento

As armaduras de flexão foram confeccionadas em aço CA-50 em barras de 10, 12,5, 20 e 25 mm, já as armaduras de cisalhamento foram fabricadas em aço CA-50, com barras de 6,3 mm de diâmetro. O processo de estocagem, corte, dobra e montagem foi executado de acordo com NBR 14931 (ABNT, 2004). As Figuras 3.7 a 3.10 apresentam o detalhamento das armaduras de flexão, cisalhamento e complementar dos espécimes para cada série de ensaio.

3.6.2. Conector

3.6.2.1. Fabricação

No dimensionamento dos conectores metálicos considerou-se as recomendações da ASTM A970 (2015), onde o diâmetro da cabeça do conector foi de mínimo 3 vezes o diâmetro da haste. Para a confecção dos conectores foram utilizados dois tipos de aço, sendo a haste do conector fabricada em barras de aço CA-50 de 16 mm, com 900 mm de comprimento, e a cabeça do conector confeccionada em aço CA-25, em discos com 10 mm de espessura e 51 mm de diâmetro. Além disso, uma porca foi soldada na extremidade da haste oposta a cabeça do conector, para garantir a ancoragem adequada da haste no ensaio de arrancamento. A Figura 3-5 detalha os conectores metálicos que foram utilizados.

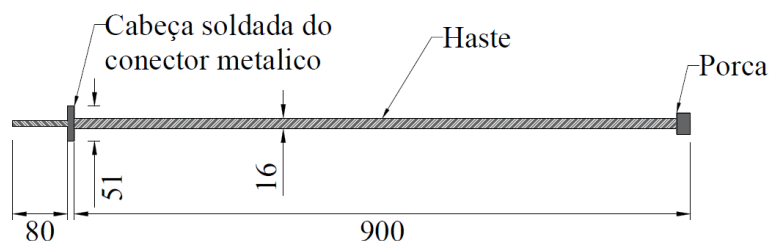


Figura 3-5 – Projeto executivo do conector metálico utilizado

A Figura 3-6 mostra o procedimento de conexão entre os componentes do sistema de ancoragem. Os discos para a confecção da cabeça do conector foram perfurados no centro e

em toda a sua espessura, de modo a garantir o transpasse da haste e possibilitar a execução da solda em ambas as faces da cabeça do conector.

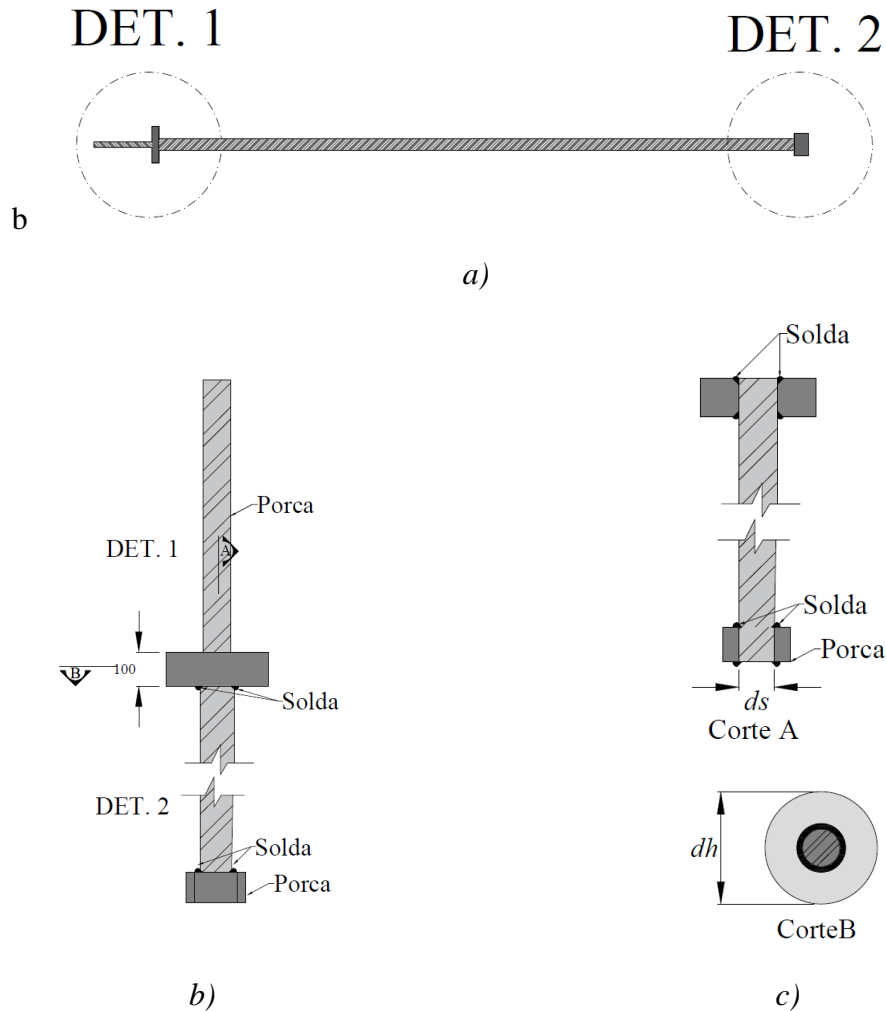


Figura 3-6 – Projeto executivo para soldagem de cabeça e porca na haste do conector *a) Vista do conector; b) Detalhamento da conexão cabeça e porca; c) Cortes A e B*

Para viabilizar o monitoramento do deslocamento do conector metálico durante a realização do ensaio, foi confeccionado um aparato metálico com 8 cm de comprimento, que foi soldado na cabeça do conector, de modo a complementar a altura total do prisma. No momento da instalação, o comprimento do aparato metálico foi isolado com poliestireno expandido, evitando assim o contato da barra metálica com o concreto. Após a desmoldagem dos prismas, o poliestireno foi removido, deixando a barra metálica livre de qualquer atrito com outro material. Este procedimento de instalação assemelha-se aos trabalhos realizados por COOK *et al.* (1992).

3.7. Instrumentação

3.7.1. Deslocamento vertical

Para a determinação dos deslocamentos verticais, foram utilizados três *LVDTs*, instalados em lugares distintos, como pode ser verificado na Figura 3-7.

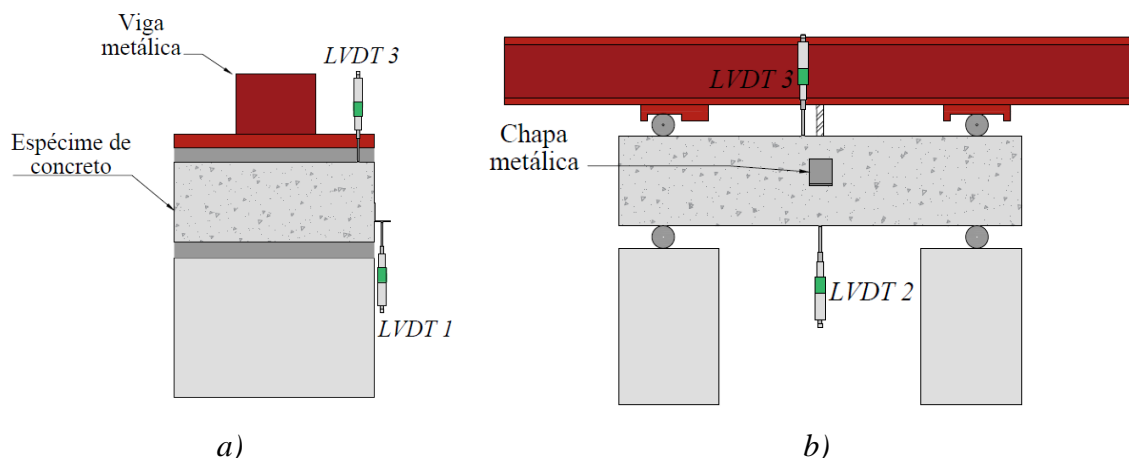


Figura 3-7 Disposição dos *LVDTs* para leitura de deslocamentos do conector metálico: a) Vista lateral do sistema de ensaio; b) Vista frontal do sistema de ensaio

O LVDT 1, foi posicionado na lateral do prisma, e serviu para medir os deslocamentos verticais ocasionados pela flexão da peça no momento do ensaio, já o LVDT 2, foi alinhado junto ao conector metálico, na face inferior do prisma, e permitiu monitorar o deslizamento da cabeça, o outro dispositivo (LVDT 3) foi posicionado na face superior do espécime ensaiado, dentro da região que compreende o cone de concreto, próximo a haste do conector. O posicionamento oportuno dos transdutores permitiu determinar o deslizamento do conector no concreto, que será dado pela diferença entre as leituras dos dispositivos de monitoramento.

3.7.2. Deformação nas armaduras, conector e concreto

Foram instalados extensômetros elétricos de superfície e de imersão para o monitoramento das deformações nas armaduras, conectores e concreto. A leitura das deformações e deslocamentos foi feita por sistema de aquisição de dados, conectado aos extensômetros e *LVDTs* por cabos elétricos. O projeto idealizado para a extensometria das peças pode ser consultado na Figura 3-8., e a Figura 3-9 mostra a extensometria executada.

3.7.2.1. Monitoramento dos conectores metálicos

Foram instalados 2 extensômetros elétricos, E_{sh1} e E_{sh2} , na haste do conector metálico, em seu sentido longitudinal e no trecho imediatamente fora do comprimento embutido. Estes extensômetros permitiram verificar as deformações da haste metálica devido aos esforços de tração. Os extensômetros monitoraram o mesmo trecho da haste metálica, sendo que as deformações consideradas neste trabalho são representadas pela média de leitura dos dois dispositivos.

Optou-se por não monitorar as deformações da haste do conector metálico no comprimento embutido, uma vez que estudos realizados por COSTA H. D. (2016), que avaliou as deformações em trechos distintos da haste metálica, em seu comprimento embutido e fora dele, constatou que não há diferença significativa em termos de deformação entre os trechos.

3.7.2.2. Monitoramento das armaduras de flexão

As deformações na armadura de flexão foram monitoradas por dois extensômetros E_{f1} e E_{f2} . Os dispositivos foram posicionados no sentido longitudinal das armaduras, no trecho médio de seu comprimento total da barra de flexão mais próxima a cabeça do conector. Os resultados de deformação adotados correspondem à média das leituras obtidas entre os dois extensômetros.

Para garantir a integridade da área monitorada, a instalação dos extensômetros obedeceu a um procedimento criterioso, que inclui fixação, proteção e isolamento da região onde foi instalado os extensômetros.

3.7.2.3. Monitoramento do concreto

Para monitoramento das deformações no concreto foi instalado um extensômetro na face lateral do espécime ensaiado E_c , na zona comprimida de concreto, para verificar a resposta do prisma a flexão.

A área que compreende o cone de concreto foi monitorada por quatro extensômetros, sendo que dois foram posicionados na seção longitudinal (CLA e CLB) e dois na seção transversal

do prisma (CTA e CTB). Além disso, os extensômetros CLB e CTB foram instalados próximo a cabeça do conector, e os extensômetros CLA e CTA foram posicionados próximos as armaduras de flexão. Todos os dispositivos foram posicionados perpendiculares a fissura teórica de formação do cone de concreto, que ocorre a uma inclinação de 35° em relação a cabeça do conector metálico, segundo o ACI 318 (2014).

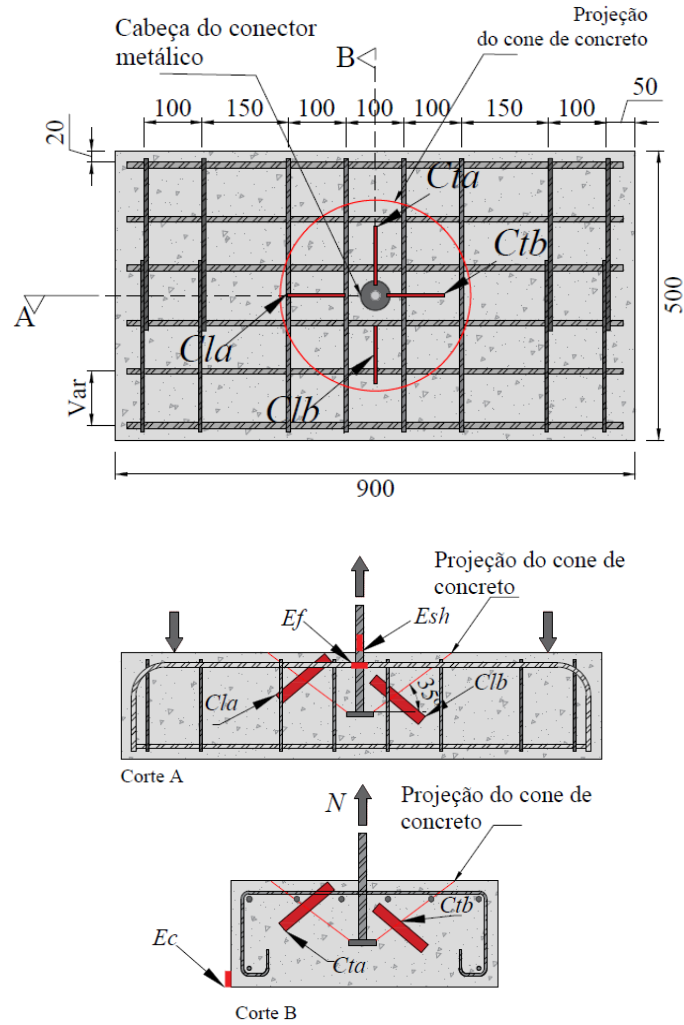


Figura 3-8 - Instrumentação dos espécimes



Figura 3-9 – Extensometria da armadura de flexão e cone de concreto

3.7.2.4. Monitoramento da abertura de fissuras

A abertura de fissuras foi monitorada manualmente com a utilização de um fissurômetro. Durante a execução do ensaio a superfície superior do prisma foi observada até o aparecimento da primeira fissura de flexão. A fissura foi monitorada, e a variação de sua abertura em função do acréscimo de carga foi registrada. Foi monitorada apenas uma fissura de cada prisma, durante todo o ensaio até a ruptura pelo arrancamento do cone de concreto.

3.8. Sistema de ensaio

A infraestrutura idealizada para a realização dos ensaios de arrancamento contém dois blocos de concreto, dois roletes metálicos para apoio dos espécimes e uma viga metálica de reação vazada, para possibilitar o transpasse da haste do conector metálico. Na viga de reação, para garantir um sistema isostático, foram fixados duas chapas de aço com diferentes tipos de restrição, que simularam apoios de 1° e 2° gêneros. A ligação entre esta estrutura e o espécime também foi feita através de roletes metálicos.

O sistema de aplicação de carga consistiu em um cilindro vazado hidráulico que foi acionado através de bomba hidráulica, e a leitura do carregamento foi feita por célula de carga conectada a um sistema de aquisição de dados. O conjunto cilindro hidráulico e celular de carga foram posicionados acima da viga de reação e ancorado à haste do conector metálico através de um sistema de encunhamento. Os dispositivos de aplicação e leitura de carga são ilustrados na Figura 3-10.

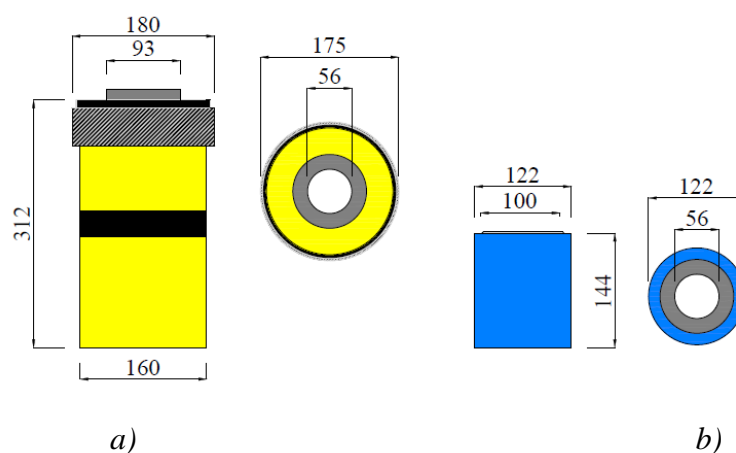


Figura 3-10 – Dispositivos de aplicação e leitura de carga: a) cilindro hidráulico vazado; b) célula de carga

O procedimento de ensaio consistiu, inicialmente, na aplicação de um pré-carregamento nos espécimes, com o objetivo de assegurar a estabilidade da peça, evitando assim possíveis movimentações que causassem excentricidade no momento do ensaio. Após o travamento dos prismas, iniciou-se a aplicação de carga de arrancamento através do tracionamento da haste metálica do conector. O incremento de carga foi de 5 kN, e a cada passe de carga foram feitas leituras das deformações no conector, armadura de flexão, área comprimida e cone de concreto. O sistema idealizado de ensaio pode ser verificado na Figura 3-11, e o modelo executada na Figura 3-12.

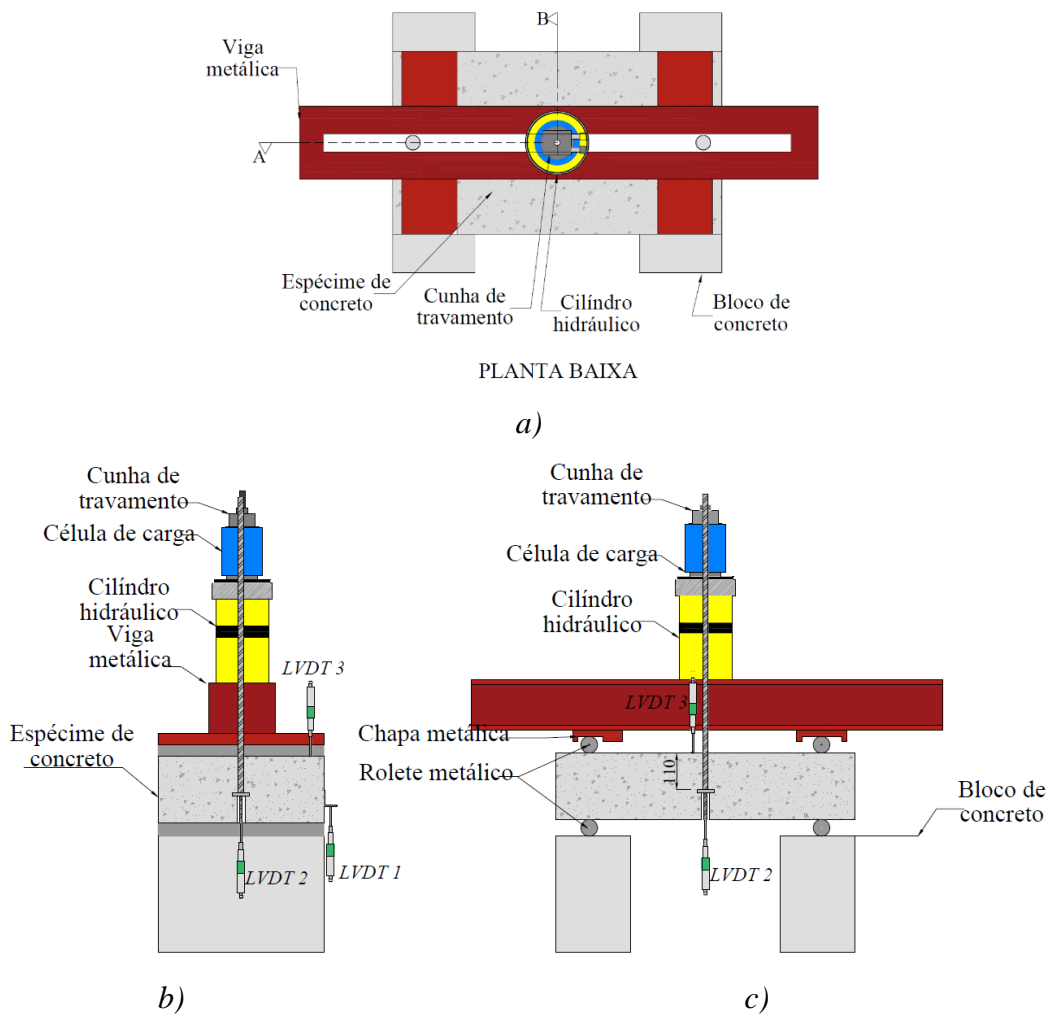


Figura 3-11 – Detalhamento do Sistema idealizado para os ensaios de arrancamento:
a) Planta baixa do sistema de ensaio; b) Vista – Corte A; c) Vista – Corte B



Figura 3-12 – Sistema de ensaio executado

4. Resultados

4.1. Propriedades mecânicas dos materiais

Os ensaios de caracterização dos concretos utilizados foram fundamentais para a avaliação do comportamento mecânico do material quando sujeito a solicitações de projeto. Além disso, a obtenção destes resultados possibilitou a correção da estimativa de resistência dos prismas. Os ensaios realizados para caracterização do concreto foram compressão axial, tração por compressão diametral e módulo de elasticidade, como pode ser verificado na Figura 4-1.



a)

b)

c)

Figura 4-1 – Ensaio de caracterização dos materiais: a) – *Compressão axial*; b) - *Tração por compressão diametral*; c) - *Módulo de elasticidade*

A Tabela 4-1 mostra os resultados dos ensaios do material e indica de maneira sistemática as características do concreto de cada espécime. O mapeamento foi realizado com a finalidade de avaliar de maneira mais efetiva as possíveis variações dos resultados de resistência e comportamento dos prismas, no que diz respeito às propriedades do concreto.

Tabela 4-1 – Resultados gerais de caracterização do concreto

Espécime		AGRC (%)	f_{ct} (MPa)	f_c (MPa)	E_{ci} (GPa)
Série 0%	F1-0.5-0	0	3.2	27.1	20.3
	F3-2.2-0				
	F2-1.1-0		3.0	25.2	
	F4-3.5-0				
Série 30%	F2-1.1-30	30	3.1	26.9	20.5
	F3-2.2-30				
	F1-0.5-30		3.0	26.6	
	F4-3.5-30				
Série 100%	F2-1.1-100	100	2.7	25.3	16.7
	F3-2.2-100				
	F1-0.5-100		2.7	27.2	
	F4-3.5-100				
Prescrição normativa			NBR-7222 (2011)	NBR5739 (2018)	NBR8522 (2017)

Muito se discute na literatura sobre o efeito da adição do AGRC em concretos, principalmente do que diz respeito as propriedades mecânicas do material. Na Figura 4-2 é plotado os resultados individuais da resistência à compressão obtida em função do teor de substituição AGRC. A análise do gráfico permite aferir que o incremento de agregado reciclado não exerceu influência sob a resposta de resistência a compressão do concreto. Ressalva-se, no entanto, que estes resultados ilustram um estudo de dosagem apropriado, e, além disso, o AGRC utilizado nesta pesquisa passou por um sistema de triagem mais rigoroso, onde foi utilizado, em sua maioria, concretos de resistência acima de 20 MPa e que, de maneira geral, possuíam poucos contaminantes (material cerâmico, argamassa de revestimento, material orgânico, etc.), fazendo do material um AGRC de boa qualidade.

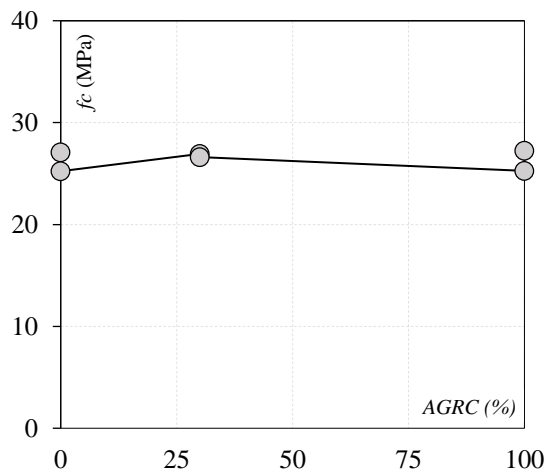


Figura 4-2 - Resistência à compressão do concreto em função do teor de substituição

No tocante, avaliando a resistência à tração e o módulo de elasticidade do material, observa-se uma queda nestas propriedades para o teor de substituição de 100% de AGRC, como pode ser verificada na Figura 4-3. Para a resistência à tração, em média, foi observado uma redução de 13%, já para o módulo de elasticidade a redução foi de 17%, em relação ao concreto feito apenas com agregados naturais. O desvio padrão para os valores de resistência à tração e módulo de elasticidade do concreto com AGN foram de 0.07 e 0.22 e para o concreto feito com 100% AGRC foi 0.03 e 0.35, respectivamente. A substituição de 30% de AGRC, de maneira geral, não afetou as propriedades mecânicas do material.

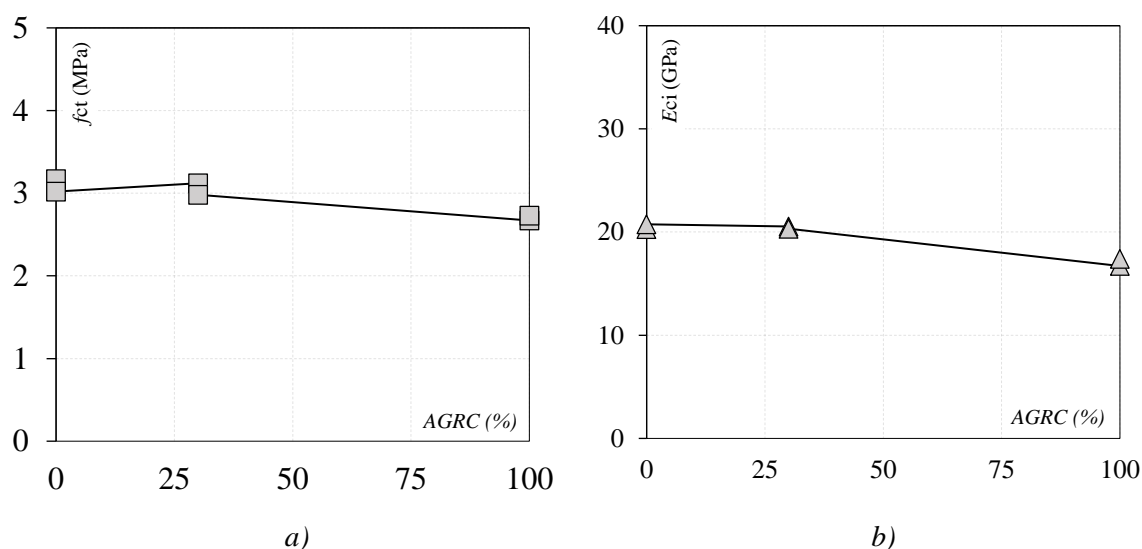


Figura 4-3 – Propriedades mecânicas do concreto em função o teor de substituição de AGRC :
a) - Resistência a tração em função do teor de substituição; b) - Módulo de elasticidade em função do teor de substituição

É comum associar a resistência a tração com a resistência a compressão do concreto, no entanto, existem outros fatores que podem influenciar na resistência a tração do material. METHA e MONTEIRO (1994) apontam a resistência das fases componentes do material, como sendo um dos fatores limitantes da resistência a tração do concreto. O autor cita que a porosidade da matriz, agregados e zona de transição está intimamente relacionada com a resposta a tração do material. Neste sentido, é sensato correlacionar a queda de resistência à tração do concreto com 100% AGRC às características do próprio agregado utilizado.

De acordo com autores como BEHERA *et al.* (2014) a queda do módulo de elasticidade do material pode ser associada a dois principais fatores, um deles é a microfissuração dos agregados reciclados de concreto, ocasionada pelo processo de beneficiamento do agregado, o outro é a formação de uma zona de transição com ligações mais fracas e com maior

quantidade de vazios. No que diz respeito à zona de transição do concreto com agregado reciclado, como verificado nos estudos de LEE e CHOI (2013) e OLONGO e PADAYACHEE N (2012), o concreto com AGRC possui duas zonas de transição, uma de natureza mais fraca, oriunda do concreto de origem do agregado reciclado, e a outra formada entre a nova matriz de cimento e o AGRC. As múltiplas zonas de transição também são apontadas pelos autores como sendo responsáveis pela queda da capacidade de deformação do concreto com agregado reciclado.

A Figura 4-4 ilustra a superfície de ruptura dos corpos de prova ensaiados à tração por compressão diametral, onde é possível observar a mudança de comportamento na propagação da fissura de corte com o incremento de AGRC. Na Figura 4-4a, que ilustra o concreto confeccionado apenas com agregados naturais, nota-se que a fratura de fendilhamento do concreto contorna boa parte dos agregados, comportamento típico de concretos com resistência usuais, onde a zona de transição entre matriz e o agregado é a parcela mais frágil. Na Figura 4-4b, onde o material possui 30% de agregados reciclados em sua fração gráuda, observa-se uma ligeira mudança, agora, verifica-se não apenas o contorno dos agregados, mas também visualiza-se a presença de agregados naturais cisalhados, que, em sua maioria, são de origem reciclada. Uma mudança mais expressiva do comportamento de propagação da fratura é observada na Figura 4-4c, que ilustra concreto com 100% de AGRC, nota-se então que a maioria dos agregados foram cisalhados, o que evidencia a natureza mais fraca do agregado reciclado de concreto e, possivelmente, remodela a zona de fragilidade no material.

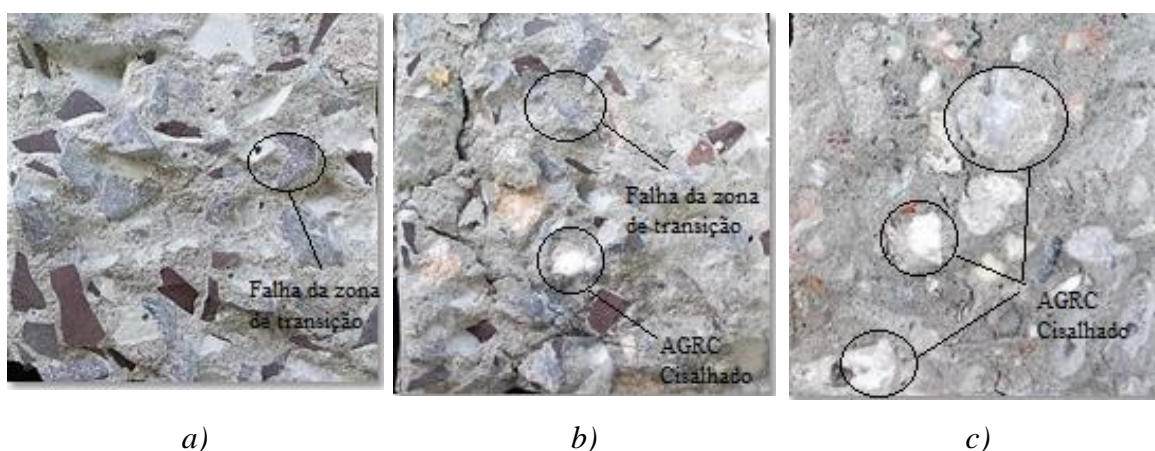


Figura 4-4 – Superfície de ruptura de corpos de prova cilíndricos submetidos a tração por compressão diametral: a) - Concreto confeccionado apenas com AGN; b) - Concreto com 30% de substituição de AGRC; c) - Concreto com 100% de AGRC

Os resultados dos ensaios de caracterização do aço, utilizado na confecção da armadura de flexão e cisalhamento, e nos conectores metálicos, são mostrados na Tabela 4-2, onde é exposta a tensão de escoamento (f_{ys}), a deformação (ϵ_{ys}) e o módulo de elasticidade do aço (E).

Tabela 4-2 – Caracterização do aço

\varnothing (mm)	f_{ys} (MPa)	ϵ_{ys} ‰	E (GPa)
6.3	544	2.75	198
10	504	2.65	190
12.5	515	2.69	191
16	545	2.87	190
20	546	2.8	194
25	546	2.79	195

4.2. Deslocamento verticais

O comportamento *carga x deslocamento* dos prismas por série de ensaio é observado na Figura 4-5. Nota-se então, que o aumento taxa de armadura de flexão altera o padrão de deslocamento dos prismas, uma vez que o grau de fissuração na superfície do concreto exerce grande influência, tanto na rigidez quanto na carga de ruptura dos espécimes. Neste sentido, observa-se que para taxas de armadura de flexão menores é verificado um maior deslocamento dos prismas e uma menor carga de ruptura dos espécimes.

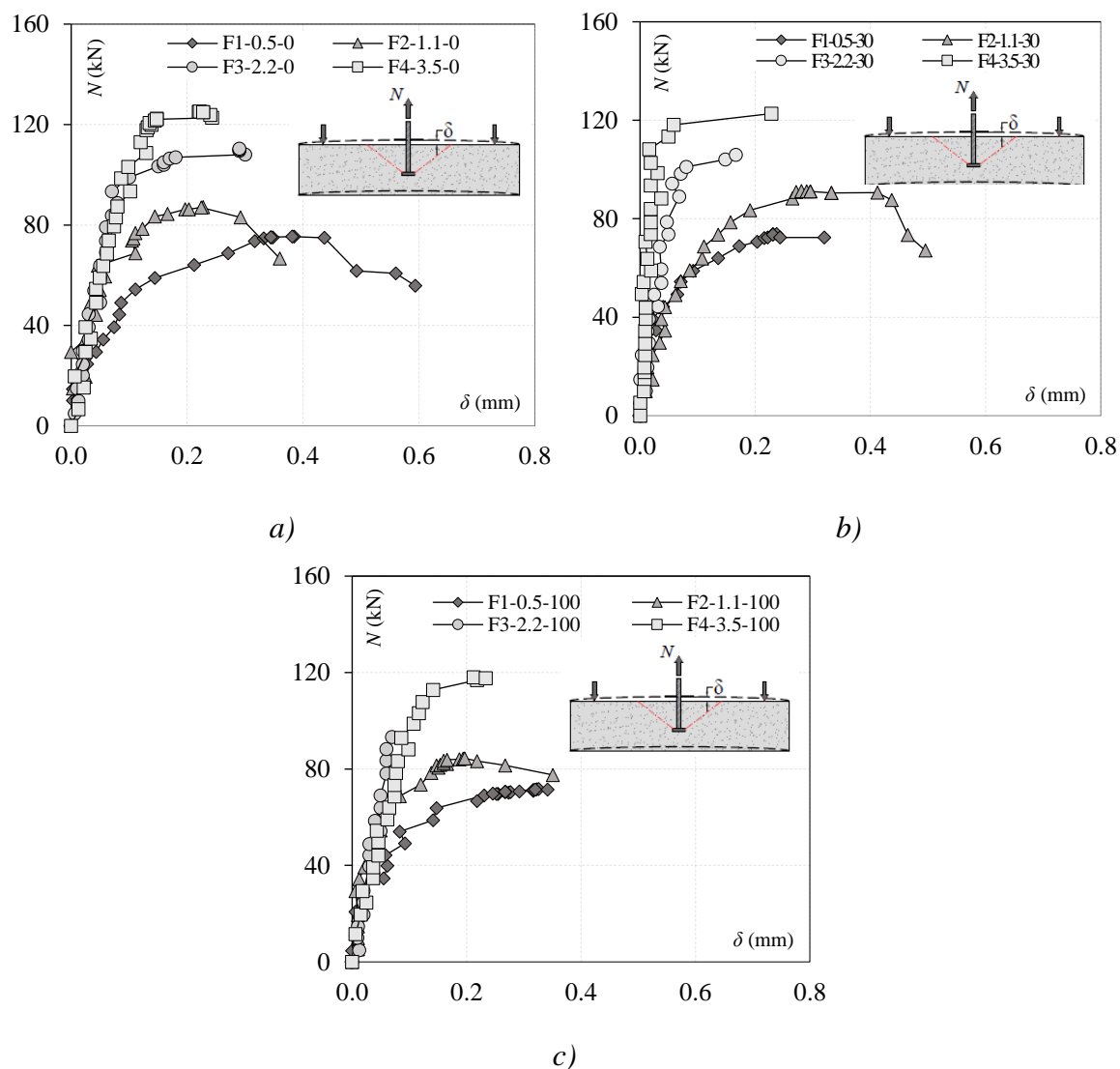


Figura 4-5 – Comportamento carga x deslocamento dos espécimes por série: a) - Série 0%; b) - Série 30%; c) - Série 100%

A fim de verificar a influência da adição de AGRC na resposta de carga deslocamento dos prismas, plotou-se a sobreposição de curvas entre espécimes com mesma taxa de armadura de flexão, ver Figura 4-6, onde mostra, de maneira geral, que a adição de AGRC não influencia no comportamento *carga x deslocamento* dos espécimes, sendo possível aferir que o mecanismo de interação entre armadura de flexão e concreto atuam de maneira similar e independem do teor de substituição do AGRC. Contudo, uma atipicidade pode ser verificada no comportamento do espécime F4-3.5-30, Figura 4-6d, que apresentou uma maior rigidez ao deslocamento em relação aos espécimes com 0 e 100% de substituição. O comportamento incomum é atribuído a possíveis avarias no equipamento de leitura, uma vez que o deslocamento final do prisma se equiparou aos demais na zona de pico.

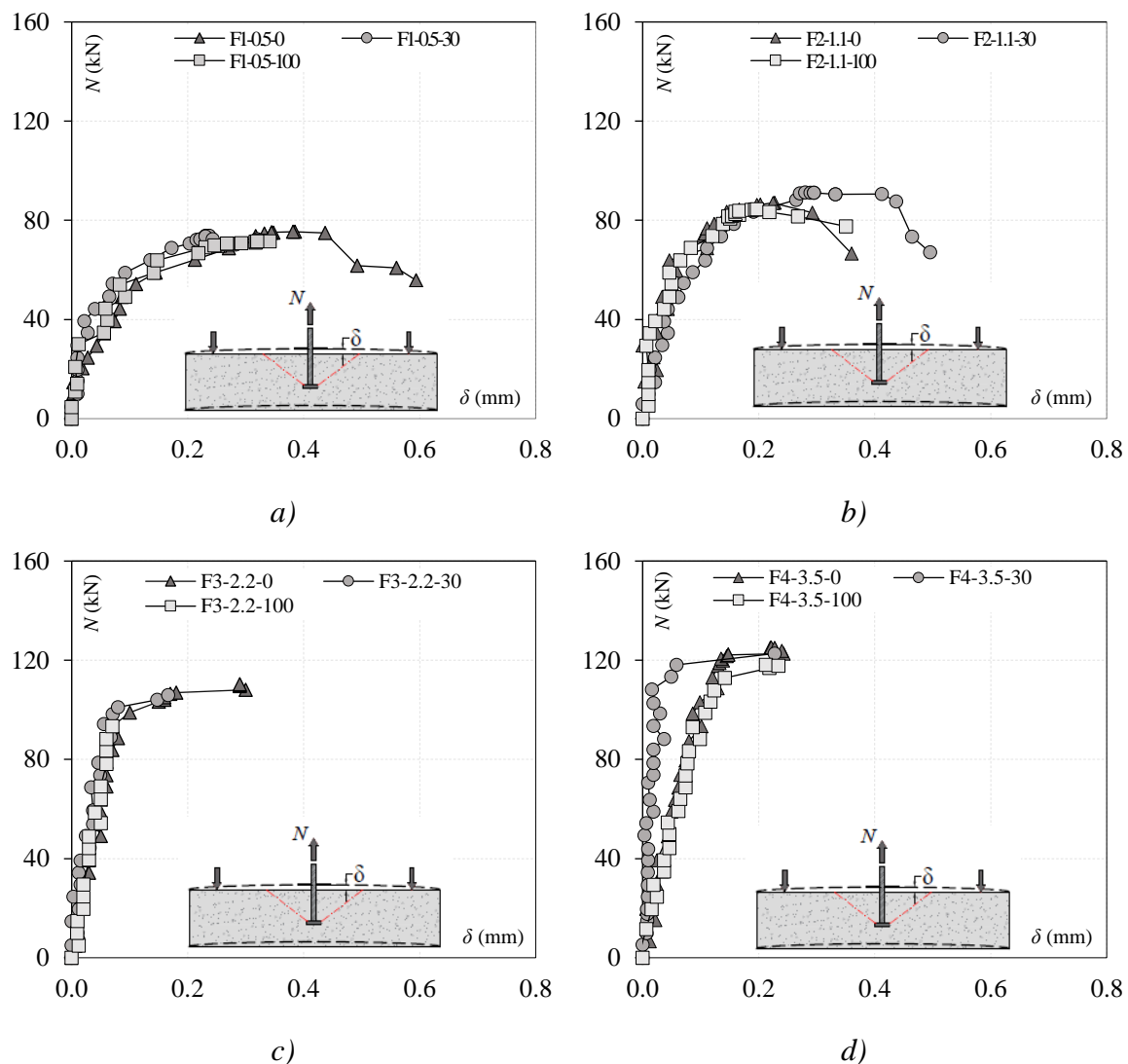


Figura 4-6 – Comparativo de comportamento carga x deslocamento entre séries com diferentes substituições de AGRC: a) - *Espécimes do tipo F1-0.5*; b) - *Espécimes do tipo F2-1.1*; c) - *Espécimes do tipo F3-2.2*, d) - *Espécimes do tipo F4-3.5*

4.3. Deslizamento do conector

Este monitoramento permite verificar a ocorrência de ruptura por deslizamento prematuro do conector metálico, que pode ocorrer por falha no sistema de ancoragem do conector. O registro de deslocamento em função do acréscimo de carga pode ser verificado na Figura 4-7. A plotagem dos gráficos por série de ensaio permitiu verificar que a taxa de armadura de flexão exerceu influência sobre o deslizamento da cabeça, ao passo que o nível de fissuração do concreto diminui em função do aumento de área de aço no espécime. Observa-se também que o deslocamento do conector permanece baixo até próximo a carga de arrancamento do prisma, e apenas após a carga de última, quando o cone de concreto é sacado, registra-se maiores deslocamentos, evidencia-se então, que não ocorreu ruptura por falha de ancoragem em nenhum dos espécimes ensaiados.

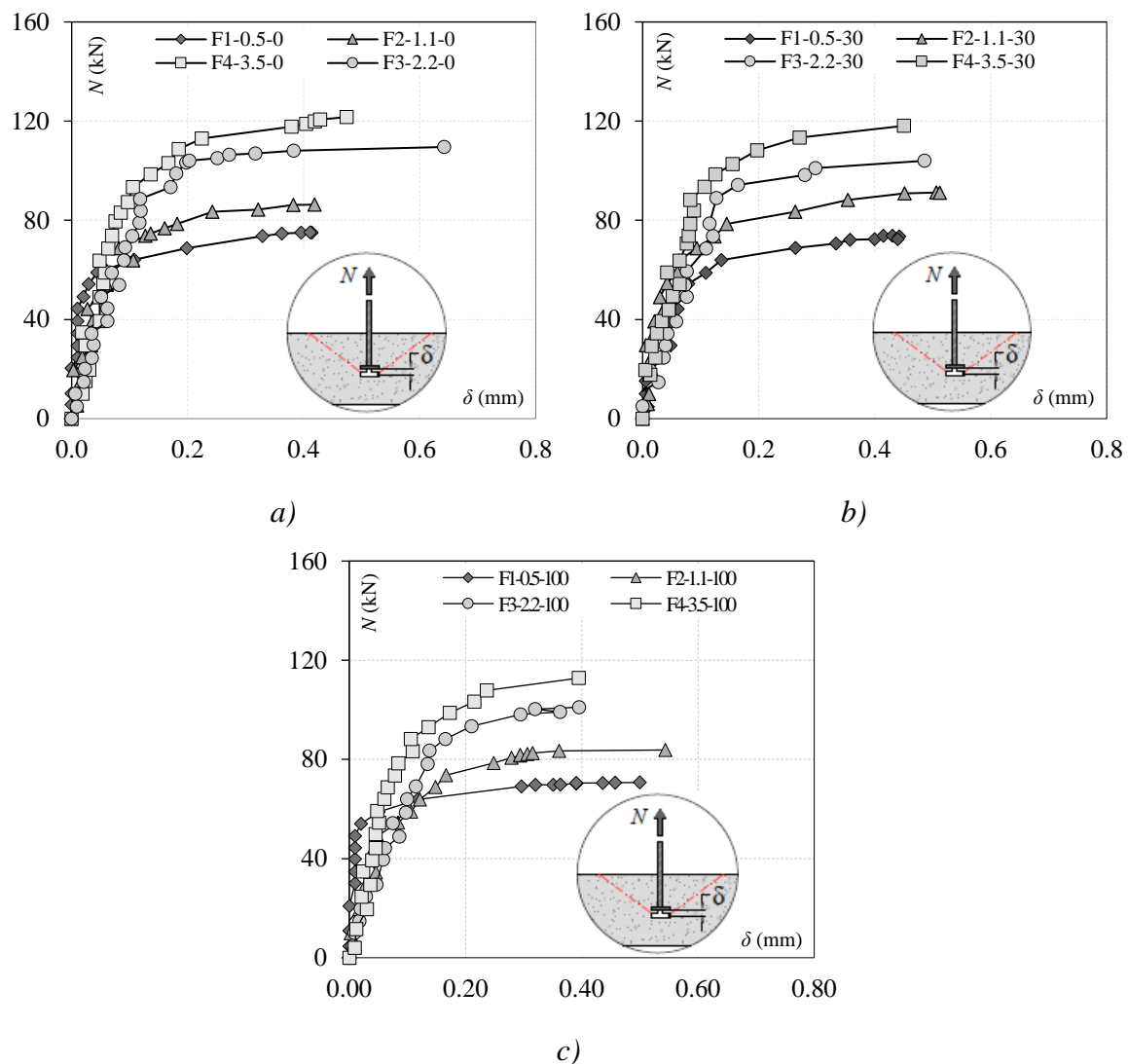


Figura 4-7 – Comportamento carga x deslizamento do conector dos espécimes por série:
a) - Série 0%; b) - Série 30%; c) - Série 100%

Nos casos onde o sistema de ancoragem é garantido, ainda são registrados pequenos deslizamentos do conector metálico, que ocorre quando a área de concreto aderida ao comprimento embutido do conector metálico começa a sofrer microfissuração em decorrência das tensões oriundas da aplicação de carga localizada, exercida pela cabeça do conector e que podem gerar esmagamento do local do concreto. A Figura 4-8 ilustra o comparativo dos deslizamentos registrados nos conectores metálicos entre espécimes com a mesma taxa de armadura de flexão e diferentes percentuais de AGRC. Observa-se que o padrão de comportamento de deslizamento não é afetado pelo incremento de agregado reciclado. Neste sentido, como não foi observado a mudança de comportamento quanto ao deslizamento do conector em função do teor de substituição, afere-se que o padrão de

comportamento da interação conector-concreto, para este caso, independe do teor de substituição de AGRC.

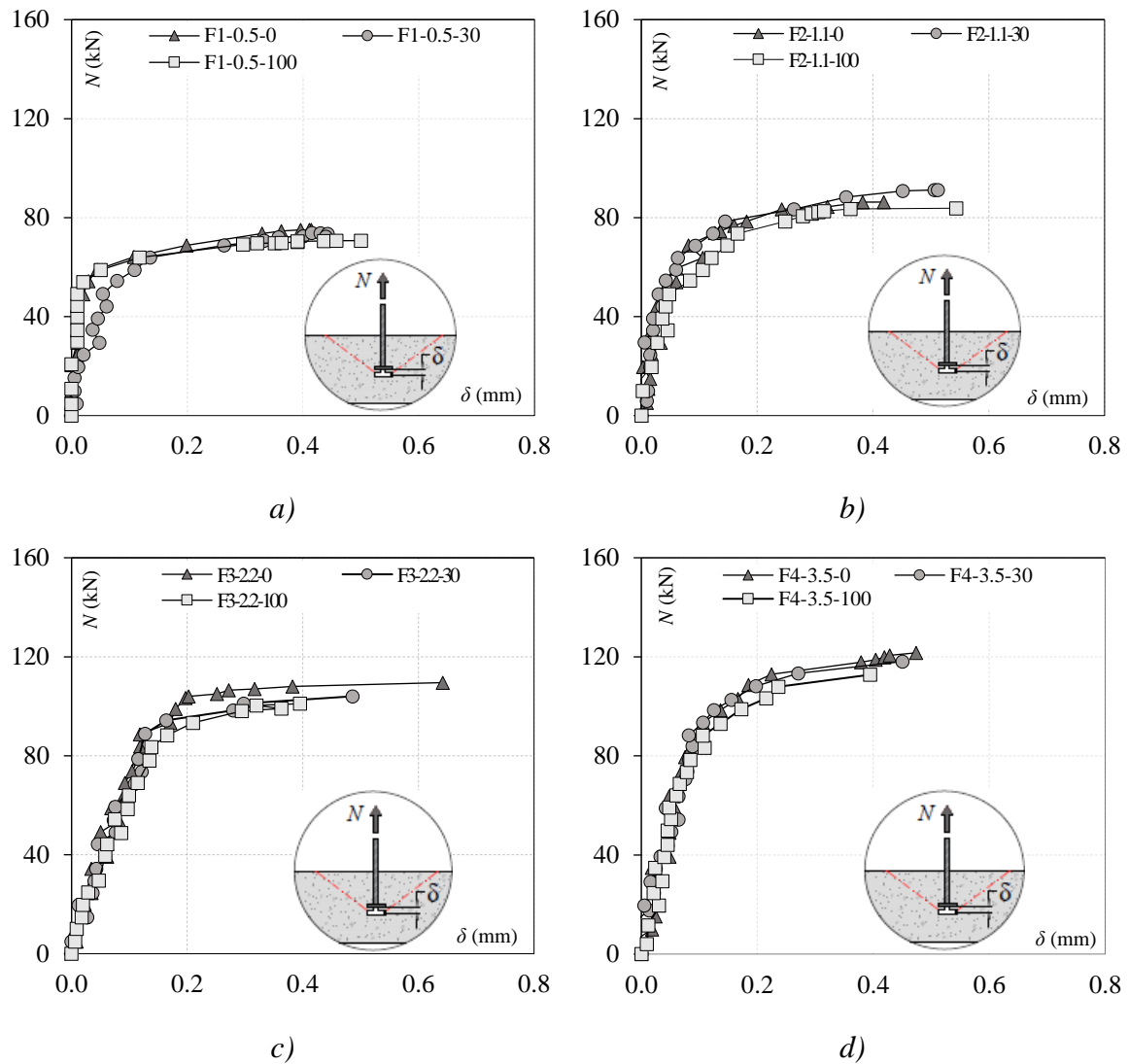


Figura 4-8 - Comparativo de comportamento carga x deslocamento entre séries com diferentes substituições de AGRC: a) - Espécimes do tipo F1-0.5; b) - Espécimes do tipo F2-1.1; c) - Espécimes do tipo F3-2.2, d) - Espécimes do tipo F4-3.5

4.4. Deformações na armadura de flexão

As deformações registradas nas armaduras de flexão podem ser consultadas na Figura 4-9, e a análise do comportamento da curva *carga x deformação* indica que aço trabalhou em regime elástico. Como era esperado, os prismas com menores taxas de armadura de flexão apresentaram uma maior deformação das armaduras, ao passo que o incremento de aço acresceu a rigidez do espécime.

No dimensionamento dos prismas foi garantida a resistência da seção aos esforços de flexão submetidos à peça em decorrência do processo de arrancamento dos conector, ao passo que, como ainda pode ser verificado na Figura 4-9, não foram registradas deformações que configurassem escoamento do aço e conseguinte ruptura por flexão, nem mesmo nos prismas menos armados.

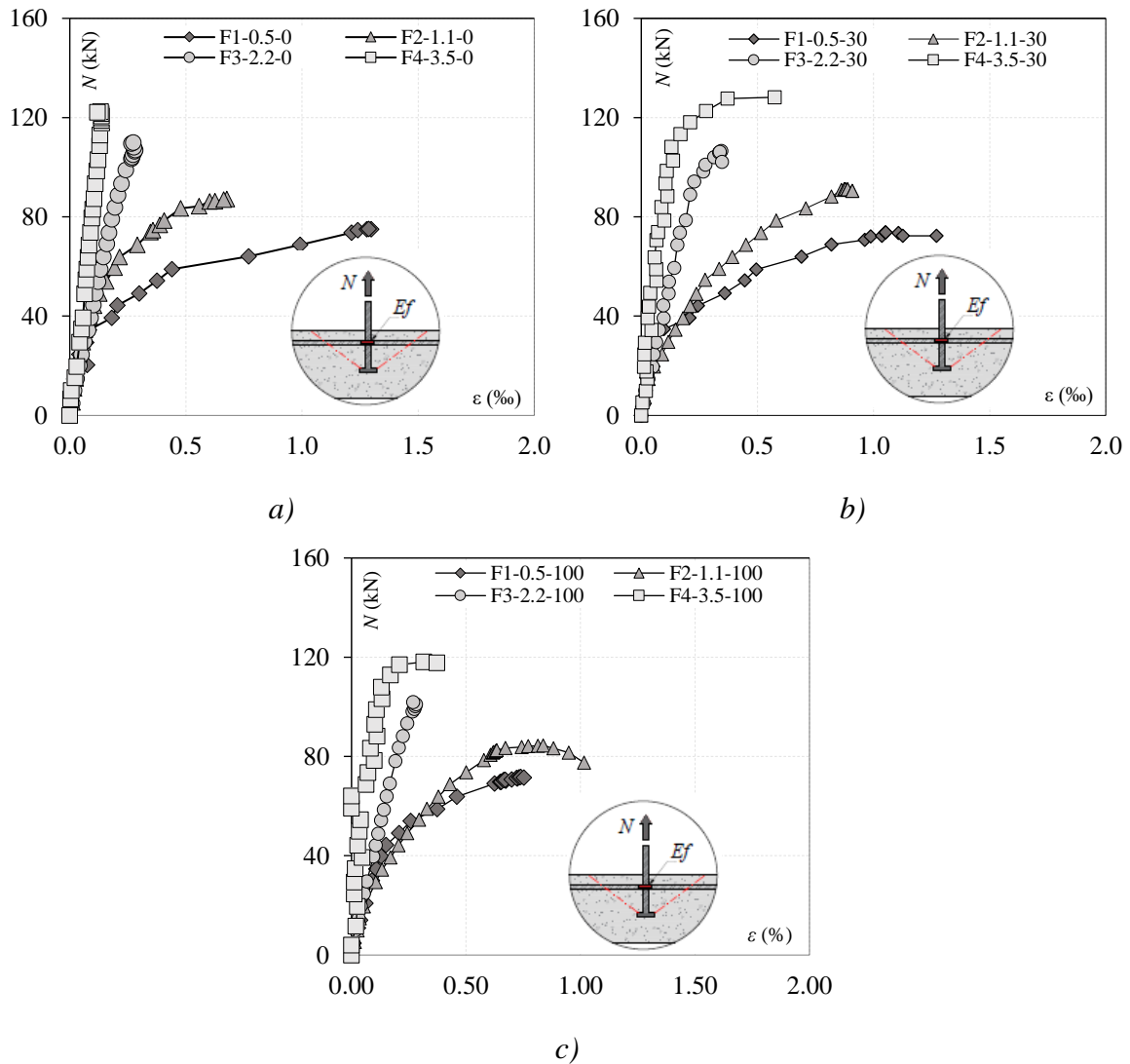


Figura 4-9 – Deformações nas armaduras de flexão dos espécimes por série de ensaio :
a) - Série 0%; b) - Série 30%; c) - Série 100%

Observa-se que as armaduras obtiveram o mesmo nível de deformação até aproximadamente 30 kN, que é a carga de fissuração da seção bruta de concreto. As maiores deformações são registradas nas armaduras dos prismas do tipo F1-0.5, que são os espécimes com a menor taxa de armadura de flexão. O maior nível de deformação das armaduras, indica que a peça se encontra em maior estado de fissuração.

4.5. Deformações da haste do conector

No dimensionamento dos prismas, algumas verificações foram necessárias para garantir a ruptura pelo cone de concreto. Dentre os modos de ruptura verificados, nesta seção, destacamos o escoamento do aço da haste do conector metálico, que ocorre quando existem condições adequadas de distância entre bordos, espaçamento entre conectores metálicos e comprimento suficiente de embutimento efetivo do conector no concreto. Mesmo sendo garantido através do dimensionamento dos prismas a ruptura pela falha do cone de concreto, optou-se por monitorar a deformação no aço da haste metálica dos conectores. As deformações registradas nas hastes dos conectores metálicos, por série de ensaio, podem ser consultadas na Figura 4-10.

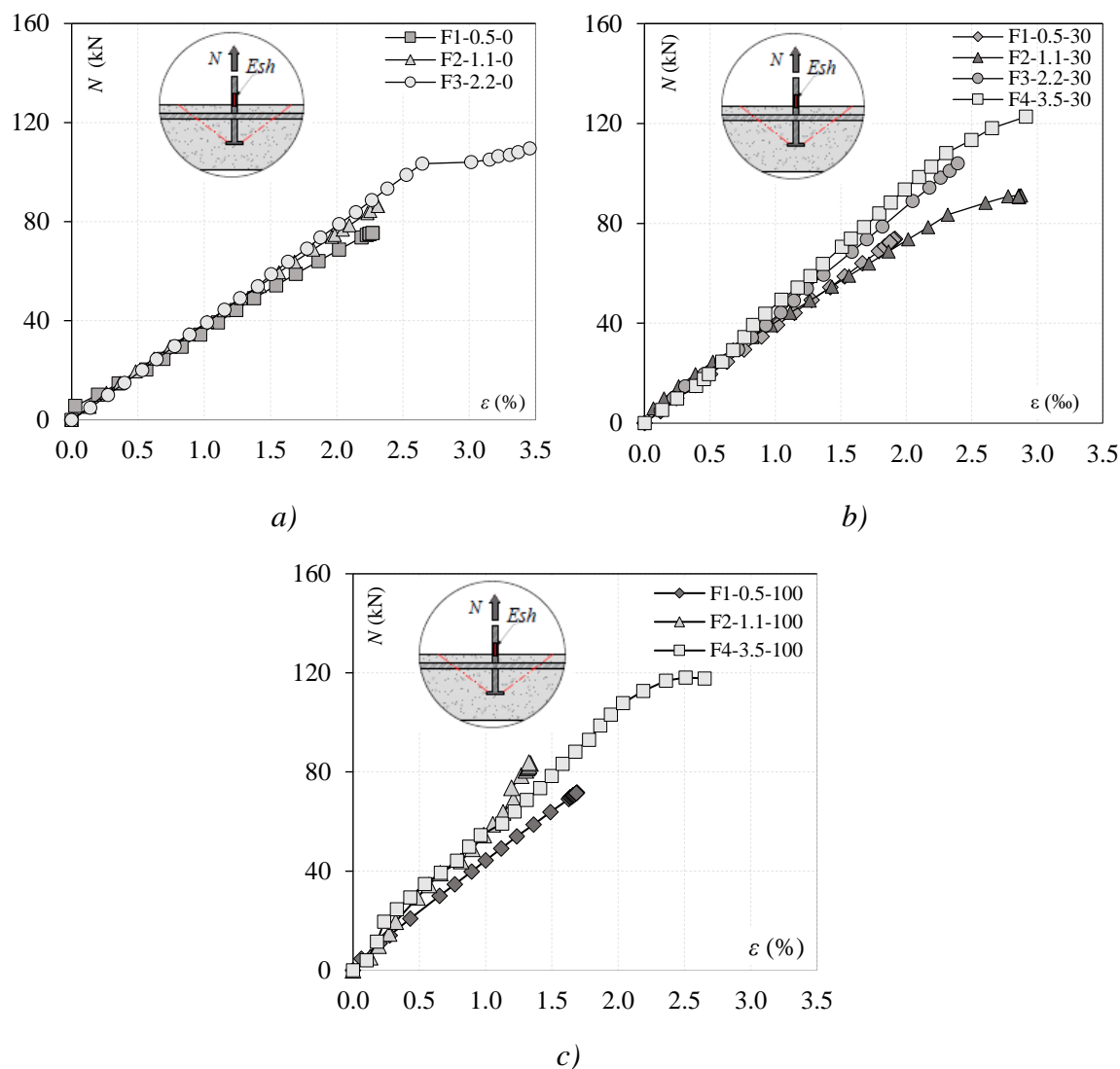


Figura 4-10 – Deformações na haste do conector metálico: a) - Série 0%; b) - Série 30%
c) - Série 100%

Analisando as deformações das hastes metálicas da série 30% e 100%, Figura 4-10b e Figura 4-10c, verifica-se que não houve escoamento das barras de aço. No entanto, na série 0%, Figura 4-10a, especificamente na haste do espécime F3-2.2-0, observa-se o início da plastificação do aço. Ressalva-se, contudo, que o início de escoamento do aço da haste metálica ocorreu próximo a carga última de arrancamento da peça, sendo registrado a ruptura pelo do cone de ruptura de concreto e não pela estricção da haste do conector.

4.6. Deformações no cone de ruptura do concreto

As deformações registradas no cone de ruptura do concreto para a Série 0% podem ser consultadas na Figura 4-11. Os registros de deformações foram feitos por extensômetros de imersão, instalados nas seções transversais e longitudinais dos prismas. Em cada seção foi instalado dois extensômetros, um próximo a cabeça do conector (CLB e CTB), e outro próximo as armaduras de flexão (CLA e CTA), ambos os dispositivos estavam perpendiculares a projeção da fissura de corte do cone de concreto, que foi considerada como sendo de 35° em relação a cabeça do conector.

A resposta do monitoramento mostra que ocorrem maiores deformações próximas a cabeça do conector metálico, ao passo que a parcela de concreto próxima as armaduras de flexão, sofre menos deformações. O padrão de leitura observado exemplifica que a área que circunda a cabeça do conector é a primeira a sofrer microfissuração, uma vez que é a região onde se origina a fissura do cone de ruptura do concreto. Esta é uma região que conta apenas com o concreto para absorver os esforços de tração, e devido à baixa resistência do material a este tipo de solicitação, a região acaba sofrendo maiores deformações.

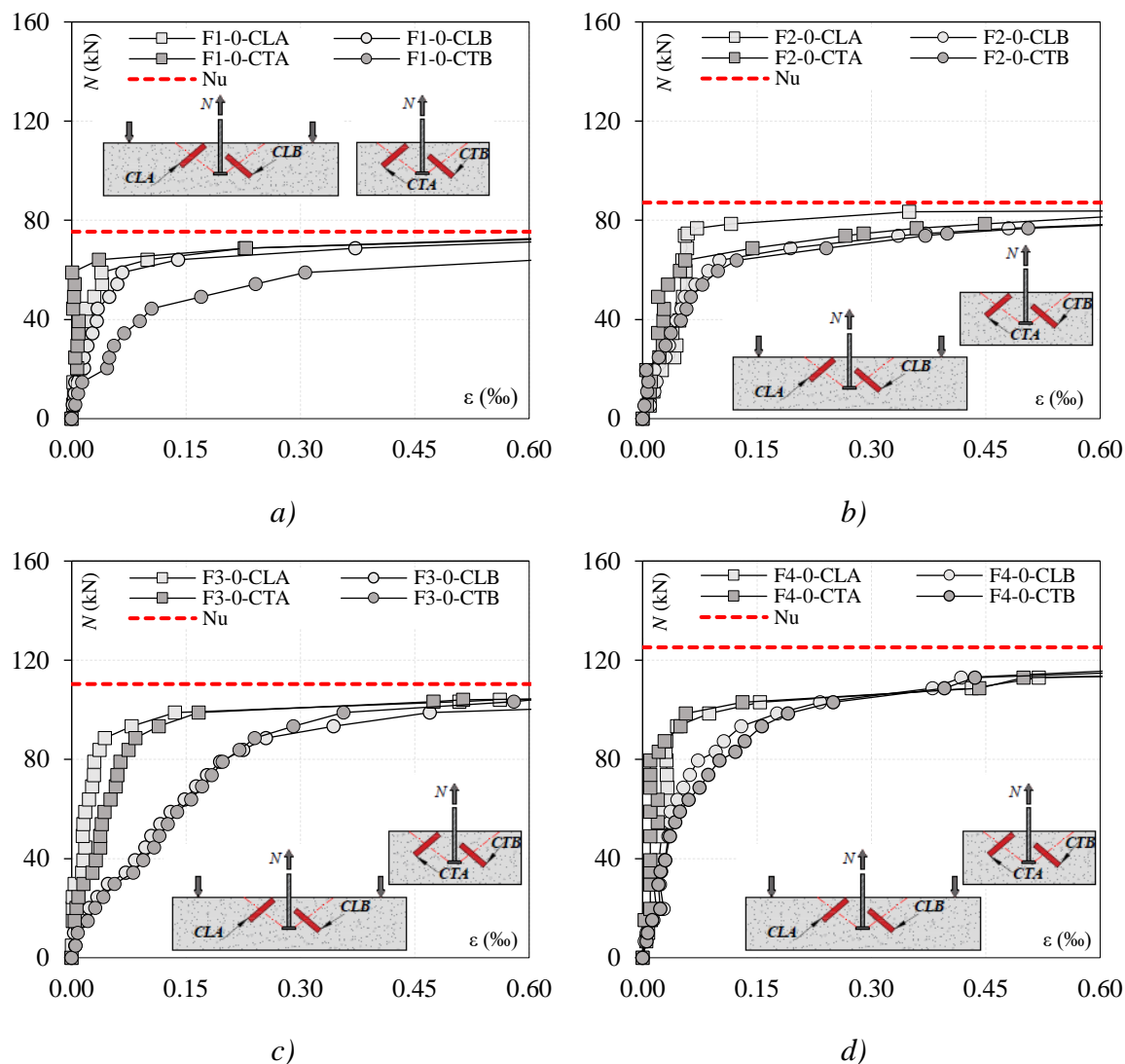


Figura 4-11 – Deformações registradas no cone de concreto por espécimes da Série 0%:
 a) - Espécime F1-0.5-0; b) - Espécime F2-1.1-0; c) - Espécime F3-2.2-0;
 d) - Espécime F4-3.5-0

O comportamento registrado na Série 0% também é observado nos espécimes das Séries 30 e 100%, que podem ser consultados nas Figura 4-12 e Figura 4-13. Mesmo sendo observados algumas variações, nota-se que o padrão de resposta quanto a deformação do cone de concreto se mantém, de maneira geral. Neste sentido, afere-se que as deformações do cone de concreto não são afetadas pelo incremento de agregado reciclado, no entanto, para uma avaliação mais precisa é necessário a verificação das tensões atuantes em cada trecho.

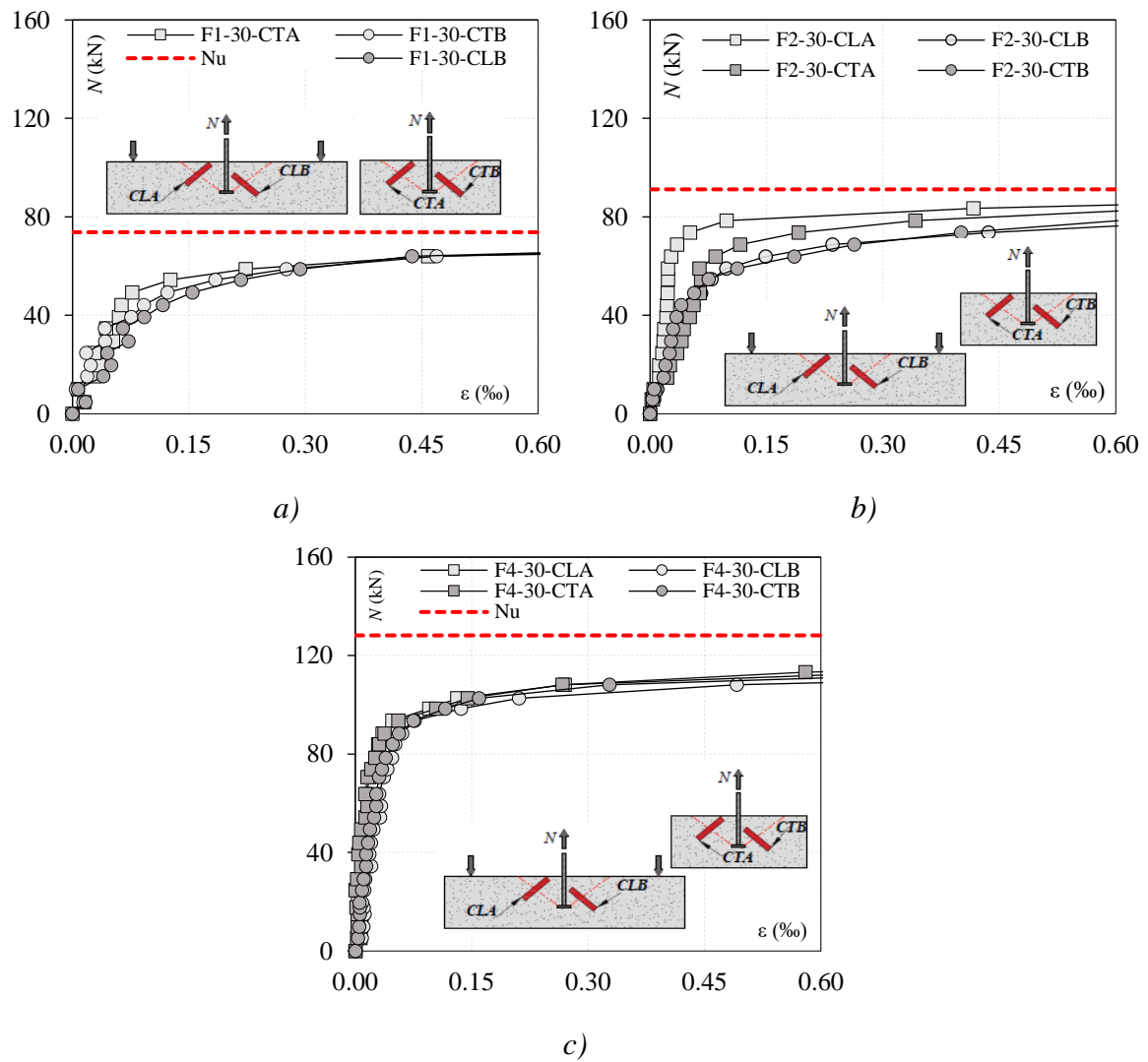


Figura 4-12 – Deformações registradas no cone de concreto por espécimes da Série 30%:
a) - Espécime F1-0.5-30; b) - Espécime F2-1.1-30; c) - Espécime F4-3.5-30

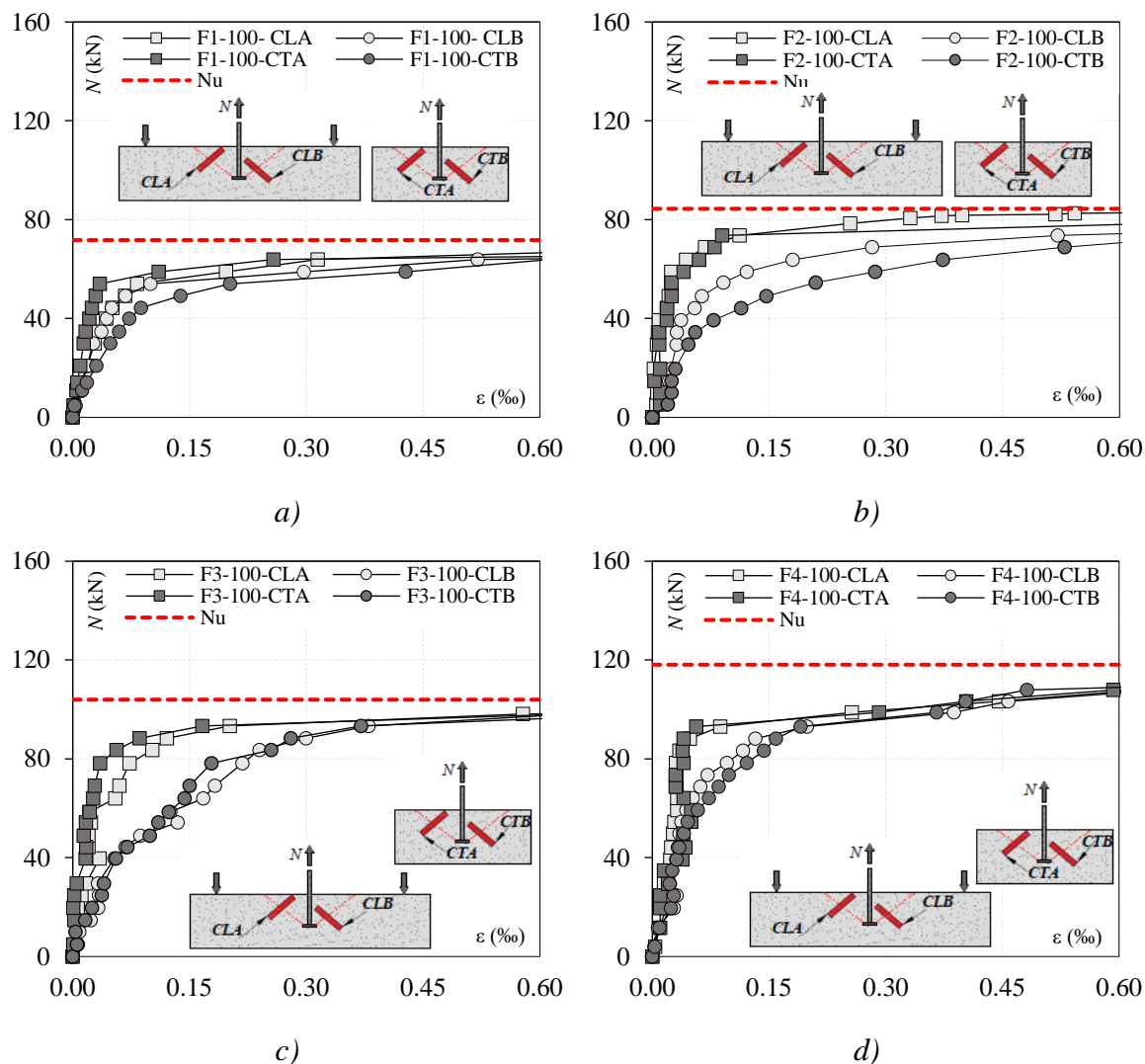


Figura 4-13 - Deformações registradas no cone de concreto por espécimes da Série 100 %:
 a) - *Espécime F1-0.5-100*; b) - *Espécime F2-1.1-100*; c) - *Espécime F3-2.2-100*;
 d) - *Espécime F4-3.5-100*

Outro comportamento que foi observado é que a variação da taxa de armadura de flexão exerceu influência sobre as deformações do concreto, ao passo que limitou a abertura da fissura de formação do cone. O controle da fissuração no cone de concreto exercido pelo incremento da taxa de armadura de flexão, influenciou na capacidade resistente ao arrancamento dos prismas, fato que foi observado em todas as séries de ensaio, independente do teor de substituição de AGRC.

4.7. Abertura de fissuras

O monitoramento da abertura de fissuras em função da aplicação de carga das séries ensaiadas pode ser consultado na Figura 4-14. As leituras foram feitas manualmente com a utilização de um fissurômetro e após o aparecimento da fissura, foram feitas leituras a cada

passo de carga de 5 kN. Como pode ser observado na Figura 4-14, o acréscimo da armadura de flexão influenciou na abertura de fissuras nos prismas, ao passo que controle da fissuração exercido pelo aço fomentou maior capacidade de carga a ligação conector-concreto.

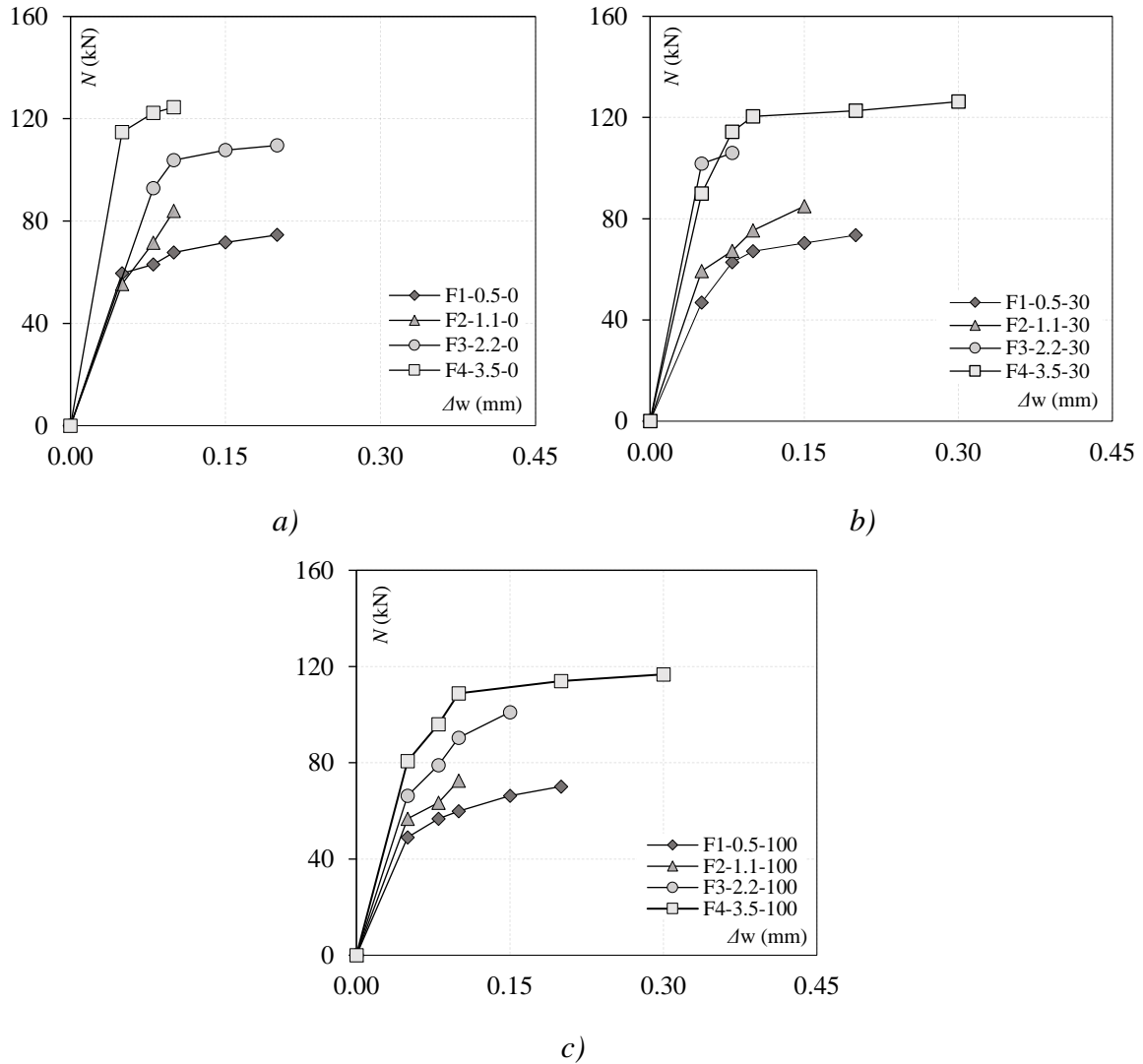


Figura 4-14 – Relação carga abertura de fissuras por série: a) - Série 0%; b) - série 30%; c) -Série 100%

A Figura 4-15 mostra a relação *carga x abertura de fissuras* dos prismas com a mesma taxa de armadura de flexão e teor de AGRC diferentes. Como pode ser observado na Figura 4-15a e Figura 4-15b, que mostram os espécimes com as menores taxas de armadura de flexão, de 0.5 e 1.1 % respectivamente, nota-se que o teor AGRC não afetou o padrão de fissuração dos prismas.

Analisando as Figura 4-15c e Figura 4-15d, que mostram os prismas com 2.2 e 3.5 % de taxa de armadura de flexão, respectivamente, observa-se que o incremento de AGRC aumentou

ligeiramente a susceptibilidade à abertura de fissuras do concreto. O resultado da relação *carga x abertura de fissuras* registrada no prisma F3-2.2-30 foi descartado, pois não apresentou uma boa correlação.

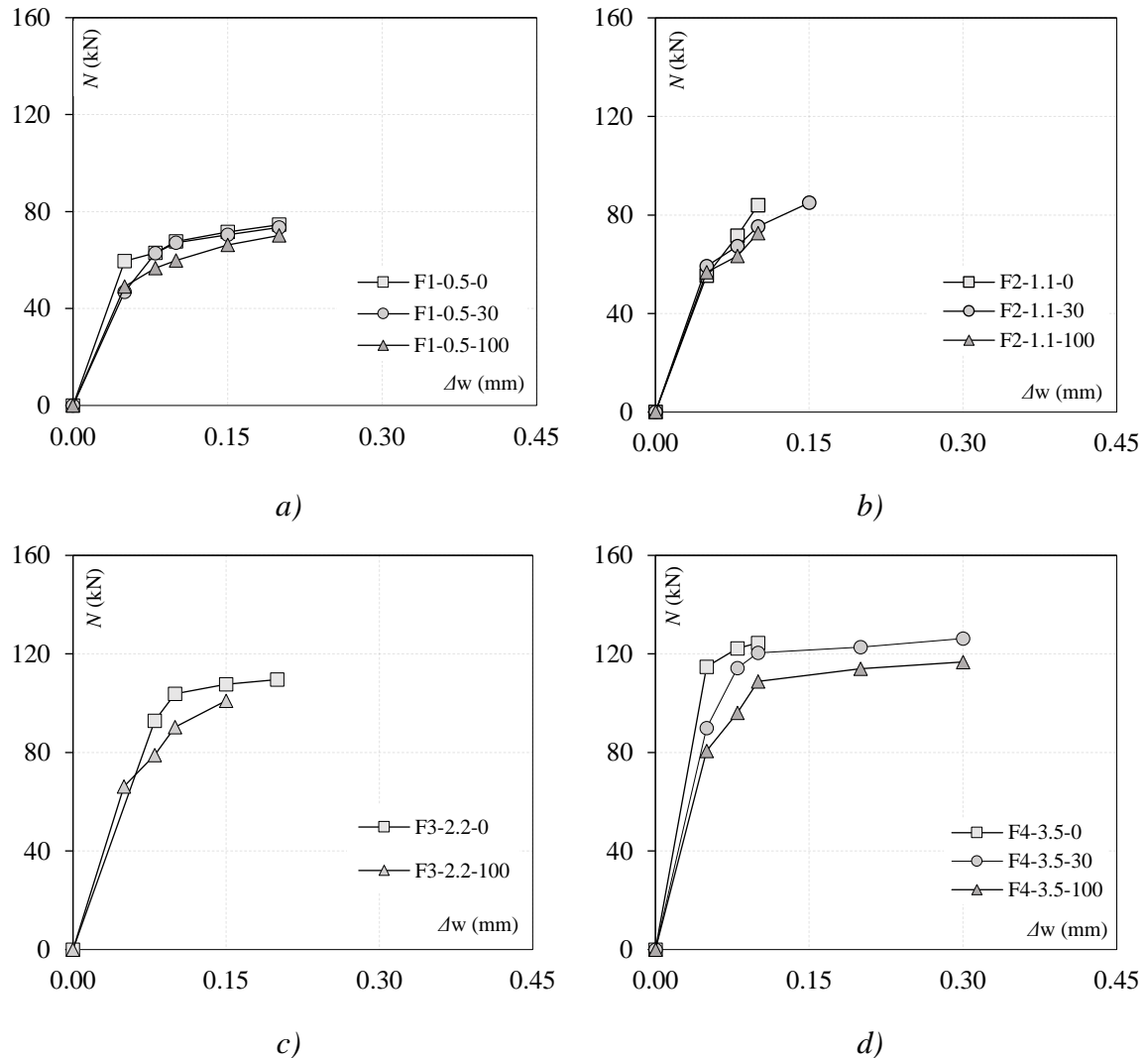


Figura 4-15 - Comparativo de *carga x abertura de fissuras* entre séries com diferentes substituições de AGRC: a) - *Espécimes do tipo F1-0.5*; b) - *Espécimes do tipo F2-1.1*; c) - *Espécimes do tipo F3-2.2*, d) - *Espécimes do tipo F4-3.5*

4.8. Modos de ruína e resistência ao arrancamento

As Figuras Figura 4-16, Figura 4-17 e Figura 4-18 mostram os registros fotográficos das séries de ensaio com 0, 30 e 100% de AGRC, respectivamente. As imagens ilustram as vistas laterais e a vista em planta dos espécimes após o ensaio. Em todos os casos, registrou-se a falha dos elementos estruturais pela ruptura do cone de concreto.

Inicialmente a falha foi caracterizada pelo aparecimento de fissuras paralelas as armaduras de flexão na superfície do prisma, que se espalharam pelo maciço de concreto em direção aos bordos, as fissuras tangenciais, oriundas da formação do cone de ruptura do concreto, só foram observadas concomitantemente ao registro de carga última ao arrancamento dos espécimes. Não foi registrado, em nenhum caso, a ocorrência de falha por flexão, cisalhamento ou outros modos de ruptura.

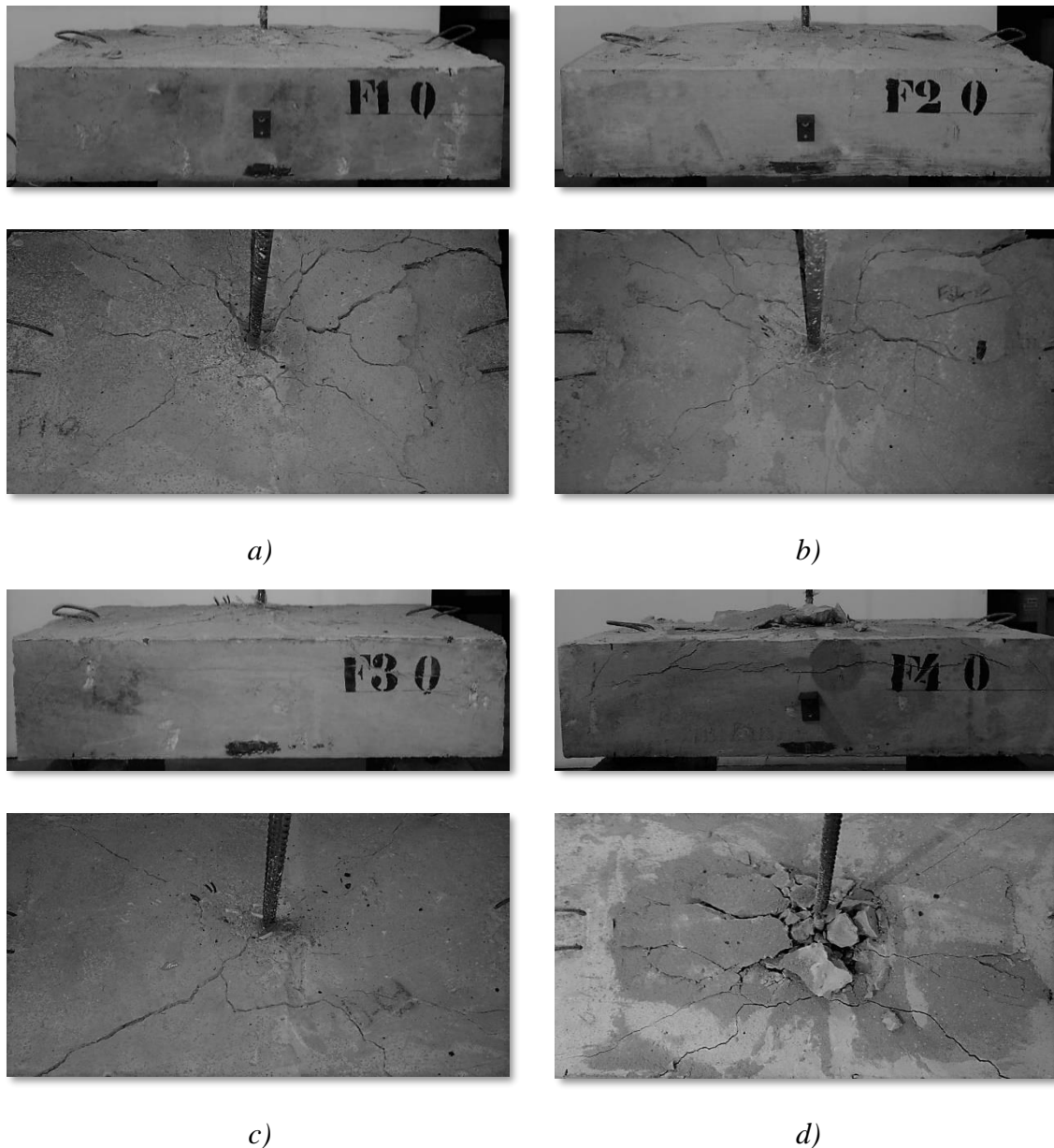


Figura 4-16 – Vista lateral e em planta dos prismas da Série 0% ensaiados: a) *Espécime F1-0.5-0*; b) *Espécime F2-1.1-0*; c) *Espécime F3-2.2-0*; d) *Espécime F4-3.5-0*

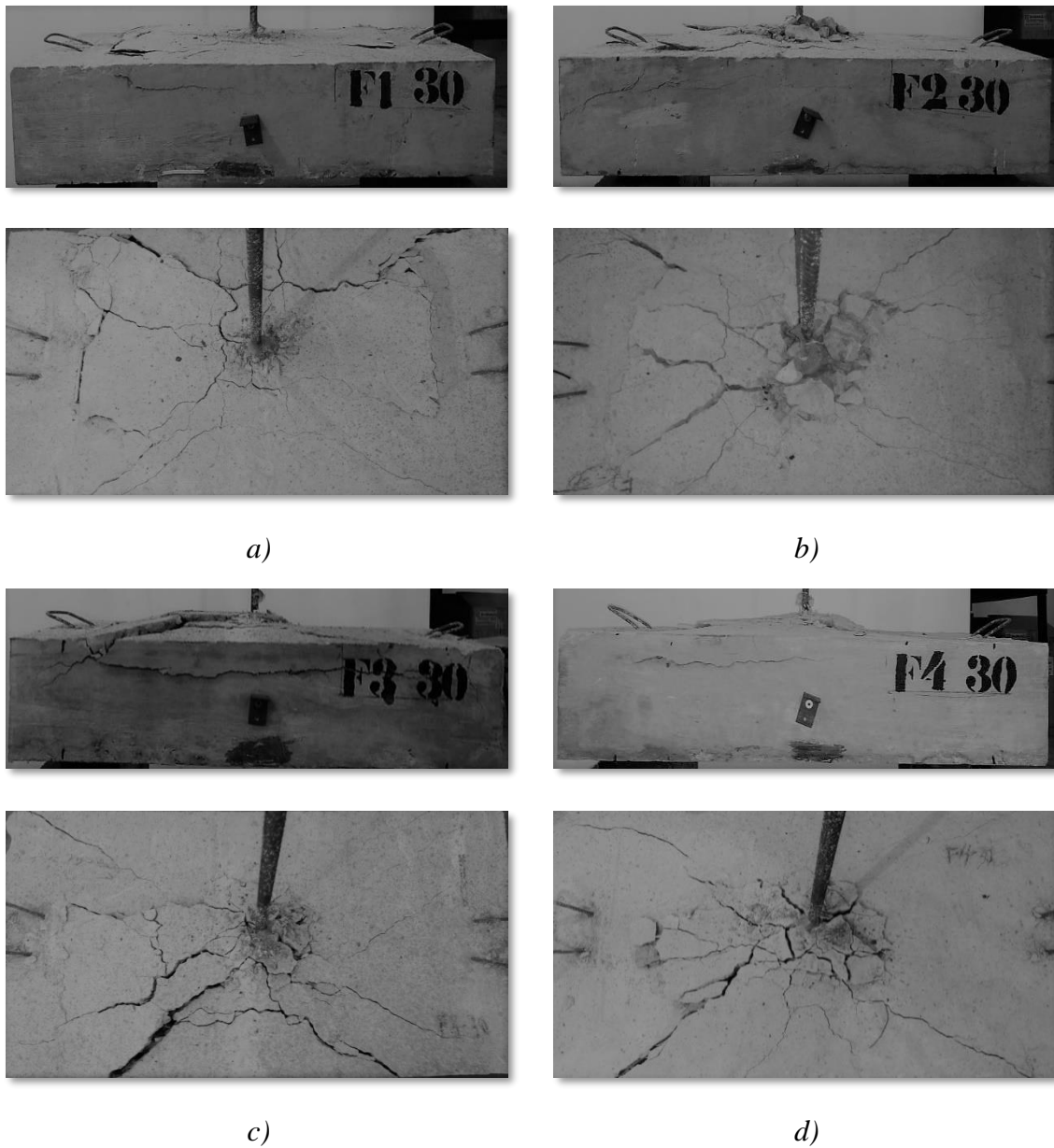


Figura 4-17 - Vista lateral e em planta dos prismas da Série 30% ensaiados: a) *Espécime F1-0.5-30*; b) *Espécime F2-1.1-30*; c) *Espécime F3-2.2-30*; *Espécime F4-3.5-30*

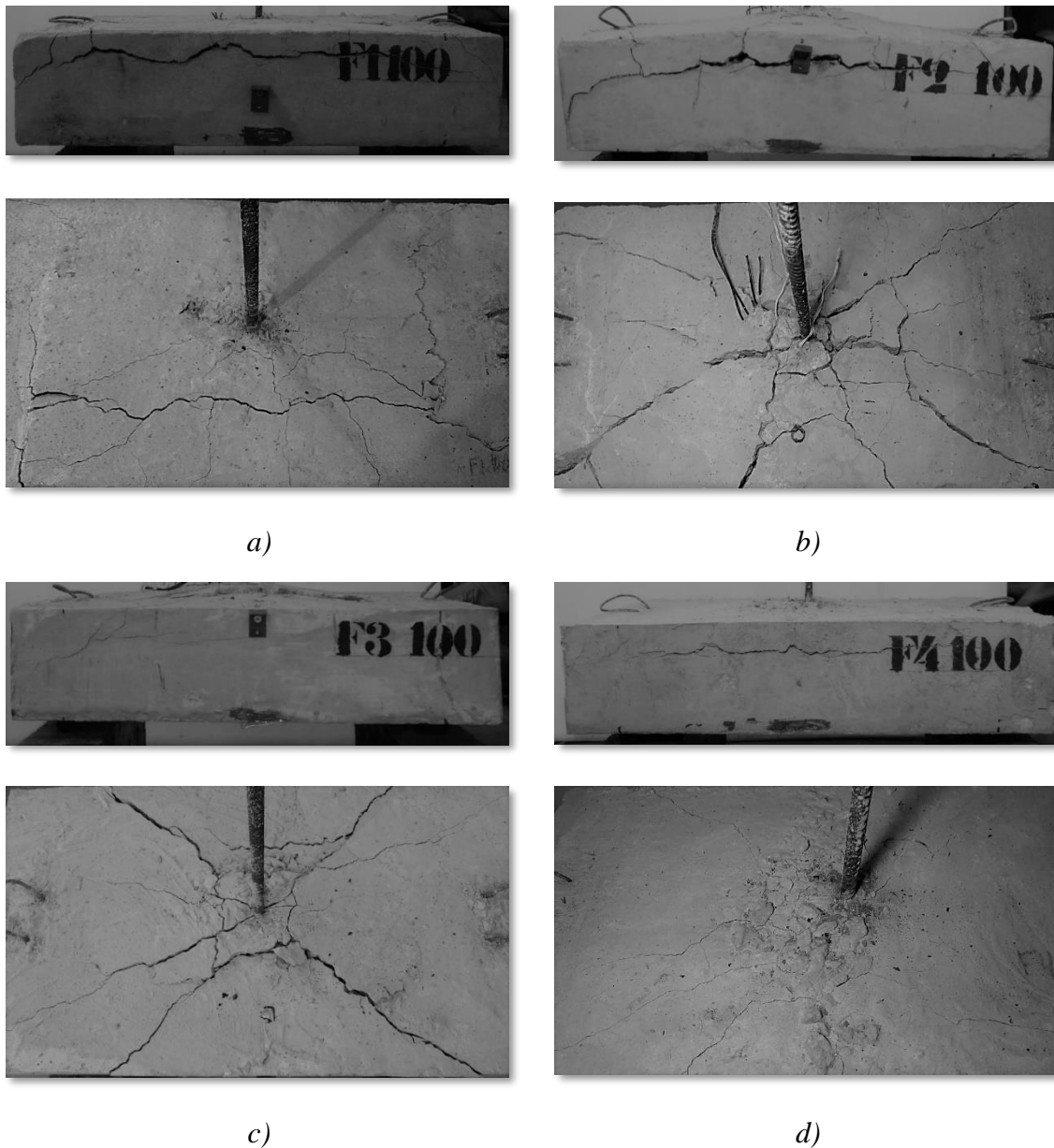


Figura 4-18 – Vista lateral e em planta dos prismas da Série 100% ensaiados: a) - *Espécime F1-0.5-100*; b) - *Espécime F2-1.1-100*; c) - *Espécime F3-2.2-100*; d) - *Espécime F4-3.5-100*

A capacidade última experimental ao arrancamento dos prismas, e as previsões teóricas de resistência ao arrancamento podem ser consultadas na Tabela 4-3, além disso, para avaliar o desempenho das previsões teóricas em relação ao resultado experimental, também é plotado o parâmetro λ para cada código normativo. O parâmetro λ foi criado partir da Equação 4-1, e mostra a relação entre a carga experimental e a previsão de carga teórica.

$$\lambda = \frac{N_{Exp}}{N_{Teo}}$$

Equação 4-1

Tabela 4-3 – Resistência experimental e previsão teórica de resistência para os prismas ensaiados

Nomenclatura		Conector	Armadura	Concreto	N_{Exp} (kN)	N , FIB (kN)	λ FIB (kN)	N , ACI (kN)	λ ACI (kN)
		h_{ef} (mm)	ρ_f (%)	AGRC (%)					
Série 0%	F1-0.5-0	119	0.5	0	75.4	60.1	1.25	67.6	1.12
	F2-1.1-0	115	1.1		87.1	55.1	1.58	61.9	1.41
	F3-2.2-0	120	2.2		110.4	60.9	1.81	68.4	1.61
	F4-3.5-0	112	3.5		125.2	53.0	2.36	59.5	2.10
Série 30%	F1-0.5-30	116	0.5	30	73.8	57.4	1.29	64.5	1.14
	F2-1.1-30	117	1.1		91.2	58.5	1.56	65.7	1.39
	F3-2.2-30	115	2.2		106.5	57.0	1.87	64.0	1.66
	F4-3.5-30	117	3.5		128.2	58.1	2.21	65.3	1.96
Série 100%	F1-0.5-100	116	0.5	100	71.7	58.0	1.24	65.2	1.10
	F2-1.1-100	113	1.1		84.4	53.7	1.57	60.4	1.40
	F3-2.2-100	118	2.2		104.0	57.3	1.81	64.4	1.61
	F4-3.5-100	112	3.5		118.1	55.1	2.15	61.9	1.91

Após a execução dos prismas e avaliando a caracterização dos materiais, foi verificado a variação de alguns parâmetros que possivelmente influenciaram no valor de carga última ao arrancamento dos espécimes. Neste sentido, afim de avaliar de maneira satisfatória os resultados de resistência ao arrancamento, criou-se o parâmetro (k, Exp), que foi obtido através da Equação 4-2. O parâmetro (k, Exp) pode ser entendido como um valor de calibração do modelo de previsão de carga, que é utilizado nos modelos normativos e variam de acordo com os parâmetros considerados em cada prescrição.

$$k = \frac{N_{Exp}}{\sqrt{f_c} \cdot h_{ef}^{0,5}} \quad \text{Equação 4-2}$$

De maneira geral, a previsão de carga para o arrancamento leva em consideração a resistência à tração do concreto e o embutimento efetivo do conector metálico. Atualmente, nenhuma prescrição normativa considera a taxa de armadura de flexão dos elementos estruturais onde são empregados pinos metálicos, como parcela de resistência ao arrancamento do conector, neste sentido, os valores de calibração dos modelos normativos são constantes e levam em consideração apenas o estado de fissuração do concreto.

A Figura 4-19, mostra a taxa de armadura de flexão em função do parâmetro (k, Exp), além disso, também foi plotado os valores de calibração dos modelos do FIB BULLETIN (2011) e ACI – 318 (2014), para as condições de concreto fissurado e não fissurado. Exemplificase, analisando a ilustração, que a taxa de armadura de flexão fornece grande influência sobre

o fator k, Exp , ao passo que o valor de calibração fornecido pelas normas apenas representa boa correlação na estimativa de carga dos espécimes com valores baixos de armadura de flexão. Afere-se então, que o fator de calibração é diretamente proporcional a $\rho_f\%$ e neste sentido, é pertinente indicar que a resistência ao arrancamento de pinos metálicos não está relacionada apenas com as propriedades mecânicas do concreto e o embutimento efetivo do conector, mas também pode ser correlacionado com o momento resistente da seção, ao passo que o incremento de aço influencia na capacidade resistente do prisma ao arrancamento, através do controle da fissuração do espécime.

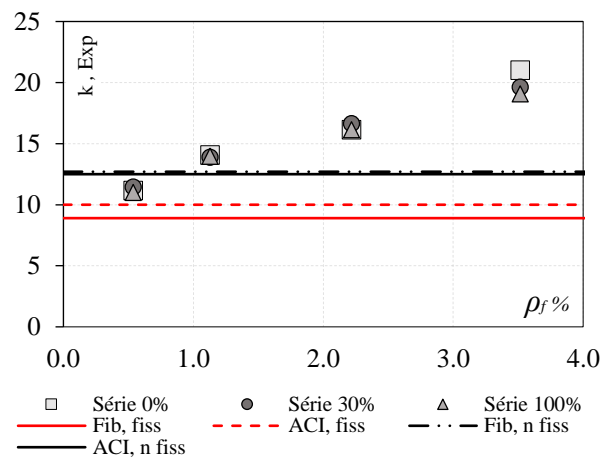


Figura 4-19 – Fator k, Exp em função da taxa de armadura de flexão

Ainda utilizando o fator (k, Exp), agora em função do teor de substituição de AGRC, observa-se de maneira geral que a substituição do agregado não exerceu influência sobre os resultados de resistência dos prismas. No entanto, avaliando o fator de calibração encontrado para os espécimes do tipo F4-3.5, observa-se uma ligeira queda para os valores de (k, Exp) em função do incremento de AGRC.

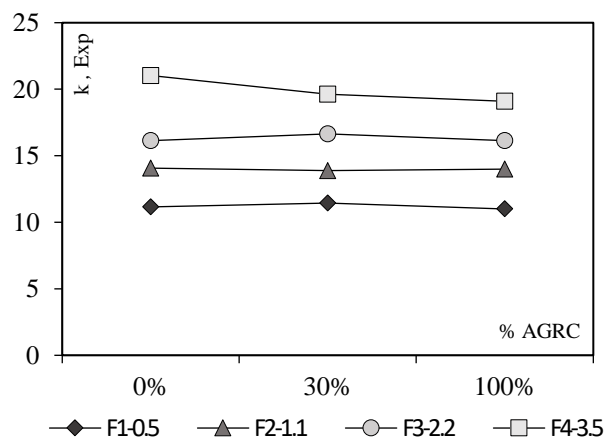


Figura 4-20 – Fator k , Exp em função do teor de substituição de AGRC

Para avaliar de maneira parcial a precisão e a dispersão dos resultados de previsão de carga normativas em relação aos resultados experimentais, levando em consideração o fator λ para cada norma, que pode ser consultado na Tabela 4-3, plotou-se o gráfico exemplificado na Figura 4-21. Em termos de valores médios de λ , para ambas as normas, observa-se que a previsão de carga mostra-se segura, sempre acima do valor ideal de variação que é o $\lambda=1$, no entanto, quanto a precisão, afere-se que os modelos normativos não descrevem de maneira satisfatória a previsão de carga, fato que pode ser atribuído à negligência das prescrições normativas quanto a influência da taxa de armadura de flexão. Quanto a previsão dada pelas normas quanto a segurança, afere-se que os modelos apresentados pelas prescrições normativas podem ser usados como metodologia de cálculo do concreto com AGRC, para o caso de pinos metálicos embutidos em concreto armado.

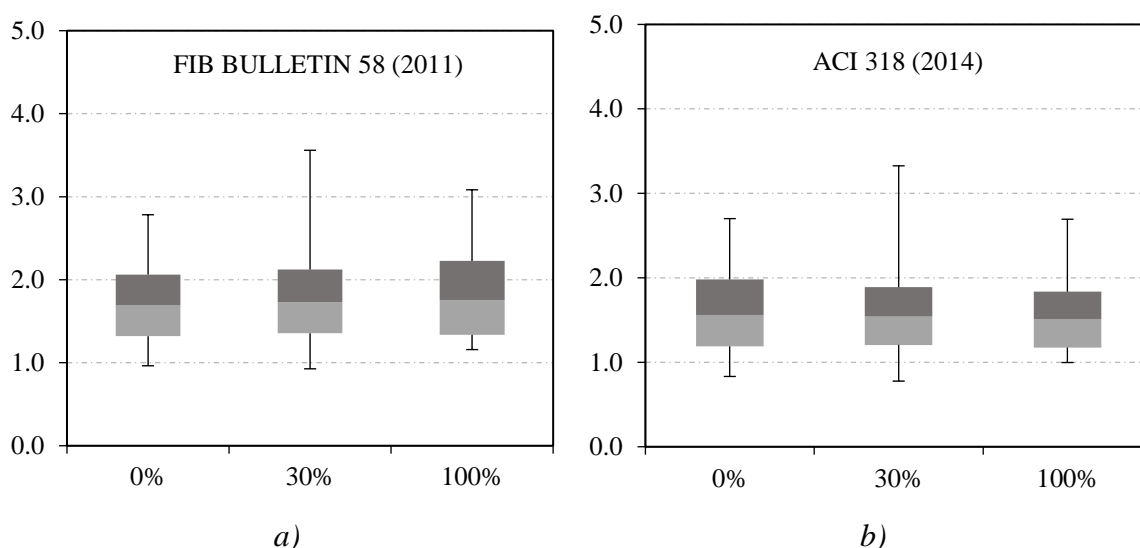


Figura 4-21 – Avaliação do fator λ em função teor de AGRC: a) Precisão e dispersão de λ para a FIB BULLETIN (2011); b) – Precisão e dispersão de λ para AC1 318 (2014)

5. Conclusões

A avaliação experimental do concreto com AGRC permitiu verificar que é possível a obtenção de concretos reciclados com propriedades mecânicas compatíveis com as do concreto convencional. Para substituições com 30% de AGRC, por exemplo, observa-se que as propriedades mecânicas não são afetadas. No entanto, para substituições com 100% de agregado reciclado, observou-se uma queda de 13% na resistência à tração e 17% para o módulo de elasticidade.

Quanto ao emprego do concreto com AGRC como material estrutural, para o caso de aplicações em estruturas sujeitas a solicitações de tracionamento de pinos metálicos, observa-se que o incremento de AGRC não altera o comportamento dos espécimes, no que diz respeito a *carga x deslocamento* e deslizamento do conector metálico. No entanto, o aumento taxa de armadura de flexão altera o padrão de deslocamento dos prismas, uma vez que o grau de fissuração na superfície do concreto exerce grande influência, tanto na rigidez quanto na carga de ruptura dos espécimes. Observou-se também que o incremento de AGRC não alterou o padrão de resposta das armaduras de flexão, mostrando que a interação aço-concreto independe do teor de substituição de agregado reciclado.

O monitoramento do cone do concreto permitiu verificar a ocorrência de maiores deformações próximas a cabeça do conector metálico e que a parcela de concreto próxima as armaduras de flexão, sofre menores deformações. O padrão de leitura observado exemplifica que a área de circunda a cabeça do conector é a primeira a sofrer microfissuração, reforçando a idealização de que é a região onde se origina a fissura do cone de ruptura do concreto. Adicionalmente, afere-se que a taxa de armadura de flexão exerce influência sobre as deformações no cone de concreto, pois, possivelmente, limita a abertura da fissura crítica de formação do cone de arrancamento. O controle da fissuração, exercido pelo incremento da taxa de armadura de flexão, influencia na capacidade resistente ao arrancamento dos prismas, fato que foi observado em todas as séries de ensaio, independente do teor de substituição de AGRC.

A taxa de armadura de flexão exerce grande influência na resistência ao arrancamento dos conectores metálicos, quando correlacionada com o fator de calibração (k, Exp), é possível observar uma relação diretamente proporcional, ao passo que o incremento de aço na seção

de concreto acresce a carga última ao arrancamento dos prismas. Sendo assim, é pertinente indicar que a resistência ao arrancamento de pinos metálicos não está relacionada apenas com as propriedades mecânicas do concreto e o embutimento efetivo do conector, mas também pode ser correlacionado com o momento resistente da seção.

No que diz respeito ao modelo de dimensionamento proposto pelas prescrições normativas, FIB BULLETIN (2011) e ACI – 318 (2014), principalmente no que se refere ao fator de calibração (k), para concretos fissurados e não fissurados, afere-se que este fator apenas apresenta boa correlação com a estimativa de carga ao arrancamento de espécimes com baixas taxas de armadura de flexão, evidencia-se então, que a ($\rho_f\%$), está sendo negligenciado pelos modelos normativos. Adicionalmente, levando em consideração a segurança, observou-se que os modelos normativos podem ser utilizados para dimensionar ligações feitas entre pinos metálicos e concreto com AGRC, independente do teor de substituição.

Quanto os resultados de resistência ao arrancamento de pinos metálicos embutidos em concreto com agregado reciclado, afere-se, levando em consideração o fator (k, Exp), que o incremento de agregado reciclado de concreto não afeta a resistência última dos espécimes. Neste sentido, evidencia-se que o material reciclado pode ser uma alternativa ao concreto convencional, no que diz respeito ao comportamento mecânico do material quando empregado em estruturas de concreto armado.

6. Referências bibliográficas

ACI 349-01. **Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures**. Reported by ACI Committee 349, Farmington Hill, Michigan, 1985.

ACI 355.1R-91. **State-of-the-art report on anchorage to concrete**. Reported by ACI Committee 355. Farmington Hill, Michigan, 1997.

ACI Commite 318, **Bulding Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14)** and Commentary, American Concrete Institute, Farmington Hill, Michigan, 2014.

A. AKBARNEZHAD, **Separation processes to improve the quality of recycled concrete aggregates (RCA)**. Woodhead Publishing Limited, 2013

A. E. B. CABRAL, V SCHALCH, D CARPENA C D MOLIN, J L DU RIBEIRO, **mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete, construction and building materials** 83 (2015) 108–118

ASHOUR, A.F. e ALQEDRAB, M.A. Concrete breakout strength of single anchors in tension using neural networks. *Avances in Engineering Software* 36, p.87–97, 2005.

A. KOPER; W KOPER; M. KOPER. **Influence of raw concrete material quality on selected properties of recycled concrete aggregates**. *Modern Building Materials, Structures and Techniques*, MBMST 2016

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739 – **Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto**. Rio de Janeiro, 2007.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222 – **Argamassa e Concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS NBR 9935:2011 – **Agregados – Terminologia**, 2011

A.K. PADMINI, K. RAMAMURTHY , M.S. MATHEWS, **Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete** *Construction and Building Materials*, (2009).

B. A. SOUZA; C. A. C. OLIVEIRA; J. C. O. SANTANA; L. A. C. VIANA NETO; D. G. SANTOS. **Análise dos indicadores pib nacional e pib da indústria da construção civil.** *Revista de Desenvolvimento Econômico*, Salvador, v. 17, n. 31, p. 140-150, jan./jun. 2015

BAZANT, Z. P. **Size effect in blunt fracture: Concrete, Rock, Metal.** *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 110, No. 4, pp.518-535, 1984.

BEHERA, M.; BHATTACHARYYA, S.K.; MINOCHA, A.K.; DEOLIYA, R.; MAITI, S. **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),pg 501-516.

BPCA, **Precast Sustainability Strategy and Charter.** *British Precast Concrete Association*. 2013.

CASUCCIO M, TORRIJOS MC, GIACCIO G, ZERBINO R. **Failure Mechanism Of Recycled Aggregate Concrete.** *Construction and Building Materials* 2008 ;22:1500–6.

C. MARTHONG; A.S.SANGMA; S.A.CHOUDHURYR., 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

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON (CEB): CEB-FIP Model Code 1990. *Bulletin d'informa-tion No. 231/214*, 1993.

CORDEIRO, L. de N. P.; **Análise dos parâmetros principais que regem a variabilidade de concretos produzidos com agregados graúdos de concreto.** Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2013

C. THOMAS , J. SETIÉN, J.A. POLANCO; **Structural recycled aggregate concrete made with precast wastes,** *Construction and Building Materials* 114 (2016) 536–546

D. PEDRO A, J. DE BRITO A, L. EVANGELISTA, **Mechanical characterization of high performance concrete prepared with recycled aggregates and silica fume from precast industry,** *Journal of Cleaner Production* 164 (2017) 939e949

DHIR, R.K., PAINE, K.A. **Suitability and practicality of using coarse RCA in normal and high strength concrete.** In: 1st International Conference on Sustainable Construction: Waste Management, Singapore, pp. 108e123. 2004

ELIGEHAUSEN, R. e BALOGH, T. **Behavior of Fasteners Loaded in Tension in Cracked Reinforced Concrete.** *ACI Structural Journal*, V. 92, No.3, Junho, 1995.

ELIGEHAUSEN, R. e FUCHS, W. **Load Bearing Behavior of Anchor Fastenings under Shear, Combined Tension and Shear or Flexural Loadings.** Betonwerk + Fertigerteiltechnik, pp. 48-56, 1988.

ELIGEHAUSEN, R. e J. OZBOLT (1992). **Influence of crack width on the concrete cone failure load** (Z.P. Bazant ed.), pp. 876–881. Elsevier Applied Science.

ELIGEHAUSEN, R. e OZBOLT, J. **Use of the tensile strength in anchorage to concrete.** **Tagungsband**, IABSE Colloquium Structural Concrete, Stuttgart, p.731-736, 1991.

ELIGEHAUSEN, R. e SAWADE, G. **A fracture mechanics based description of the pull-out behavior of headed studs embedded in concrete.** Fracture Mechanics of Concrete Structures, From Theory to Applications. Editors: Elfgrén, L., Chapman and Hall, London, New York, pp. 281-299, 1989.

ELIGEHAUSEN, R. **Wechselbeziehungen zwischen Befestigungstechnik und Stahlbetonbauweise, (Interactions of Fastenings and Reinforced Concrete Constructions), in Fortschritte im Konstruktiven Ingenieurbau**, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn. Berlin, 1984.

ELIGEHAUSEN, R.; BOUSKA, P.; CERVENKA, V.; PUKL, R. **Size effect of the concrete cone failure load of anchor bolts.** In: Bazant, Z. P. (Editor), Fracture Mechanics of Concrete Structures, pp. 517–525, Elsevier Applied Science, London, New York, 1992.

ELIGEHAUSEN, R.; COOK, R. A.; APPL, J. **Behavior and Design of Adhesive Bonded Anchors.** ACI Structural Journal, V. 103, No. 6, Dec., pp. 822-831, 2006.

ELIGEHAUSEN, R.; FUCHS, W.; MAYER, B. **Loadbearing behaviour of anchor fastenings in tension**, Part 1. BETONWERK + FERTIGTEIL-TECHNIK. p.826-832, 1987.

ELIGEHAUSEN, R.; FUCHS, W.; MAYER, B. **Loadbearing behaviour of anchor fastenings in tension**, Part 1. betonwerk + fertigteil-technik. p.826-832, 1987.

ELIGEHAUSEN, R.; MALLÉE, R.; SILVA, J. F. **Anchorage in Concrete Construction.** 1^o edition, Ernst & Sohn GmbH & Co. KG. 2006.

EOTA, ETAG No 001: **Guideline for European Technical Approval of Metal Anchors for Use in Concrete**, Brussels, 1997.

Fédération Internationale du Béton. Design of Anchorages in Concrete. *fib* Bulletin 58, Lausanne, Switzerland, 2011.

Fédération Internationale du Béton. Structural Connections for Precast Concrete Buildings. *fib* Bulletin 43. Lausanne, Switzerland, 2008.

F. FIOL A.; C. THOMAS B.; C. MUÑOZ A.; V. ORTEGA-LÓPEZ C.; J.M. MANSO C: **The influence of recycled aggregates from precast elements on the mechanical properties of structural self-compacting concrete.** Construction and Building Materials 182 (2018) 309–323

L FRANCESCONI, L PANI, F. STOCHINO, **Punching shear strength of reinforced recycled concrete slabs,** Cement and Concrete Research 41 (2011) 1037–1049

FUCHS, W.; ELIGEHAUSEN, R.; BREEN, J.E.: **Concrete Capacity Design (CCD) Approach for Fastening to Concrete, Authors' Closure to Discussion.** ACI Structural Journal, Vol. 92, No. 6, S. 794-802, 1995.

FURCHE, J. e DIETERLE, H. **Pull-outtests with headed anchors with different shape of the heads, anchorage in non-cracked concrete and in uni-axial cracks.** Report No. 9/1-86/9, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart, not published, 1989.

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.C. LEE, e H.B. CHOI **Study on interfacial transition zone properties of recycled aggregate by micro-hardness test,** Construction and Building Materials 40 (2013) 455–460

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

H. KATKHUDA A, e N. SHATARAT, **Shear behavior of reinforced concrete beams using treated recycled concrete aggregate.** Construction and Building Materials 125 (2016) 63–71

COSTA, H. D. **Resistência à Tração de Conectores de Aço Embutidos em Elementos de Concreto Armado.** Dissertação de Mestrado, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil, 105p. 2016.

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

HELENE P.R.I; TERZIAN, P., **Manual de dosagem e controle do concreto.** São Paulo, Pine Brasilia, SENAI, 1992.

INFASO. **New market chances for steel structures by innovative fastening solutions.** Stuttgart University, Final report of the RFCS project N° RFS-PR-05062, 2012.

I. NOVÁKOVÁ, K. MIKULICA **properties of concrete with partial replacement of natural aggregate by recycled concrete aggregates from precast production**, Procedia Engineering 151 (2016) 360 – 367

J. S. GONZÁLEZ, F LÓ GAYARRE, C.C. PÉREZ, P. S. ROS , Miguel A. Serrano López **Influence of recycled brick aggregates on properties of structural concrete for manufacturing precast prestressed beams**, Construction and Building Materials 149 (2017) 507–514

KATZ A. **Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete**. Cement and Concrete Research, 2003.

LEITE, M. B. **Avaliação das propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 270 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LI X. **Recycling and reuse of waste concrete in China Part I. Material behavior of recycled aggregate concrete**. Resour Conserv Recycle 2008;53:36–44.

L. BUTLER; J.S. WEST; S.L. TIGHE. **The effect of recycled concrete aggregate properties on the bond strength between RCA concrete and steel reinforcement**. Cement and Concrete Reseach 41 (2011), pg 1037-1049.

MATIAS D, DE BRITO J, ROSA A, PEDRO D. **Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates – influence of the use of superplasticizers**. Constr Build Mater 2013; 44:101–9

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 1 ed. São Paulo: Pini, 1994

MCNEIL, K.; KANG, T.H.K. **Recycled Concrete Aggregate: A Review**. International Journal of Concrete Structures and Materials Volume 7, N°. 7, (2013), pg – 61-69

MIRJANA MALEŠEV 1, VLASTIMIR RADONJANIN 1 AND SNEŽANA MARINKOVI. **Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production**, nability 2010, 2, 1204-1225; doi:10.3390/su205120

MICHAEL J. MCGINNIS , MARK DAVIS , ANDRES DE LA ROSA , BRAD D. WELDON , YAHYA C. **KuramaStrength and stiffness of concrete with recycled concrete aggregates**, Construction and Building Materials 154 (2017) 258–269

NASSAR R, SOROUSHIAN P. **Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement**. Construction and Building Materials 2012;29:368–77.

NILSSON, M. E ELFGREN, L. FASTNENINGS (**Anchor Bolts**) in **Concrete Structures - Effect of Surface Reinforcement on**. Nordic Symposium on Nuclear Technology. 2009.

NGOC KIEN BUI , TOMOAKI SATOMI, HIROSHI TAKAHASHI, **Improvement of mechanical properties of recycled aggregate concrete basing on a new combination method between recycled aggregate and natural aggregate**, Construction and Building Materials 148 (2017) 376–385

OMARY, S.; GHORBEL, E. , WARDEH, G. **Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties**. Construction and Building Materials 108 (2016),pg 163-174

Ö. ÇAKIR , **Experimental analysis of properties of recycled coarse aggregate (RCA) concrete with mineral additives**, Construction and Building Materials 68b(2014) 17–25

OŽBOLT, J. (1995). **Massstabeffekt in Beton- und Stahlbeton- konstruktionen**, Postdoctoral Thesis, University of Stuttgart, Germany, 1995.

OZBOLT, J. e ELIGEHAUSEN, R. **Fastening elements in concrete structures numerical simulatrons**. Fracture and Damage of Concrete and Rock - FDCR-2, edited by H.P. Rossmannith, p.527-547, 1993.

OZBOLT, J. e ELIGEHAUSEN, R. **Numerical analysis of headed studs embedded in large plain concrete blocks**. Proceedings of the 2nd International Conference of Computer Aided Analysis and Design of Concrete Structures, pp.465-656, 1990.

OZBOLT, J.; ELIGEHAUSEN, R.; PERISKIC, G.; MAYER, U. **3D FE analysi s of anchor bolts with large embedment depths**. Engineering Fracture Mechanics 74, p.168–178, 2007.

OZBOLT, J.; ELIGEHAUSEN, R.; REINHARDT, H. W. **Size effect on the concrete cone pull-out load**, International Journal of Fracture 95, p. 391-404. 1999.

OLONGO FT.; PADAYACHEE N. **Performance of recycled aggregate: concrete monitored by durability index**, Cement and Concrete Research 2002;32:179-85

D. PEDRO A.; J. DE BRITO A.; L. EVANGELISTA. **Mechanical characterization of high performance concrete prepared with recycled aggregates and silica fume from precast industry**; Journal of Cleaner Production 164 (2017) 939e949

PETERSEN, D.; LIN, Z.; ZHAO, J.. **Behavior and Design of Cast-in-Place Anchors under Simulated Seismic Loading. DRAFT Final Report (Volume I)**, National Science Foundation for the NEESR Project Funded under Grant. No. CMMI-990712342, Jul, 2013

REIS, F. J. L. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados provenientes de cerâmicas vermelhas com diferentes taxas de pré-saturação.** 2013. Dissertação de mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFPA, Belém.

REHM, G.; ELIGEHAUSEN, R.; MALLÉE, R. (1988): **Befestigungstechnik (Fixing technology).** *Betonkalender* 1988, Part II, Ernst & Sohn, Berlin, 1988, pp. 569–663 (in German).

REHM. G.; ELIGEHAUSEN, R.; MALLEE, R. **Befestigungstechnik, BetonkaJender, part 2, Ernst & Sohn, Berlin, pp. 569 – 663, 1988.**

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

SALESA, J A. P. BENEDICTO , ESTEBAN , ROSA VAS , CARMONA. **Physico-mechanical properties of multi-recycled self-compacting concrete prepared with precast concrete rejects,** *Construction and Building Materials* 153 (2017)

SAMI W. TABSH, AKMAL S. ABDEL FATAH. **Influence of recycled concrete aggregate on strength properties of concrete,** *Construction and Building Materials* (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, 2015

SARAVANAKUMAR P.; ABHIRAM, K; MANOJ, B. **Properties of treated recycled aggregates and its influence on concrete strength characteristics.** *Construction and Building Materials* 111 (2016), pg 611-617

SAWADE, G. **Ein energetisches Materialmodell zur Berechnung des Tragverhaltens von Zugbeanspruchtem Beton.** *Mitteilungen des Instituts für Werkstoffe im Bauwesen, Band 1994/4.* Universität Stuttgart, (1994)

S. SEARA-PAZA; B. GONZÁLEZ-FONTEBOAB; F. MARTÍNEZ-ABELLAB; J. EIRAS-LÓPEZB. **Flexural performance of reinforced concrete beams made with recycled concrete coarse aggregate;** *Engineering Structures* 156 (2018) pg - 32–45

THOMPSON, M. K.; YOUNG, M. J.; JIRSA, J. O.; BREEN, J.E; KLINGNER, R.E., **Anchorage of Headed Reinforcement in CCT Nodes,** Research Report N°1855-2, Center for Highway Research, The University of Texas at Austin, Texas, June, 2003. 160p

WIJAYASUNDARA, M.; MENDIS, P.; CRAWFORD; R H. **Methodology for the integrated assessment on the use of recycled concrete aggregate replacing natural aggregate in structural concrete.** *Journal of Cleaner Production* 166 (2017) pg – 321-334.

WOJCIECH KUBISSAA, ROMAN JASKULSKIA, ARTUR KOPERA, JACEK SZPETULSKIA **Properties of concretes with natural aggregate improved by RCA addition** 7th Scientific-Technical Conference Material Problems in Civil Engineering (MATBUD'2015)

WIJAYASUNDARA, M.; MENDIS, P.; CRAWFORD; R H. **Methodology for the integrated assessment on the use of recycled concrete aggregate replacing natural aggregate in structural concrete.** Journal of Cleaner Production 166 (2017) pg – 321-334

XIAO, J.; LI, J.; ZHANG, CH. **Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading.** Cement and Concrete Research 35 (2005) – pg 1187-1194

ZHEN HUA DUAN, CHI SUN POON, **Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars,** Materials and Design 58 (2014) PAG 19–29

7. ANEXO A

Projeto de armadura de flexão e cisalhamento dos espécimes

DETALHAMENTO ARMADURA ESPECIMES

F1-0.5-0
F1-0.5-30
F1-0.5-100

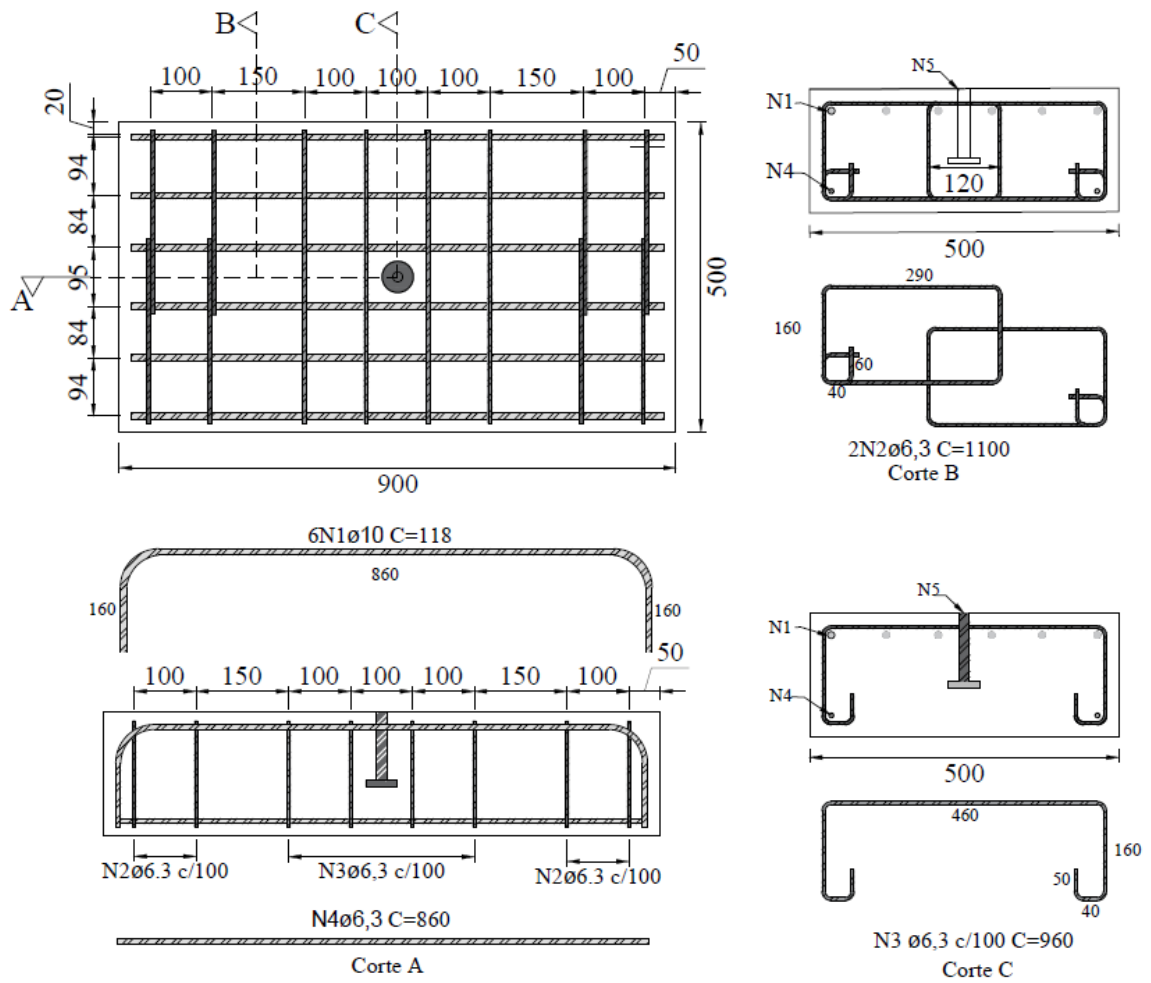


Figura 7-1 - Armadura espécime do tipo F1-0.5

DETALHAMENTO ARMADURA
ESPECIMES

F2-1.1-0
F2-1.1-30
F2-1.1-100

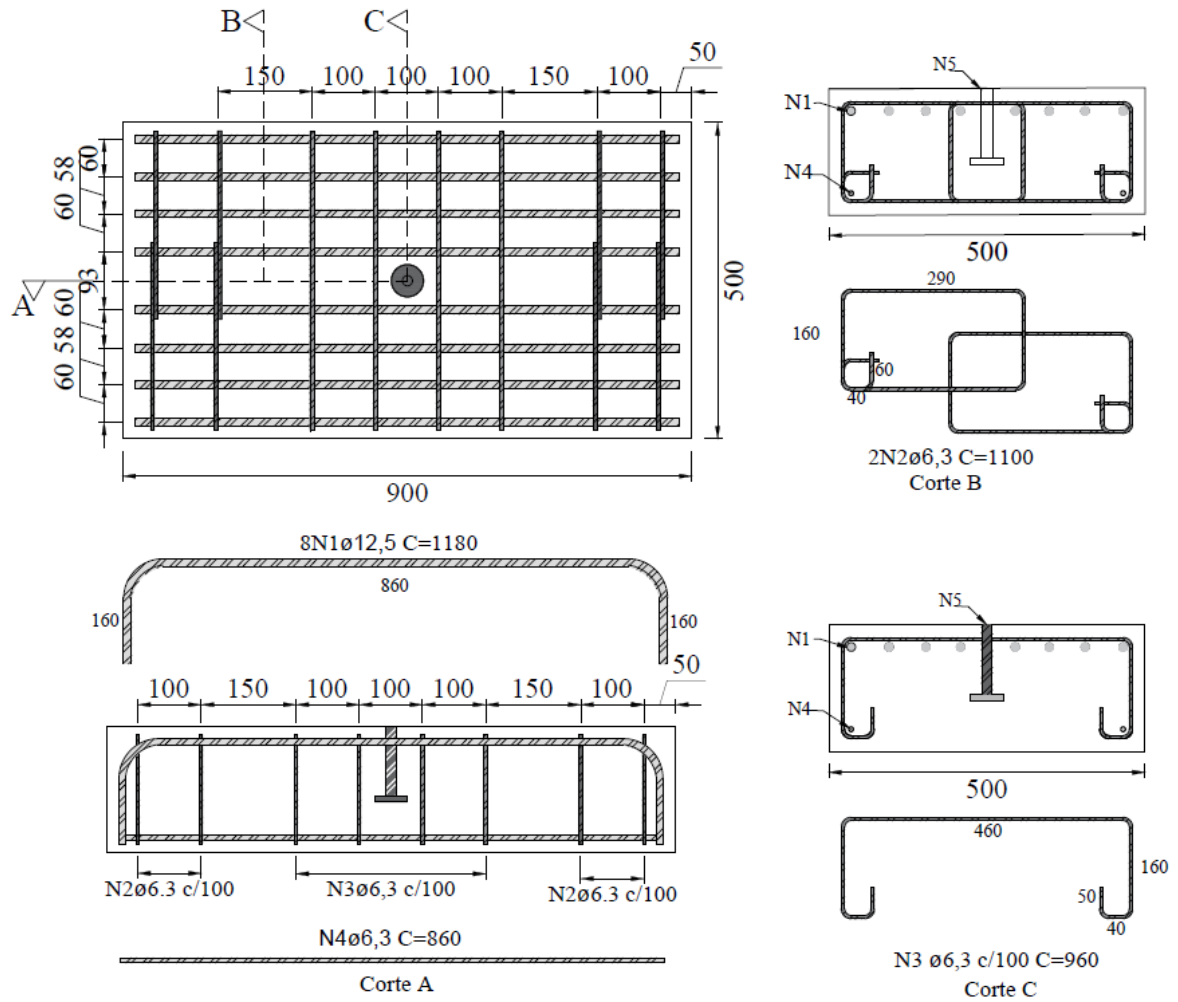


Figura 7-2 - Armadura espécime F2-1.1

DETALHAMENTO ARMADURA
ESPECIMES

F3-2.2-0
F3-2.2-30
F3-2.2-100

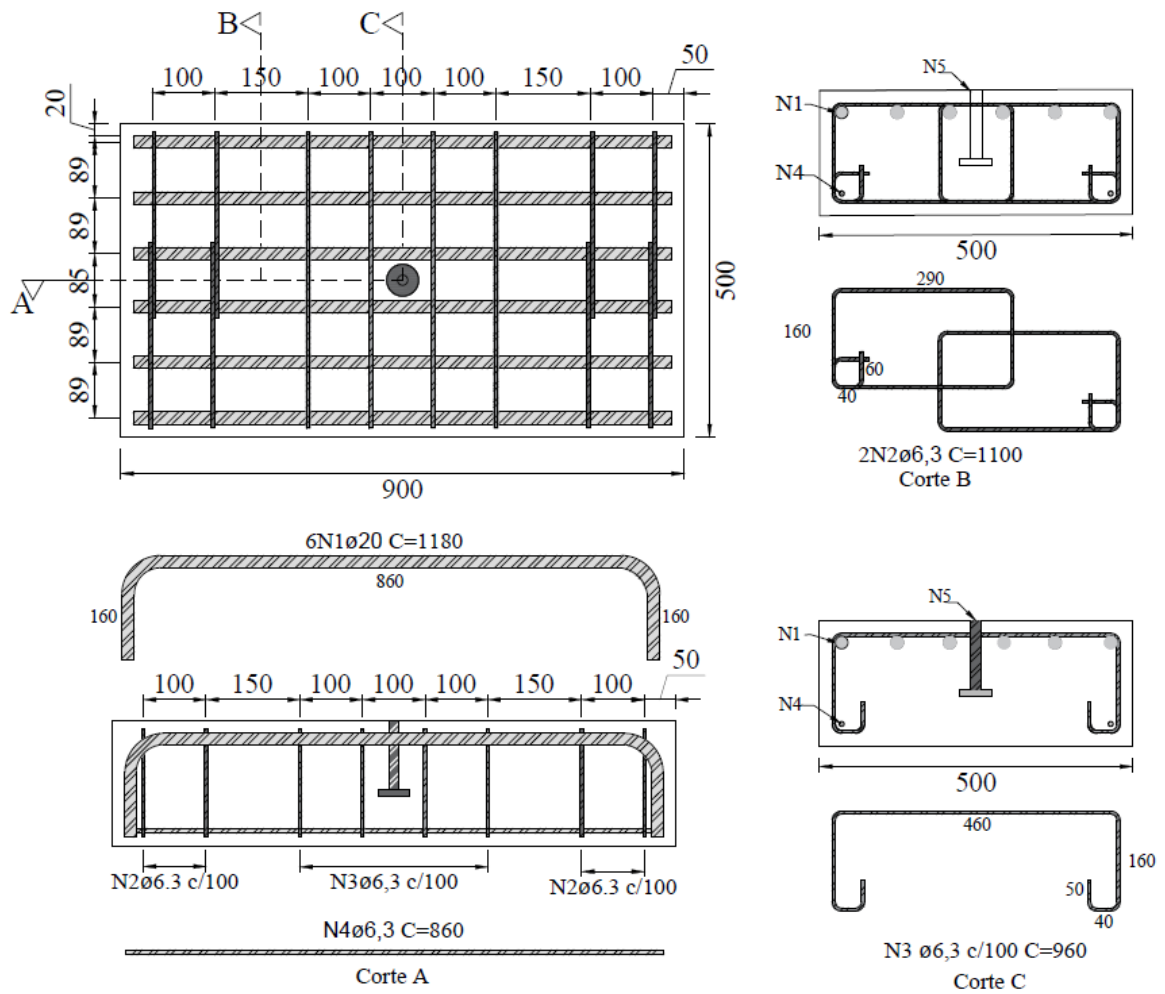


Figura 7-3 - Armadura espécime F3-2.2

DETALHAMENTO ARMADURA
ESPECIMENS

F4-3.5-0
F4-3.5-30
F4-3.5-100

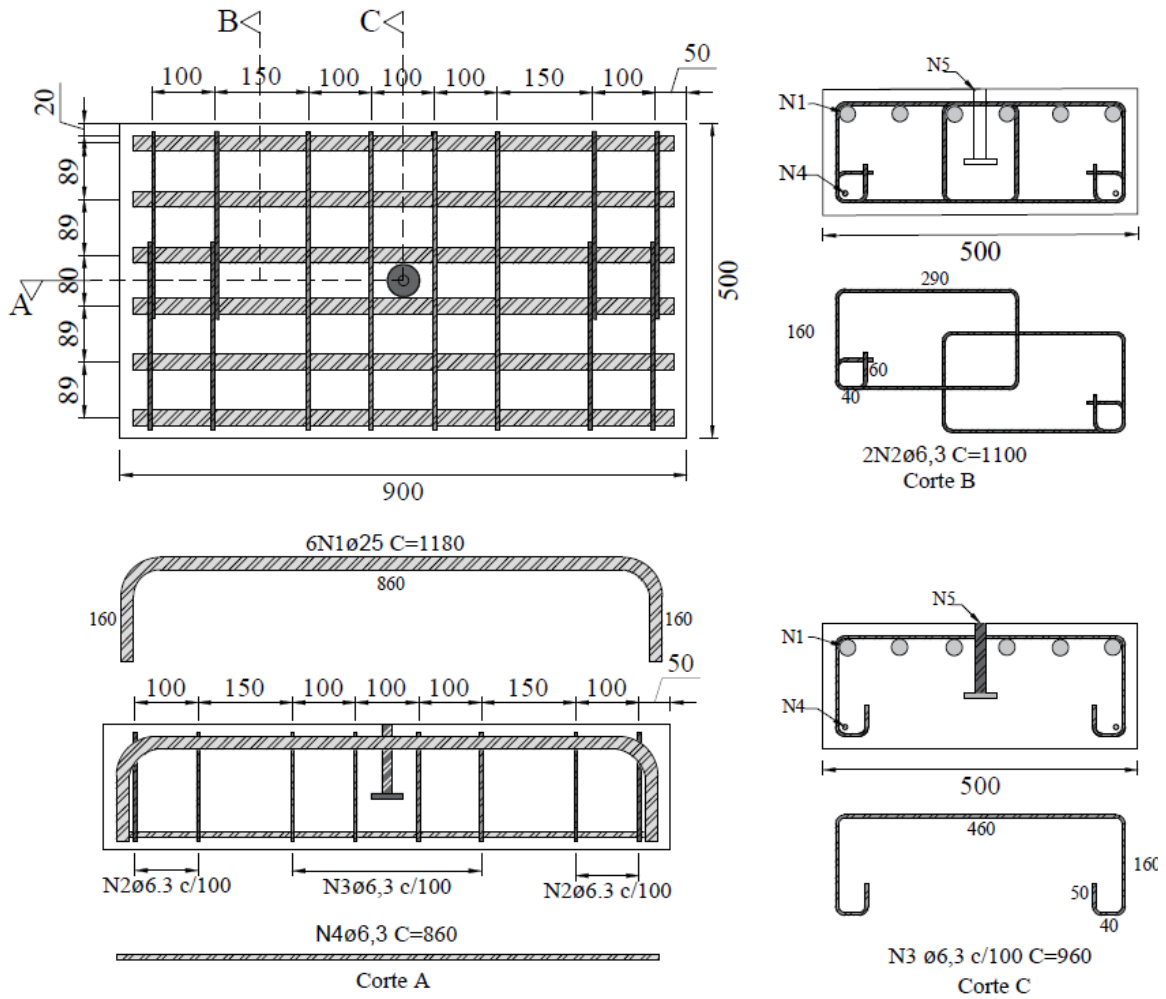


Figura 7-4 - Armadura espécime F4-3.5