

ANÁLISE TEÓRICA DA DEFLEXÃO DE VIGAS DE CONCRETO COM
AGREGADOS RECICLADOS DE RCD

José Jorge Aragão de Oliveira

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

Aprovado por:

Prof. José Mário Feitosa Lima, D.Sc
UEFS

Prof. Paulo Roberto Lopes Lima, D.Sc
UEFS

Prof. Ricardo Fernandes Carvalho, D.Sc
UFBA

FEIRA DE SANTANA, BA – BRASIL
SETEMBRO DE 2018

Ficha Catalográfica – Biblioteca Central Julieta Carteado

O47a Oliveira, José Jorge Aragão de
Análise teórica da deflexão de vigas de concreto com agregados reciclados de RCD./ José Jorge Aragão de Oliveira. – 2018.
123 f.: il.

Orientador: José Mário Feitosa Lima

Dissertação (mestrado)– Universidade Estadual de Feira de Santana, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2018.

1. Concreto armado com RCD. 2. Deflexão em vigas. 3. Concreto com agregados reciclados. 4. Deflexão – Método bilinear. I. Lima, José Mário Feitosa, orient. II. Universidade Estadual de Feira de Santana. III. Título.

CDU: 691.322

Maria de Fátima de Jesus Moreira – Bibliotecária – CRB5/1120

DEDICATÓRIA

Ao meu amado e inesquecível Pai EDVALDO, que hoje descansa no SENHOR e cuja honradez, honestidade, amor e dedicação à família, ao próximo e ao trabalho, são exemplos fundamentais que ajudaram a forjar meu caráter e que carrego por toda vida. Eterna saudade do meu maior amigo.

Ao meu inesquecível irmãozinho Edvaldo JUNIOR, um pedaço precioso de mim, que já está no SENHOR, e que partiu precocemente, deixando muita saudade.

À minha inesquecível e querida avó LINDAURA, que está na paz do SENHOR: A Linda Áurea que me acompanha desde sempre.

Vivo na esperança do grande reencontro, sentido verdadeiro da vida.

AGRADECIMENTOS

Ao CRIADOR da vida, DEUS meu e SENHOR da minha existência.

À minha virtuosa e amabilíssima mãe Maria Dione, pelo profundo e incondicional amor dedicado à minha vida.

Aos meus amados filhos Kadja e Rafael, razão do meu viver. À minha esposa Isnaia, pelo estímulo dispensado desde a primeira hora, principalmente nos momentos mais difíceis, com companheirismo, dedicação e paciência.

Aos meus avós Antônio, José Oliveira e Adalgisa, ao meu padrinho Raymundo e em especial à minha querida e estimada madrinha Haydê. Pessoas inesquecíveis e que estão no SENHOR. À toda minha família, irmã Ana Márcia, tios e primos.

Ao meu Orientador de Mestrado, Professor José Mário pela maestria com que conduziu meu trabalho, pelo apoio dispensado, principalmente nos momentos mais adversos desta jornada. Ao professor Paulo Roberto que orientou com brilhantismo a parte original da pesquisa. Destes, guardo enorme admiração e gratidão pelo cuidado e aconselhamentos. Ao Professor Ricardo Carvalho pelo exame do trabalho e análises construtivas e indispensáveis.

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação da UEFS, Cintia Maria, Anderson Gadéa, Mônica Batista, Tereza Simone, Maria do Socorro, Washington Almeida e demais docentes.

Aos colegas de Mestrado, Jodilson, Adolfo, João, Agda, Leila, Pollyana, Tahise e Verônica, pelo companheirismo compartilhados nos vários momentos de alegria e de dificuldades. Em especial, a minha amiga e companheira de estudos, Adriana Trocoli, a quem dedico uma profunda estima e gratidão por dividir comigo momentos inesquecíveis de estudo e amizade, cuja lembrança guardarei com eterno carinho. Ao velho amigo, Engenheiro Francisco Lemos Santana, hoje na paz do SENHOR, pelo estímulo e conhecimentos transmitidos no início da minha jornada profissional. A Engenheira e colega Ana Luíza, pelo acolhimento dispensado quando eu ainda era um jovem principiante na carreira de Engenheiro Civil.

Às funcionárias do Programa de Pós-Graduação, Mariana e Kátia, pela dedicação e atenção prestadas em todos os momentos que precisei.

À FAPESB, pelo incentivo a pesquisa através de bolsa de estudos, na primeira oportunidade junto ao PPGECEA, e à UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA, pela oportunidade e acolhimento.

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGECEA/UEFS como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental (M.Sc.)

ANÁLISE TEÓRICA DA DEFLEXÃO DE VIGAS DE CONCRETO COM AGREGADOS RECICLADOS DE RCD

José Jorge Aragão de Oliveira

Setembro/2018

Orientador: Dr. José Mário Feitosa Lima

Programa: Engenharia Civil e Ambiental

No Brasil, a utilização na construção civil de agregados reciclados de construção e demolição em substituição aos agregados naturais somente é permitido em concreto sem fins estruturais. As normas nacionais de engenharia civil estrutural impedem sua adoção em elemento estrutural de concreto armado. O conhecimento científico, ainda incipiente, concorre para utilização com restrições, mesmo em países onde a prática é permitida. Características físicas, como porosidade e heterogeneidade, diferem significativamente dos agregados naturais, interferindo diretamente nas suas propriedades mecânicas. É fundamental conhecer mais profundamente tais propriedades para utilização do material com garantia de segurança, durabilidade e economia.

A presente pesquisa se propôs a avaliar a Influência da substituição dos agregados naturais por agregados de RCD na deflexão imediata de vigas de concreto armado. O estudo teórico da deflexão foi feito adotando o Método Bilinear do CEB, sendo necessário a devida adequação de suas formulações às características físicas e geométricas das peças estruturais utilizadas nos resultados experimentais utilizados por outra pesquisa. Estudou-se o comportamento Momento x Deflexão para o Estado Limite de Serviço, comparando-o com os resultados experimentais. Assim foi possível avaliar o efeito da substituição dos agregados naturais por RCD no desempenho da deflexão das vigas. Concluiu-se que para 50% de substituição o efeito na deflexão é muito pouco alterado. Para 100% de substituição, há um desempenho um pouco inferior, porém com valores que permitem ser considerado satisfatório. Os resultados das análises permitem afirmar que, em relação à deflexão imediata, é possível a substituição parcial e total, dos agregados naturais por RCD.

Abstract of Dissertation presented to PPGECEA/UEFS as a partial fulfillment of the requirements for degree of Master of Civil and Environmental Engineering

THEORETICAL ANALYSIS OF DEFLECTION OF CONCRETE BEAMS WITH RCD RECYCLED AGGREGATES

José Jorge Aragão de Oliveira

September/ 2018

Advisor: Pr. Dr. José Mário Feitosa Lima

Department: Civil and Environmental Engineering

In Brazil, the use in civil construction of recycled aggregates of construction and demolition replacing natural aggregates is only allowed in concrete without structural purposes. National standards of structural civil engineering prevents its adoption as a structural element of reinforced concrete. The scientific knowledge, still incipient, competes for use with restrictions, even in countries where the practice is permitted .. Physical characteristics, such as porosity and heterogeneity significantly differ from natural aggregates, interfering directly in its mechanical properties. It is fundamental to know more deeply these properties for use of the material with guarantee of safety, durability and economy.

The present research proposed to evaluate the influence of the replacement of the natural aggregates by RCD aggregates on the immediate deflection of reinforced concrete beams. The theoretical study of deflection was made by adopting the Bilinear method of CEB, it being necessary due adequacy of the formulations physical characteristics and geometry of structural parts used in the experimental results used for further research. We studied the Moment x Deflection behavior for the State Service Limit, comparing it with the experimental results. Thus it was possible to evaluate the effect of the substitution of the natural aggregates by RCD on the performance of the deflection of the beams. It was concluded that for 50% of substitution the effect on deflection is very little altered. For 100% replacement, there is a slightly lower performance, however with values that allow, be considered satisfactory. The results of the analyzes allow to affirm that, in relation to the immediate deflection, it is possible the partial and total replacement of the natural aggregates by RCD.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS E NOMENCLATURAS	xiv
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	5
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.. ..	5
2 VIGAS DE CONCRETO ARMADO	7
2.1 GENERALIDADES	7
2.2 ASPECTOS DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DA VIGA COM SEÇÃO TIPO T.	8
2.3 PRESCRIÇÕES NORMATIVAS	13
2.3.1 Aspectos gerais	13
2.3.2 Ações e segurança das estruturas	16
2.3.3 Estado Limite de Serviço	17
2.3.4 Efeito do tempo no concreto	18
2.3.4.1 Deformações no concreto	18
3 MÉTODO BILINEAR PARA CÁLCULO DE DEFLEXÃO EM VIGAS	21
3.1 GENERALIDADES	21
3.2 DEFORMAÇÃO RELATIVA DOS MATERIAIS NA FLEXÃO SIMPLES	23
3.2.1 Aspectos do mecanismo de formação das fissuras	23
3.2.1.a Tração axial	24
3.2.1.a.1 Deformação relativa média da armadura ε_{sm} e coeficiente de distribuição ζ	25
3.2.1.b Flexão simples	28
3.3 CURVATURA MÉDIA NA FLEXÃO SIMPLES	30
3.3.1 Efeitos da armadura, da retração e fluência na curvatura	32
3.4 CÁLCULO DAS DEFLEXÕES	36
3.4.1 Coeficientes de correção k_s, k_φ, k_{cs}	41

3.4.1.1	Coeficiente de correção do efeito das armaduras k_s	41
3.4.1.2	Coeficiente de correção do efeito da fluência k_ϕ	42
3.4.1.3	Coeficiente de correção do efeito da retração k_{cs}	43
4	CONCRETO ARMADO RECICLADO	44
4.1	GENERALIDADES	44
4.2	RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	46
4.3	ASPECTOS DA PRODUÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS	48
4.4	O AGREGADO RECICLADO DE RCD	49
4.5	O CONCRETO RECICLADO DE RCD	53
4.6	ASPECTOS DO CONCRETO ESTRUTURAL COM RCD	56
4.7	PANORAMA GLOBAL DA CODIFICAÇÃO TÉCNICA	57
4.7.1	Prescrições normativas nacionais	60
4.8	EQUAÇÕES ANALÍTICAS DE PROPRIEDADES MECÂNICAS	60
4.8.1	Do concreto convencional	61
4.8.2	Do concreto com RCD	64
4.8.2.1	Relação entre a resistência à compressão e a densidade	65
4.8.2.2	Relação entre Resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão	65
4.8.2.3	Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão	67
4.9	DADOS EXPERIMENTAIS COLETADOS - ENSAIOS DE REFERÊNCIA.....	68
4.9.1	Coleta de Resíduos de Construção e demolição	68
4.9.2	Elementos estruturais confeccionados em experimento - Dados coletados ...	69
4.9.2.1	Ensaio de flexão em quatro pontos - Dados coletados	71
4.10	CONCLUSÕES GERAIS DO CAPÍTULO	72
5	APLICAÇÃO DO MODELO TEÓRICO EM VIGA T DE CONCRETO ESTRUTURAL COM AGREGADOS RECICLADOS DE RCD	75
5.1	METODOLOGIA	75
5.1.1	Levantamento de dados experimentais	75
5.1.2	Levantamento de equações de propriedades mecânicas existentes	76
5.1.3	Aplicação do Método Bilinear	76

5.1.4 Validação do modelo teórico e análise dos resultados	77
5.2 SIMULAÇÕES TEÓRICAS E ANÁLISE DOS RESULTADOS	78
5.2.1 Deflexão da viga de concreto convencional (VT1-RCD00)	78
5.2.2 Deflexão da viga de concreto com RCD50 (VT2-RCD50)	82
5.2.3 Deflexão da viga de concreto com RCD100 (VT3-RCD100)	87
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	93
6.1 CONCLUSÕES	93
6.2 SUGESTÃO PARA FUTURAS PESQUISAS	96
REFERÊNCIAS	97

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1** Laje nervurada pré-moldada em construção – fotografia de vista inferior
- Fig.-2.2.a** Transmissão de compressão da viga para a laje.
- Fig. 2.2.b** Estado plano de tensões num elemento de laje devido a flexão da viga.
- Fig. 2.2.c** Diagrama real de distribuição de tensões e largura efetiva colaborante bf.
- Figura 2.3.a** Seção de viga T sob tensões de flexão. Linha neutra situada na mesa. Representação esquemática.
- Figura 2.3.b** Seção de viga T sob tensões de flexão. Linha neutra situada na nervura da viga. Representação esquemática.
- Figura 2.4** Largura da mesa colaborante em viga T
- Figura 2.5** Laje com vigotas de concreto armado pré-fabricadas
- Figura 3.1** Linha elástica de um elemento estrutural linear, homogêneo e isotrópico.
- Figura 3.2** Viga de concreto armado sob flexão em estado de fissuração.
- Figura 3.3** Viga de concreto armado sob tração axial. Modelo real e idealizado para análise.
- Figura 3.4** Mecanismo de aparecimento progressivo das fissuras de um elemento tracionando. Níveis de tensão e deformação ao longo do elemento.
- Figura 3.5** Deformação relativa da armadura
- Figura 3.6** Modelo de cálculo para flexão simples
- Figura 3.7** Elemento de estrutura linear sob flexão simples – deformação relativa
- Figura 3.8** Diagrama de deformação relativa média total do aço e concreto. Soma das parcelas correspondentes aos Estádios 1 e 2.
- Figura 3.9** Curvas momento versus curvatura nos Estádios 1 e 2 para cargas instantâneas e sem o efeito da retração.
- Figura 3.10** Curvas momento versus curvatura nos Estádios 1 e 2, para as cargas de longa duração e para o efeito da retração uniforme do concreto.
- Figura 3.11** Zona e seção determinantes para o cálculo das flechas.

- Figura 3.12** Curva bi-linear devido a cargas instantâneas, sem efeito de retração.
- Figura 3.13** Curva bi-linear momento-deflexão, para cargas de longa duração e sem o efeito da retração
- Figura 3.14** Curva bi-linear momento-deflexão, para cargas de longa duração e sem o efeito da retração
- Figura 4.1** Demanda em agregados de construção em todo o mundo
- Figura 4.2** Descarte irregular de Entulho na cidade de Belo Horizonte
- Figura 4.3** Composição média de resíduos de três grandes cidades brasileiras.
- Figura 4.4** Usina de reciclagem de entulho (tipo fixa) da cidade de Guarulhos.
- Figura 4.5** Conjunto Móvel em Assis/SP
- Figura 4.6** Desenho esquemático dos agregados graúdo reciclado e natural; Características específicas do agregado reciclado.
- Figura 4.7** Amostras de agregados graúdos de RCD.
- Figura 4.8** Amostras de agregado miúdo de RCD
- Figuras 4.9 e 4.9a** Interface do agregado reciclado.
- Figura 4.10** Representação esquemática de amostra do concreto de RCD; Influência do agregado reciclado nas características do concreto.
- Figura 4.11** Panorama Internacional
- Figura 4.12** Relação entre a tração por compressão diametral e resistência à compressão para concreto.
- Figura 4.13** Relação entre módulo de elasticidade e resistência à compressão
- Figura 4.14** Composição média dos resíduos coletados.
- Figura 4.15** Composição do material inerte reciclável.
- Figura 4.16** Seção típica de Viga T conforme pré-moldada.
- Figura 4.17** Seção T após a moldagem e antes do ensaio
- Figura 4.18** Configuração do ensaio de flexão das vigas e indicação da fissuração
- Figura 4.19** Diagrama de carregamento do ensaio de flexão em 4 pontos.

- Figura 5.1** Viga VT1- RCD 00 - Curvas momento versus deflexão (teórica e experimental).
- Figura 5.2** Viga VT2-RCD-50 - Curvas momento versus deflexão (teórica e experimental)
- Figura 5.3** Viga VT3-RCD-100 - Curvas momento versus deflexão (teórica e experimental).

LISTA DE TABELAS

- Tabela 4.1** Aplicação do agregado reciclado segundo normas de vários países
- Tabela 4.2** Dimensões das seções das vigas.
- Tabela 4.3** Tipos de concreto utilizado na confecção de cada viga.
- Tabela 4.4** Momentos e Cargas de Serviço Experimentais.
- Tabela 5.1** VT1 RCD 00 - Simulação teórica - Método Bilinear - Dados Básicos.
- Tabela 5.1.a** VT1 RCD 00 - Simulação teórica - Método Bilinear - Dados Básicos - (Continuação da tabela 5.1)
- Tabela 5.1.b** VT1 RCD 00 - Continuação da tabela 5.1.a - Dados Básicos - Método Bilinear
- Tabela 5.2** VT2 RCD 00 Resultados das simulações teóricas do Método Bilinear
- Tabela 5.3** VT2 RCD 50 - Simulação teórica - Método Bilinear - Dados Básicos.
- Tabela 5.3.a** VT2 RCD 50 - Continuação da tabela 5.3 - Dados Básicos - Método Bilinear
- Tabela 5.3.b** VT2 RCD 50 - Continuação da tabela 5.3.a - Dados Básicos - Método Bilinear
- Tabela 5.4** VT2 RCD 50 Resultados das simulações do Método Bilinear
- Tabela 5.5** VT3 RCD 100 - Simulação teórica - Método Bilinear - Dados Básicos.
- Tabela 5.5.a** VT3 RCD 100 - Continuação da tabela 5.5 - Dados Básicos - Método Bilinear
- Tabela 5.5.b** VT3 RCD 100 - Continuação da tabela 5.5.a - Dados Básicos - Método Bilinear
- Tabela 5.6** VT3 RCD 100 - Resultados das simulações teóricas do Método Bilinear

LISTA DE SÍMBOLOS E NOMENCLATURAS

Símbolos Gregos

α : Razão entre os módulos de elasticidade longitudinal do aço e do concreto

β_1 : Coeficiente de aderência das barras

β_{RCD} : Coeficiente de aderência das barras para concreto de RCD

β_2 : Coeficiente de duração do carregamento

$\varepsilon_c T(t)$: Deformação térmica que provoca dilatação no elemento estrutural

$\phi(t, t_0)$: Coeficiente de fluência

β_c : Coeficiente que descreve o desenvolvimento da fluência no tempo após o descarregamento

ϕ_0 : Coeficiente teórico de fluência

$\varepsilon_{\sigma}(t)$: Parcela de deformação dependente da tensão

$\varepsilon_c(t)$: Deformação total no tempo

$\varepsilon_{ci}(t_0)$: Deformação imediata por ocasião do carregamento

$\varepsilon_{cc}(t)$: Deformação por fluência, no intervalo de tempo $t > t_0$

$\varepsilon_{cs}(t)$: Deformação por retração, no intervalo de tempo $t > t_0$

ε_{ed} : Deformação elástica diferida

$\beta_c(t-t_0)$: Evolução da fluência com o tempo

ε_{cs0} : Definido como o coeficiente teórico de retração

β_s : Coeficiente que descreve a evolução da retração com o tempo

t : Idade do concreto em dias

t_s : Idade do concreto no início da retração ou inchamento que é o final da cura

ζ : Coeficiente de distribuição (Método Bilinear)

ε_c : Deformação relativa do concreto

ε_s : Deformação relativa do aço

ε_{s1} : Deformação da armadura no trecho do Estádio 1 (Método Bilinear)

ε_{s2} : Deformação da armadura no trecho do Estádio 2 (Método Bilinear)

ε_{sm} : Deformação relativa média do aço (Método Bilinear)

$\Delta\varepsilon_s$: Parcela de contribuição na deformação do concreto tracionado entre duas fissuras

ε_{cm} : Deformação relativa média de compressão do concreto

ε_{c1} : Deformação relativa de compressão das fibras superiores do concreto no Estádio 1

ε_{c2} : Deformação relativa de compressão das fibras superiores do concreto no Estádio 2

ε_{s1} : Deformações relativas de tração do aço no Estádio 1

ε_{s2} : Deformações relativas de tração do aço no Estádio 2

ε_{cs0} : Coeficiente teórico de retração

$\Delta\varepsilon_s$: Parcela de contribuição na deformação do concreto tracionado

δ : Parâmetro do Método Bi-linear que define as condições de contorno da viga

ζ_b : Coeficiente de repartição

Símbolos Latinos

Ib_1 : Momento de inércia da seção bruta de concreto ativo em relação ao respectivo centro de gravidade, no Estádio 1

Ib_2 : Momento de inércia da seção bruta de concreto ativo em relação ao respectivo centro de gravidade, no Estádio 2

Ibx_1 : Momento de inércia da seção bruta de concreto ativo em relação a linha neutra, no Estádio 1

I_{bx_2} : Momento de inércia da seção bruta de concreto ativo em relação a linha neutra, no Estádio 2

I_{a_1} : Momento de inércia das seções de aço, no Estádio 1, em relação ao respectivo centro de gravidade

I_{a_2} : Momento de inércia das seções de aço, no Estádio 2, em relação ao respectivo centro de gravidade

I_{ax_1} : Momento de inércia das seções de aço, no Estádio 1, em relação a linha neutra

I_{ax_2} : Momento de inércia das seções de aço, no Estádio 2, em relação a linha neutra

k_{s1} : Coeficientes de correção das armaduras no Estádio 1 do Método Bilinear

k_{s2} : Coeficientes de correção das armaduras no Estádio 2 do Método Bilinear

ac : Flecha base (seção bruta de concreto) pelo Método Bilinear

a_1 : Flecha no Estádio 1 (Método Bilinear)

a_2 : Flecha no Estádio 2 puro (Método Bilinear)

M_r : Momento de fissuração (Método Bilinear)

a : Flecha imediata no meio do vão (Método Bilinear)

f_{cmj} : Resistência média à compressão do concreto aos j dias

f_{ckj} : Resistência característica do concreto aos j dias

f_{ck} : Resistência característica do concreto

f_{ctm} : Resistência média a tração (nomenclatura do CEB)

E_{ci} : Módulo de elasticidade tangente (MPa), conforme nomenclatura do CEB

E_c : Módulo de elasticidade longitudinal secante, conforme nomenclatura do CEB

f_{ct} : Resistência à compressão em MPa

E_c : Módulo de elasticidade longitudinal do concreto

E_s : Módulo de elasticidade longitudinal do aço

f_{cm} : Resistência à compressão em MPa, conforme CEB

$f_{ct,m}$: Resistência à tração por compressão diametral, conforme CEB

$f_{ck(50\%)}$: Resistência característica à compressão do concreto para teores de substituição de 50% de agregados graúdos e miúdos naturais por agregados de RCD

$f_{ck(100\%)}$: Resistência característica à compressão do concreto para teores de substituição de 100% de agregados graúdos e miúdos naturais por agregados de RCD

x_1 : Distância da Fibra superior mais comprimida até a Linha neutra da viga

A_s : Área de armadura de tração

A'_s : Área de armadura de compressão

$x_{1_{\text{mesa}}}$: Distância da borda superior comprimida até a linha neutra situada na mesa da viga no Estádio 1

$x_{1_{\text{nervura}}}$: Distância da borda superior comprimida até a linha neutra situada na nervura (abaixo da mesa) da viga no Estádio 1

d' : Distância da borda superior da viga até o centro de gravidade das armaduras comprimidas

h_f : Espessura da mesa da viga T

b_f : Largura da mesa da viga T

h : Altura total da seção de concreto

b_w : Largura da nervura da viga T

A_s : Área da armadura de tração

d : Altura útil da viga (posição das armaduras de tração em relação ao topo da seção de concreto)

$x_{2_{\text{mesa}}}$: Distância da borda superior comprimida até a linha neutra situada na mesa da viga no Estádio 2

$x_{2_{\text{nervura}}}$: Distância da borda superior comprimida até a linha neutra situada na nervura (abaixo da mesa) da viga no Estádio

b : Largura da seção da viga

E_{ci} : Módulo longitudinal de elasticidade do concreto aos 28 dias

$J(t, t_0)$; Função de fluência que representa a deformação total dependente da tensão por unidade de tensão

RH : Umidade relativa do ambiente (%)

$\frac{1}{r}$: Curvatura em qualquer ponto de um elemento de estrutura linear, homogêneo e isótropo, submetido à flexão simples

$(\frac{1}{r})_t$: Curvatura total de uma viga de concreto armado

$\frac{1}{r_m}$: Curvatura média

$\frac{1}{r_1}$: Curvaturas resultantes das parcelas de deformações relativas para o Estádio 1

$\frac{1}{r_2}$: Curvaturas resultantes das parcelas de deformações relativas para o Estádio 2

$(\frac{1}{r})_0$: Parcela de curvatura devido a solitação instantânea

$(\frac{1}{r})_\phi$: Efeito da fluência no concreto ao longo do tempo

$(\frac{1}{r})_\epsilon$: Parcela da curvatura proveniente do efeito da retração no concreto

$\frac{1}{r_{10}}$: Parcela de curvatura devido a solitação instantânea no Estádio 1

$\frac{1}{r_{1\phi}}$: Parcela da curvatura devido ao efeito da fluência ao longo do tempo no Estádio 1

$\frac{1}{r_{1\epsilon}}$: Parcela da curvatura proveniente do efeito da retração no concreto no Estádio 1

$\frac{1}{r_{20}}$: Parcela de curvatura devido a solicitação instantânea no Estádio 2

$\frac{1}{r_{2\varphi}}$: Parcela da curvatura devido ao efeito da fluência ao longo do tempo no Estádio 2

$\frac{1}{r_{2cs}}$: Parcela da curvatura proveniente do efeito da retração no concreto no Estádio 2

$1/r_c$: Curvatura base

$E.I_c$: Rigidez à flexão da seção bruta de concreto

k_s : Coeficiente de correção para levar em conta o efeito da armadura.

k_{s_1} : Coeficiente de correção para levar em conta o efeito da armadura no Estádio 1

k_{s_2} : Coeficiente de correção para levar em conta o efeito da armadura no Estádio 2

k_φ : Coeficiente de correção da Fluência

k_{φ_1} : Coeficiente de correção da Fluência no Estádio 1

k_{φ_2} : Coeficiente de correção da Fluência no Estádio 2

k_{cs_1} : Coeficiente de correção da retração no Estádio 1

k_{cs_2} : Coeficiente de correção da retração no Estádio 2

a : Flecha provável conforme Método Bilinear

a_1 : Flecha provável no Estádio 1, conforme Método Bilinear

a_2 : Flecha provável no Estádio 2, conforme Método Bilinear

Aa_1 : Seção de armadura tracionada no Estádio 1 da formulação do Método Bilinear

Aas_1 : Seção de armadura comprimida no Estádio 1 da formulação do Método Bilinear

Ab_1 : Seção de concreto ativo no Estádio 1 da formulação do Método Bilinear

Aa_2 : Seção de armadura tracionada no Estádio 2 da formulação do Método Bilinear

Aas_2 : Seção de armadura comprimida no Estádio 2 da formulação do Método Bilinear

Ab_2 : Seção de concreto ativo no Estádio 2 da formulação do Método Bilinear

$M_{r,D}$: Momento de fissuração na seção determinante do Método Bilinear

M_D : Momento total na seção determinante do Método Bilinear

W_c : Módulo de resistência da seção de concreto.

N: Carga de tração

Nr: Carga de fissuração

1 INTRODUÇÃO

A substituição dos agregados naturais miúdos e graúdos do concreto, por agregados resultantes do beneficiamento dos resíduos de construção e demolição (RCD), tem sido uma alternativa bastante promissora no desenvolvimento de novos materiais da construção civil, dado o crescente esgotamento das jazidas originais. Porém, a heterogeneidade e diversidade dos materiais existentes nos resíduos dão aos agregados reciclados uma complexidade de comportamento maior do que a vista para os agregados naturais. Uma consequência disso é que as correlações de propriedades usualmente estabelecidas para os concretos convencionais, a exemplo da relação entre resistência à compressão e módulo de elasticidade, não são válidas para o concreto reciclado, requerendo assim o desenvolvimento de novas formulações teóricas.

No Brasil, além de fatores mais amplos como a resistência de setores da sociedade à cultura da reciclagem, pode-se atribuir como importante causa da pouca aplicação do RCD, ao conhecimento técnico e acadêmico insuficiente sobre o uso em peças de concreto para fins estruturais. As normas brasileiras NBR 15115-2004 e NBR 15116-2004, que tratam de RCD, permitem a aplicação de agregados reciclados para fins não estruturais, podendo ser aplicados em camadas de pavimentação, blocos para alvenaria, meio-fios, passeios de pedestres, etc. Portanto, o emprego na indústria da construção civil de concreto com agregados oriundos do processo de reciclagem do RCD, embora crescente, encontra-se ainda em escala bastante reduzida no Brasil.

No âmbito internacional, estudos para utilização de concreto reciclado estrutural vêm sendo desenvolvidos desde o final da década de 80, em países como Japão, Alemanha, Dinamarca, Holanda, Reino Unido, Espanha entre outros. Focalizando alguns estudos mais recentes, cita-se a conferência internacional realizada em 2004, no âmbito do RILEM (International Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures), onde foi abordado o uso dos materiais reciclados em construções e estruturas, com destaque para o trabalho apresentado por Xiao e Zhang (2006), cujo teor trata da relação das propriedades mecânicas dos agregados reciclados de concreto.

Na Espanha, Juan (2004) estudou a influência dos agregados reciclados nas propriedades do concreto e estabeleceu equações que relacionam propriedades mecânicas do concreto de agregado reciclado e as do concreto com agregados naturais,

em função do teor de substituição. Em Portugal, Gonçalves (2007) elaborou uma metodologia propondo coeficientes de correção da performance do concreto para os casos de incorporação de pequenas e grandes quantidades de agregado reciclado no concreto. Nesse mesmo ano, no Japão, Sato *et al* (2007) estudaram o comportamento a flexão de vigas de concreto reciclado armado.

Xiao *et al* (2012) avaliaram o processo de propagação das fissuras no concreto com agregados reciclados sob cargas axiais de compressão. Gonzalez A. and Etxeberria M (2013) realizaram estudo experimental das propriedades de concreto reciclado de alto desempenho e concluíram que somente é possível obter concreto de alto desempenho e teor de substituição de 100% a partir de concreto original com resistência a compressão igual ou maior que 60 MPa. E considerando as propriedades de durabilidade, isto somente é possível com até 50% de teor de substituição dos agregados naturais por reciclados. Nos Estados Unidos, McNeil and Kang (2013) em artigo, apresenta estudo sobre as propriedades dos agregados reciclados de concreto e os efeitos do uso destes sobre as propriedades do concreto e em peças estruturais.

Yoda and Shintani (2014) constataram que o concreto possui melhor desempenho quando agregados miúdos reciclados são adicionados aos graúdos reciclados. Yehia *et al* (2015) estudaram as adaptações a serem feitas na produção de concreto com 100% de agregados reciclados para obtenção das resistências e durabilidades requeridas em diferentes aplicações. Na Índia, Sellakkannu N. e Subramani V. (2016), estudando as propriedades dos agregados reciclados, concluíram que a substituição dos agregados naturais por reciclados afetam diretamente a resistência a compressão e o módulo de elasticidade do concreto, sendo este último mais afetado no caso dos agregados graúdos que dos miúdos.

Na China, Zhou and Chen (2017) realizaram estudos experimentais para avaliar a variação das propriedades mecânicas do concreto de agregado graúdo reciclado para dois tipos diferentes de agregados do concreto de origem: a brita e o seixo. O resultado das análises comparativas mostraram significativa variação das propriedades mecânicas destes dois tipos de agregados, incluindo resistência a compressão, a flexão, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. E na Espanha, Bosque *et al* (2017), utilizando microscopia eletrônica de varredura para analisar as propriedades da zona de transição na interface pasta agregado, verificaram que as mesmas variam com o tipo de materiais constituintes presentes no agregado reciclado. E

que o impacto das propriedades da zona de transição nas propriedades macro-mecânicas do concreto depende do conteúdo relativo dos diferentes materiais constituintes presentes no agregado reciclado e das propriedades micro-mecânicas da zona interfacial pasta- agregado.

Com relação ao Brasil, embora importantes pesquisas já tenham sido realizadas, a quantidade de trabalhos concluídos ainda são insuficientes. Além disso, o RCD aqui gerado, é diferente do utilizado em outros países, não estando limitado apenas à utilização de resíduo de concreto. Desse modo, a avaliação da incorporação desses resíduos é fundamental para que se possam desenvolver novos produtos e mesmo propor adaptações ao código brasileiro de dimensionamento, no caso do uso em concreto armado. Neste sentido, importantes estudos tem sido realizados no país. Latterza (1998) avaliou o desempenho estrutural à flexão, de painéis confeccionados com concretos utilizando-se a fração graúda do material reciclado como substituição parcial ou total do material natural.

Leite (2001) estudando algumas propriedades físicas dos agregados produzidos a partir dos resíduos de construção e demolição, comparou os resultados obtidos com as especificações da Norma Brasileira por agregados naturais. A autora avaliou a influência do tipo e teor de substituição dos agregados naturais por reciclados nas propriedades do concreto fresco (massa específica e trabalhabilidade) e do concreto no estado endurecido (resistência a compressão, resistência a tração por compressão diametral, resistência a tração na flexão e módulo de deformação do concreto). Avaliou ainda o desenvolvimento da resistência com a idade dos concretos produzidos.

Vieira (2003) ao avaliar a influência da relação água/cimento e dos diferentes teores de substituição dos agregados de RCD nas taxas de corrosão das armaduras, pode analisar o comportamento da resistência a compressão..

Molin *et al* (2004) realizaram estudos experimentais para avaliar a propriedade mecânica de resistência a compressão e os aspectos de durabilidade dos concretos produzidos com agregados miúdos e graúdos reciclados. Concluíram que é possível a substituição dos agregados naturais pelos reciclados e de forma ampla, desde que seja dada primordial importância a todo o processo de obtenção, desde o beneficiamento, passando pela caracterização, dosagem adequada até utilização do concreto com agregados reciclados.

Lovato (2007) avaliou a resistência a compressão diametral, resistência a tração e módulo de deformação secante dos concretos produzidos com diferentes teores de substituição dos agregados (miúdos e graúdos) naturais pelo reciclados. Conclui que a lei de Abrams, que rege os concretos com agregados naturais, também é válida para concreto com RCD, ou seja a resistência diminui com o aumento da relação água/cimento. E que o agregado graúdo reciclado exerce uma maior influência nas resistências a compressão e tração que o miúdo.

Aragão (2007) avaliou experimentalmente o comportamento mecânico de vigas tipo T e lajes nervuradas pré-moldadas, formadas de concreto armado convencional e reciclado de RCD. No mesmo ano, Cabral (2007) ao estudar a possibilidade de substituição dos agregados naturais do concreto por agregados graúdos e miúdos de RCD, modelou e quantificou o comportamento das propriedades mecânicas (resistência a compressão e módulo de deformação) e da durabilidade.

Reis (2009) determinando experimentalmente a tensão de aderência entre barras de aço e concreto produzidos com agregados miúdos de RCD, conclui que a incorporação acarreta a diminuição das propriedades mecânicas, pois estes possuem grãos mais finos e porosos. Oliveira e Assis (2006) já haviam estudado a aderência do aço-concreto produzido com agregado graúdo reciclado. Os resultados dos ensaios experimentais apontam para uma diminuição da aderência em relação ao concreto convencional, somente a partir de 40% de teor de substituição.

Werle (2010) estudou a influência da porosidade dos agregados de concreto reciclado nas propriedades mecânicas do concreto. Aferiu que a resistência a compressão diminui proporcionalmente ao aumento daquela. Já com relação a tração, os resultados obtidos pela autora, apontam para a manutenção dos valores, independente da resistência do agregado incorporado. Esses estudos inferem ainda que, para fins estruturais, a substituição dos agregados naturais por agregados reciclados de concreto são viáveis até teores de 50%.

Como base na leitura desses trabalhos acima citados foi possível detectar que não há ainda, no Brasil, uma previsão analítica definitiva para as propriedades mecânicas (resistência à compressão e a tração, e módulo de elasticidade longitudinal) do concreto com agregados reciclados, o que permitiria o cálculo de flechas imediatas, possibilitando o controle das deflexões e evitando assim, que sejam ultrapassados os limites admitidos pelas prescrições normativas usuais. Portanto, visando contribuir com o entendimento do efeito da substituição dos agregados naturais por agregados

recicladados no desempenho da deflexão imediata de vigas de concreto armado, será realizado aqui um estudo teórico baseado no modelo Bilinear do CEB-1983 (Comitê Europeu de Beton) para a análise, até o estado limite de utilização, da deflexão imediata de vigas T, formadas por vigotas pré-moldadas e capa de concreto armado, e que foram submetidas a ensaio de flexão em 4 pontos.

No modelo serão inseridos valores de propriedades mecânicas, provenientes de equações propostas em Leite (2001), Xiao e Zhang (2006) e Juan (2004), sendo as deste último adotadas pelo International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structure. Partindo daí, será possível fazer as várias simulações teóricas, que confrontadas com os resultados experimentais existentes para estudo de caso específico, irão validar o modelo teórico adotado. Isto permitirá executar as análises necessárias para o alcance dos objetivos da pesquisa.

De fato as pesquisas realizadas no Brasil ainda não foram suficientes para viabilizar a utilização de concreto com agregados reciclados para fins estruturais.

1.1 OBJETIVOS

Objetivo Geral

- Avaliar a influência da substituição dos agregados naturais por agregados de RCD na deflexão imediata de vigas T em lajes pré-moldadas de concreto armado.

Objetivos Específicos

- Verificar a adequação de algumas equações analíticas existentes para predição das propriedades mecânicas do concreto reciclado;
- Adequar o Modelo Bilinear do CEB para o estudo da deflexão imediata de vigas T de concreto armado, utilizando agregados reciclados de RCD.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho foi dividido em seis capítulos. O primeiro capítulo compreende a introdução, onde é apresentado o objeto do trabalho, objetivos e respectiva importância do tema. O segundo capítulo trata da conceituação e aspectos

normativos das vigas de concreto armado, quanto às ações e segurança das estruturas e do Estado Limite de Serviço. O terceiro capítulo apresenta o Modelo Bilinear do CEB-1983, para cálculo de flechas de vigas de concreto armado, adaptado a viga de seção T.

O quarto capítulo aborda o concreto com utilização de agregados provenientes dos resíduos de construção e demolição da construção civil, e são apresentadas tanto as equações do CEB/FIP MODEL CODE (1990), que rege a relação entre as propriedades mecânicas do concreto convencional, bem como outras equações específicas para concreto com agregados reciclados, propostas por Leite (2001), por Juan (2004), e por Xiao e Zhang (2006).

O quinto capítulo aborda as simulações realizadas em várias vigas T em concreto armado reciclado, com as respectivas análises dos resultados obtidos. Por fim, no sexto, e último capítulo, foram registradas as considerações finais a cerca da pesquisa, e finaliza apresentando algumas sugestões para seu prosseguimento.

2 VIGAS DE CONCRETO ARMADO

2.1 GENERALIDADES

A idealização de viga, como uma das partes que compõe o sistema estrutural de edificações de concreto armado, é uma simplificação adotada pelos códigos de dimensionamento, no sentido de possibilitar de forma prática e isoladamente, a análise detida do comportamento estrutural do elemento. Assim também ocorre com outros componentes idealizados desta macro-discretização, como os pilares e as lajes. As vigas estão submetidas preponderantemente a momentos fletores e esforços cortantes oriundos de carregamentos externos e transversais, que atuam no plano em que o eixo longitudinal da viga está contido. As teorias de flexão que regem o dimensionamento estão inseridas no âmbito das pequenas deflexões, cujo comportamento flexional obedece à hipótese básica de Bernoulli, na qual, as seções transversais planas permanecem planas e perpendiculares a superfície neutra durante a deformação. Outros fatores podem também contribuir para o aumento dos esforços internos, como a fluência e retração do concreto, e também a temperatura do ambiente.

As vigas de concreto armado podem ser classificadas de acordo com o processo executivo e com a geometria. Com relação ao processo executivo, dividem-se em moldadas in loco e pré-moldadas. As moldadas in loco, possuem todos os seus constituintes executivos (forma, armadura, escoramento, etc.) montados de forma a possibilitar que toda a concretagem seja feita no próprio canteiro de obra. Já as pré-moldadas, possuem a maior parte dos seus elementos pré-fabricados fora do local de concretagem. Apenas uma pequena parte, como capa de concreto complementar, é moldada in loco. Este é o caso de vigas para lajes pré-moldadas. Um exemplo típico de lajes, que por características próprias formam um conjunto de vigas T, são as nervuradas unidirecionais. São formadas por um conjunto de nervuras paralelas e próximas, ligadas por uma mesa de espessura constante, constituindo um elemento estrutural solidário. (NBR 6118, 2014).

Com relação à geometria, as vigas podem ter seções transversais retangulares, em forma de T, de L, etc. Isto vai depender do tipo de laje utilizada, do modelo de análise estrutural mais adequado a ser adotado, e das imposições arquitetônicas. Quando se adota um modelo de discretização global da estrutura, utilizando softwares de elementos finitos, por exemplo, a parcela colaborante do concreto da laje no

comportamento da viga, já pode está considerada. Porém, quando há a separação para análise, por exemplo, em lajes, vigas e pilares, no dimensionamento, há que se determinar, conforme procedimentos dos códigos de dimensionamento, a exemplo da NBR-6118, essa parcela colaborante de laje que contribui na resistência a compressão da viga. Neste caso a viga assume, para dimensionamento, a classificação de viga de seção transversal T ou L.

Um exemplo típico de lajes que por características próprias formam um conjunto de vigas T são as nervuradas unidirecionais. São constituídas por um conjunto de nervuras paralelas e próximas, ligadas por uma mesa de espessura constante, formando um elemento estrutural solidário (NBR 6118, 2014). Na figura 2.1, a seguir, está ilustrada a fotografia de uma laje nervurada em construção, formando um conjunto de vigas T paralelas.



Figura 2.1 Laje nervurada pré-moldada em construção – fotografia de vista inferior
Fonte: O Autor (2018)

2.2 ASPECTOS DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DA VIGA COM SEÇÃO TIPO T.

Süssekind (1987) ressalta que, para que haja compatibilidade de deformações entre a viga e a laje durante a flexão, parte das tensões de compressão da nervura é transmitida para a laje, fazendo surgir na superfície de ligação laje-nervura tensões de cisalhamento. A rigor, as tensões de compressão nesta parcela de laje solidária com a

parte superior da viga, não se distribui uniformemente, sendo maior (pico de tensão) no eixo central da viga, conforme ilustrado na parte b da Figura 2.2.

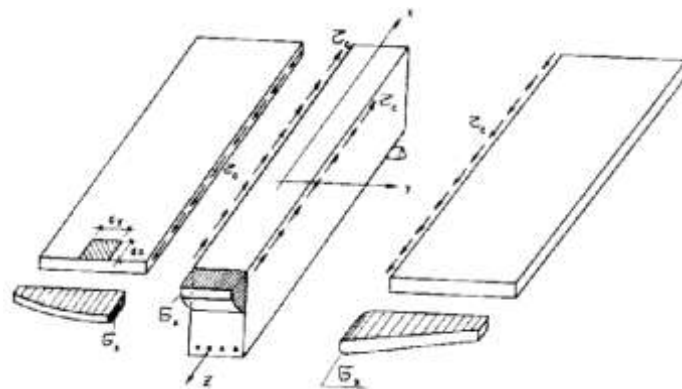


Fig. 2.2.a Transmissão de compressão da viga para a laje.
Fonte: Sússekind (1987)

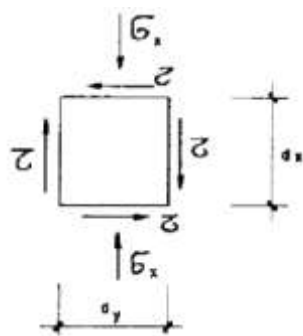


Fig. 2.2.b Estado plano de tensões num elemento de laje devido a flexão da viga.
Fonte: Sússekind (1987)

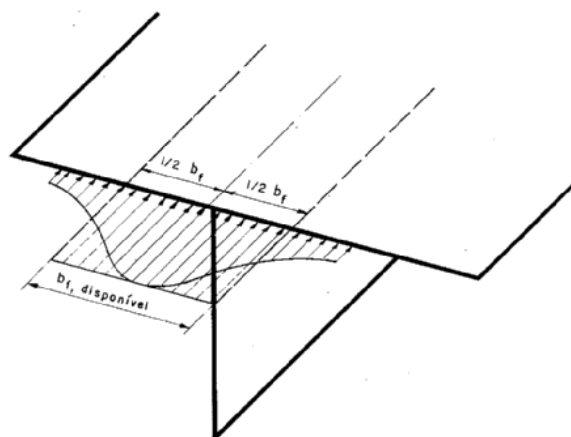


Fig. 2.2.c Diagrama real de distribuição de tensões e largura efetiva colaborante b_f .
Fonte: Fusco (1981)

A avaliação exata da distribuição é feita através do estudo da laje, nesta região, considerando-a como chapa (elemento de superfície plana, sujeita a ações principalmente no seu plano), no âmbito da Teoria da Elasticidade. Pode-se, a partir da determinação desta distribuição, adotar uma largura efetiva b_f , cuja força resultante das tensões seja igual a aquela que realmente atua na laje.

As Figuras 2.2.a e 2.2.b ilustram como as tensões de compressão da alma da viga são transmitidas para a laje, e o estado plano de tensões na laje devido à flexão da viga. Por sua vez, a Figura 2.2.c mostra os diagramas real e equivalente de distribuição de tensões de compressão na laje proveniente da flexão da viga e a largura colaborante de laje. Porém, segundo Leonhardt (2008), a distribuição exata de tensões é determinada pela aplicação da equação diferencial (função de tensões de Airy), a qual, conforme Sussekind (1987), depende de outras variáveis como condições de contorno, tipo de carregamento, relações geométricas mesa nervura da viga, o que torna o cálculo matemático complexo e anti-prático. Por isso, a NBR 6118 propõe procedimento prático para determinação de b_f (SUSSEKIND, 1987), conforme será apresentado no item 2.3 seguinte.

Em vigas com seção T, a posição da linha neutra para o estágio I e para o estágio II, conforme representações mostradas nas Figuras 2.3.a e 2.3.b, pode ser estabelecida, respectivamente, pelas equações [2.1.a], [2.1.b], [2.1.c] e [2.1.d], a seguir:

Para $x_1 \leq hf$ (linha neutra na mesa):

$$x_{1_{\text{mesa}}} = \frac{2.A'_S.\alpha.d' - 2.A'_S.A'_S + hf^2.bf + h^2.bw - hf^2.bw + 2.A_{S1}.\alpha.d_1 - 2.A_{S1}.d_1 + \dots}{2.A'_S.\alpha - 2.A'_S + 2.hf.bf + 2.h.bw - 2.hf.bw + 2.A_{S1}.\alpha - 2.A_{S1} + \dots} \dots\dots\dots [2.1.a]$$

$$\dots\dots\dots \frac{\dots\dots + 2.A_{S2}.\alpha.d_2 - 2.A_{S2}.d_2 + 2.A_{S3}.\alpha.d_3 - 2.A_{S3}.d_3}{\dots\dots + 2.A_{S2}.\alpha - 2.A_{S2} + 2.A_{S3}.\alpha - 2.A_{S3}}$$

Para $x_1 > hf$ (linha neutra na nervura):

$$x_{1_{\text{nervura}}} = \frac{hf^2.bf - A'_S.\alpha.d' - A'_S.d' + h^2.bw + 2.A_{S1}.\alpha.d_1 - 2.A_{S1}.d_1 + \dots}{2.hf.bf - 2.hf.bw + A'_S.\alpha - A'_S + 2.h.bw + 2.A_{S1}.\alpha - 2.A_{S1} \dots\dots\dots} \dots\dots\dots [2.1.b]$$

$$\dots\dots\dots \frac{\dots\dots + 2.A_{S2}.\alpha.d_2 - 2.A_{S2}.d_2 + 2.A_{S3}.\alpha.d_3 - 2.A_{S3}.d_3}{\dots\dots + 2.A_{S2}.\alpha - 2.A_{S2} + 2.A_{S3}.\alpha - 2.A_{S3}}$$

sendo:

$x1_{\text{mesa}}$: Distancia da borda superior comprimida até a linha neutra situada na mesa da viga no Estádio 1

$x1_{\text{nervura}}$: Distancia da borda superior comprimida até a linha neutra situada na nervura (abaixo da mesa) da viga no Estádio 1

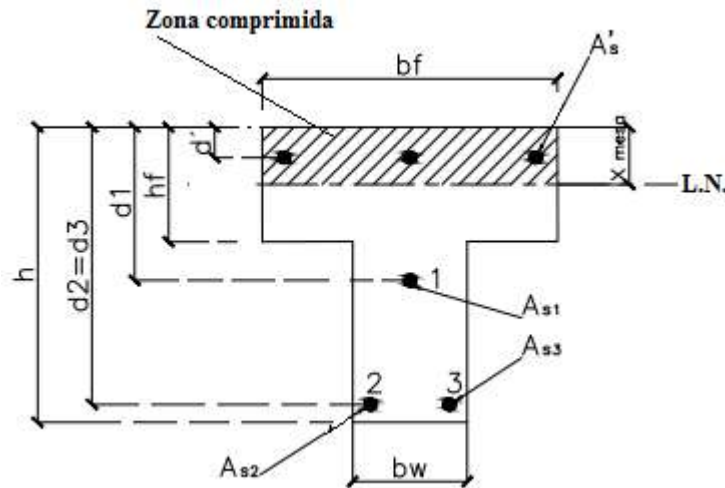


Figura 2.3.a Seção de viga T sob tensões de flexão. Linha neutra situada na mesa. Representação esquemática.

Fonte: O Autor (2018)

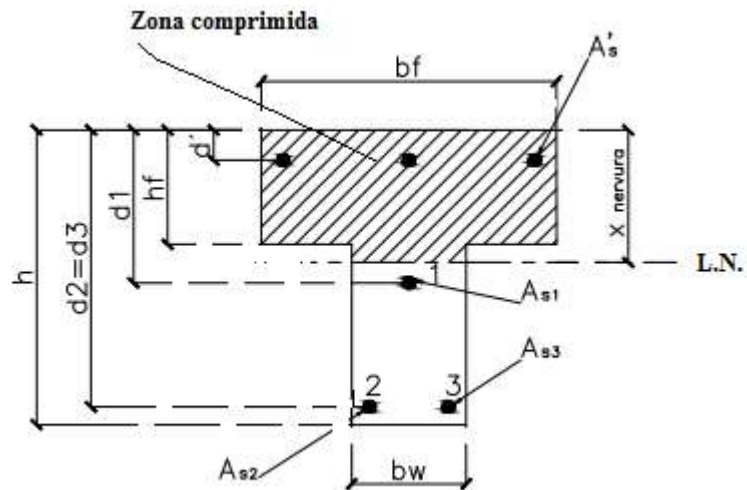


Figura 2.3.b Seção de viga T sob tensões de flexão. Linha neutra situada na nervura da viga. Representação esquemática.

Fonte: O Autor (2018)

Para $x_2 \leq hf$ (linha neutra na mesa):

$$x_{2_{\text{mesa}}} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4.A.C}}{2.A} \quad [2.1.c]$$

onde:

$$A = hf \quad [2.1.c.1]$$

$$B = 2.A'_s.\alpha - 2.A'_s + 2.A_{s1}.\alpha - 2.A_{s1} + 2.A_{s2}.\alpha - 2.A_{s2} + 2.A_{s3}.\alpha + 2.A_{s3} \quad [2.1.c.2]$$

$$C = -2.A'_s.\alpha + 2.A'_s.d' - 2.A_{s2}.\alpha.d_2 + 2.A_{s2}.d_2 - 2.A_{s3}.\alpha.d_3 + 2.A_{s3}.d_3 \quad [2.1.c.3]$$

Para $x_2 \geq hf$ (linha neutra na nervura):

$$x_{2_{\text{nervura}}} = \frac{-M + \sqrt{M^2 - 4.L.N}}{2.L} \quad [2.1.d]$$

onde:

$$L = bw \quad [2.1.d.1]$$

$$M = 2.hf.bf - 2.hf.bw + 2.A'_s.\alpha - 2.A'_s + 2.A_{s1}.\alpha - 2.A_{s1} + \dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots + 2.A_{s2}.\alpha - 2.A_{s2} + 2.A_{s3}.\alpha - 2.A_{s3} \quad [2.1.d.2]$$

$$N = -hf^2.bf + hf^2.bw - 2.A'_s.\alpha + 2.A'_s.d' - 2.A_{s1}.\alpha.d_1 + \dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots - 2.A_{s2}.\alpha.d_2 + 2.A_{s2}.d_2 - 2.A_{s3}.\alpha.d_3 + 2.A_{s3}.d_3 \quad [2.1.d.3]$$

sendo:

$x_{2_{\text{mesa}}}$: Distancia da borda superior comprimida até a linha neutra situada na mesa da viga no Estádio 2

$x_{2_{\text{nervura}}}$: Distancia da borda superior comprimida até a linha neutra situada na nervura (abaixo da mesa) da viga no Estádio 2

As1, As2 e As3 as áreas das armaduras de tração nas posições 1, 2 e 3, respectivamente;

A's a área das armaduras de compressão;

d' a posição das armaduras de compressão, com relação ao topo da seção;

d1, d2 e d3 as posições das armaduras de As1, As2 e As3, respectivamente, com relação ao topo da seção.

h e b altura total da seção e largura da seção, respectivamente;

bw a largura da nervura, bf e hf a largura e a espessura da mesa, respectivamente, da viga de seção T;

$\alpha = \frac{E_s}{E_c}$ razão entre os módulos de elasticidade longitudinal do aço e do concreto.

É importante observar que as equações [2.1.a] e [2.1.b] foram deduzidas de acordo com a hipótese das seções planas, e considerando que as deformações ε_c e ε_s não atinjam valores que façam o concreto e o aço saírem do regime elástico. As equações [2.1.c] e [2.1.d] foram determinadas desprezando-se a contribuição do concreto na região fissurada.

2.3 PRESCRIÇÕES NORMATIVAS

2.3.1 Aspectos gerais

As estruturas em geral podem ser idealizadas como a composição de elementos estruturais básicos, classificados e definidos de acordo com a sua geometria e sua função estrutural. Estão divididas em: elementos lineares e elementos de superfície. Os elementos lineares são as vigas, os pilares, os tirantes e os arcos. Os elementos de superfície são as placas, as chapas, as cascas e os pilares paredes.

As vigas são definidas pela NBR 6118 (2014), no subitem 14.4.1.1, como “Elementos lineares em que a flexão é preponderante”. Nesse sentido, os elementos lineares, dentro do contexto dos elementos estruturais, são definidos por esta norma como “aqueles em que o comprimento longitudinal supera em pelo menos três vezes a maior dimensão da seção transversal, sendo também denominados de barras”.

O item 14.5.2 dessa norma prescreve que: “Admite-se comportamento elástico-linear para os materiais”, e que “Em análises locais para cálculo dos deslocamentos, na eventualidade da fissuração, esta deve ser considerada”. Acrescenta que o valor a ser adotado para o módulo de elasticidade, em princípio, deve ser o módulo de elasticidade secante e remetendo ao item 8.2.9, define que o módulo de Poisson deve ser igual a 0,2. No item 14.6.1, estão definidas as hipóteses para “estruturas ou partes destas que possam ser assimiladas a elementos lineares”, incluindo as vigas, que são:

- a) Manutenção da seção plana após a deformação;
- b) Representação dos elementos por seus eixos longitudinais;
- c) Comprimento limitado pelos centros de apoios ou pelo cruzamento com o eixo de outro elemento estrutural”.

Quanto ao concreto, para o tipo convencional, suas propriedades mecânicas (módulo de elasticidade longitudinal e resistência à tração), serão, conforme transcritas no item 4.8.1 do presente trabalho, obtidas segundo as equações propostas pelo CEB-1990, visto que o método a ser aplicado para o cálculo de deflexões de vigas é o Modelo Bilinear do CEB-1983, em cuja formulação, estas propriedades estão inseridas. Já para a resistência a compressão, como os dados utilizados foram experimentais, resultados de amostras coletadas e ensaiadas no Brasil, seguindo a NBR 5738 (2015), NBR 5739 (2018) e NBR 12655 (2015), então, vale para a obtenção desta propriedade, a codificação nacional. Quanto ao aço, segue as especificações da NBR-7480 (2007) e NBR-7481 (1990).

Conforme descrito no item anterior, devido a complexidade prática do cálculo matemático da distribuição de tensões de compressão na laje, transmitida pela parte comprimida da alma da viga, para determinação da parcela colaborante da mesa de compressão na resistência do elemento estrutural, a NBR 6118 prescreve procedimento neste sentido, no item 14.6.2.2, adotando considerações sobre a largura dessa parcela de laje a ser considerada. Esta largura, denominada de b_f , é a soma da largura geométrica b_w da viga, mais 10% da distância entre os pontos de momento nulo (para cada lado da viga em que houver laje colaborante).

Por sua vez, essa distância pode ser obtida a partir do diagrama de momento fletor, ou de forma prática e simplificada, em função de coeficientes aplicados ao vão total entre os apoios, em função das condições de contorno das extremidades, conforme propõe a referida norma. A Figura 2.4 mostra a parcela de contribuição da laje para a resistência a compressão da viga, definida pela largura colaborante da mesa da viga de seção transversal T.

A viga utilizada e analisada, como estudo de caso no presente trabalho, é classificada como do tipo T pré-fabricada de concreto armado. Esta constitui um dos elementos que compõe as lajes nervuradas unidirecionais pré-fabricadas. A norma que fixa os requisitos dos elementos que compõem este tipo de laje é a NBR-14859-1 (2016), a qual define que “Laje nervurada constituída por nervuras principais, longitudinais, dispostas em uma única direção.” A rigor, dos seus componentes, apenas as vigotas são pré-fabricadas, pois os demais (capa de concreto da parte superior da laje, elementos de enchimento, a armadura e o concreto complementar para as nervuras e vigotas pré-fabricadas), são executados no local da obra. As vigotas podem ser de concreto armado, concreto protendido, ou de concreto com armaduras treliçadas.

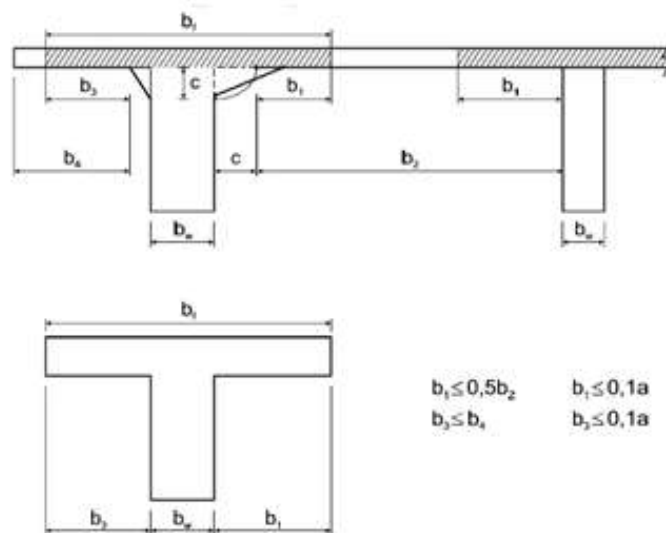


Figura 2.4 Largura da mesa colaborante em viga T Fonte: NBR-6118 / 2014.

A Figura 2.5, conforme esquematizado no item 3.1.1 (Fig1) da NBR-14859-1 (2016), mostra uma seção transversal de laje pré-fabricada unidirecional formando um conjunto de vigas T paralelas, interligadas por uma mesa de compressão.

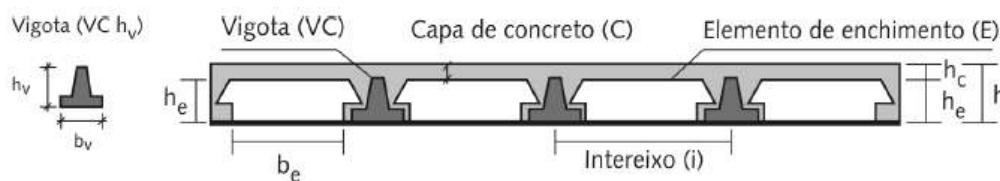


Figura 2.5 Laje com vigotas de concreto armado pré-fabricadas Fonte: NBR. 14859-1.

Este tipo de sistema requer primeiramente a implantação de vigas pré-moldadas tipo T invertidas, paralelamente espaçadas em intervalos regulares e em seguida preenchidos com elementos cerâmicos, de EPS ou de outros materiais (Lima *et al* 2018). Em seguida, na parte superior, executa-se uma capa de concreto moldada *in loco*, completando o conjunto estrutural. A armadura positiva de flexão está inserida nas vigas invertidas (vigotas). Quanto as armaduras negativas superiores, se necessárias, são incorporadas na capa de concreto. Para pequenos vãos, que é o caso de habitações populares e construções de pequeno porte, não necessitam de armadura de cisalhamento. O presente trabalho de pesquisa tem este sistema, sendo objeto de estudo a utilização de concreto com agregados reciclados de RCD na capa superior da viga T. Lima *et al* 2018).

2.3.2 Ações e segurança das estruturas

Conforme a NBR 8681 (2003), as ações nas estruturas são classificadas, segundo sua variabilidade no decorrer do tempo, em: ações permanentes, variáveis e excepcionais. As ações permanentes poderão ser diretas e indiretas. Associadas as diretas estão os pesos próprios dos elementos construtivos, inclusive o da estrutura, dos equipamentos fixos, enfim todas ações permanentes a elas aplicadas invariavelmente durante toda a vida útil. São consideradas as ações permanentes indiretas, a protensão, os recalques de apoio e a retração e fluência dos materiais.

As ações variáveis são divididas em normais e especiais. As primeiras são aquelas em que há probabilidade de “ocorrência suficientemente grande para que sejam obrigatoriamente consideradas no projeto das estruturas de um dado tipo de construção” NBR 8681 (2003). As especiais são as ações sísmicas ou acidentais de natureza ou de intensidade especiais, a exemplo das explosões e impactos. As ações variáveis também podem ser divididas em diretas e indiretas: Nas diretas estão incluídas as acidentais previstas para o uso da construção, as ações do vento, da água, ações variáveis que ocorre durante a fase de construção. Nas ações variáveis indiretas estão, a variação da temperatura e as ações dinâmicas.

Dentro desse contexto de tipos de ações, no estudo de caso a ser analisado no presente trabalho, aplicam-se apenas as ações permanentes diretas, e as variáveis diretas, supondo-as atuando integralmente. Não serão englobadas na análise, portanto, as ações permanentes indiretas e variáveis indiretas. Portanto ficará restrita as cargas imediatas de curta duração, não compreendendo os efeitos de fluência retração e temperatura.

As estruturas de concreto armado, para que atendam as condições de segurança e durabilidade, devem obedecer a certos limites de dimensionamento estabelecidos pelos códigos normativos. A NBR 8681 (2003), que fixa os requisitos exigíveis na verificação da segurança das estruturas usuais da construção civil, define os Estados Limites de uma estrutura como sendo aqueles que, se ultrapassados, tornam a estrutura inadequada às finalidades de construção. São classificados como: estados limites últimos e estados limites de serviço. Os estados limites últimos (ELU) são aqueles que, conforme a NBR 6118 (2014), pela sua simples ocorrência, determinam a paralisação, no todo ou em parte, do uso da construção. O ELU está relacionado ao colapso, ou qualquer outra

forma de ruína estrutural. No dimensionamento, implica diretamente na determinação das seções de concreto e aço da peça estrutural.

Os Estados Limites de Serviço (ELS), conforme norma NBR 8681 (2003), são aqueles que “por sua ocorrência, repetição ou duração, causam efeitos estruturais que não respeitam condições especificadas para o uso normal da construção, ou que são indícios de comprometimentos da durabilidade da estrutura”. No dimensionamento estão diretamente relacionados com o cálculo da flecha e da fissuração, cujos valores deverão obedecer a limites normativos. A flecha, por sua vez, é a soma dos efeitos provocados imediatamente à aplicação do carregamento (flecha imediata) e de outras parcelas de retração do concreto e do efeito diferido ao longo da vida útil, provocado pela fluência do concreto.

2.3.3 Estado Limite de Serviço

Conforme já visto, a verificação para o estado limite de serviço se restringe apenas ao cálculo das deflexões, ou mais especificamente das flechas. Esses deslocamentos não podem ultrapassar os limites estabelecidos pelos códigos normativos. A norma NBR 6118 (2014) define, no subitem 13.3, deslocamentos limites como “valores práticos utilizados para verificação em serviço do estado limite de deformações excessivas da estrutura”. E, conforme tabela 13.2 dessa norma, estabelece esses limites em função do vão da peça estrutural e segundo o tipo de efeito que as deformações possam causar. Nesse mesmo subitem, são estabelecidos os seguintes critérios: aceitabilidade sensorial; efeitos estruturais em serviço; efeitos em elementos não estruturais e efeitos em elementos estruturais. Estes critérios estão assim definidos pela norma:

“a) Aceitabilidade sensorial: o limite é caracterizado por vibrações indesejáveis ou efeito visual desagradável. A limitação da flecha para prevenir essas vibrações, em situações especiais de utilização, deve ser realizada como estabelecido na seção 23 (*da norma*);

b) Efeitos específicos: os deslocamentos podem impedir a utilização adequada da construção;

c) Efeitos em elementos não estruturais: deslocamentos estruturais podem ocasionar o mau funcionamento de elementos que, apesar de não fazerem parte da estrutura, estão vinculados;

d) Efeitos em elementos estruturais: os deslocamentos podem afetar o comportamento do elemento estrutural, provocando afastamento em relação às hipóteses de cálculo adotadas. “Se os deslocamentos forem relevantes para o elemento considerado, seus efeitos sobre as tensões ou sobre a estabilidade da estrutura devem ser considerados, incorporando-as ao modelo estrutural adotado.”

2.3.4 Efeito do tempo no concreto

Às deformações provenientes das ações que ocorrem imediatamente ao instante inicial de utilização da estrutura, devem ser adicionados os efeitos no concreto estrutural diferidos no tempo devido às ações de fluência e retração do concreto. Ao longo do tempo, em toda peça solicitada por tensão constante surgem deformações. Quando descarregada observa-se que parte destas deformações são restituídas (deformação elástica diferida) e uma outra parte não (deformação plástica diferida). A este fenômeno denomina-se de Fluência. (IBRACON, 2005).

Conforme Sussekind (1987), um outro efeito, independente do carregamento externo, que provoca deformação volumétrica no concreto, pela perda da água quimicamente dissociada do mesmo, é a Retração. Este fenômeno ocorre no contato do concreto com o ar durante a pega. A água, inicialmente expulsa das fibras externas, cria condições de deformação diferenciais entre a periferia e o miolo, gerando tensões auto-equilibradas em seu conjunto, capazes de provocar fissuração. Ainda segundo esse autor, o fenômeno inverso à retração ocorre quando se mergulha uma peça de concreto em água. Neste caso, há a absorção de parte da água, provocando aumento de volume, fenômeno denominado inchamento.

2.3.4.1 Deformações no concreto

Uma estrutura, quando submetida à ação de tensões constantes ao longo do tempo, e não havendo restrição de qualquer natureza à livre deformação do concreto, terá, conforme prescrição do CEB (1990), no item 2.1.6, a deformação total no tempo dada pela seguinte expressão:

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_{ci}(t_o) + \varepsilon_{cc}(t) + \varepsilon_{cs}(t) + \varepsilon_c T(t) \quad [2.2]$$

onde:

$\varepsilon_{ci}(t_0)$ é a deformação imediata que ocorre no instante de aplicação da carga;

$\varepsilon_{cc}(t)$ é a deformação por fluência do concreto no intervalo de tempo $t > t_0$;

$\varepsilon_{cs}(t)$ é a deformação por retração do concreto;

$\varepsilon_c T(t)$ é a deformação por dilatação térmica do elemento estrutural.

Ocorre que apenas as duas primeiras parcelas da expressão [2.2], $\varepsilon_{ci}(t_0)$ e $\varepsilon_{cc}(t)$ dependem da tensão aplicada, já que as duas últimas, $\varepsilon_{cs}(t)$ e $\varepsilon_c T(t)$ independem da tensão e causam expansão ou contração do elemento, conferindo a este deformação volumétrica.

Por ocasião do carregamento, ou seja, no instante inicial t_0 de aplicação da carga, a deformação imediata é dada pela expressão:

$$\varepsilon_{ci}(t_0) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_c(t_0)} \quad [2.3]$$

onde $\sigma_c(t_0)$ e $E_c(t_0)$ é, respectivamente, a tensão e o módulo de elasticidade do concreto no instante t_0 de acordo com a expressão (2.1-57) do CEB 1990.

A deformação por fluência, $\varepsilon_{cc}(t)$, no intervalo de tempo $t > t_0$, é dada, conforme norma citada, pela expressão:

$$\varepsilon_{cc}(t_0) = \left[\frac{\sigma_c(t_0)}{E_c(t_0)} \right] \phi(t, t_0) \quad [2.4]$$

sendo E_{c28} , o módulo de elasticidade na idade de 28 dias de acordo com as expressões (2.1-15) e (2.1-16) do CEB 1990, e $\phi(t, t_0)$, o coeficiente de fluência, calculado da expressão (2.1-64).

Ao se introduzir as expressões [2.3] e [2.4] em [2.2], a expressão geral deformação total do concreto fica:

$$\varepsilon_c(t) = \sigma_c(t_0) \left[\frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\phi(t, t_0)}{E_{c28}} \right] + \varepsilon_{cs}(t) + \varepsilon_c T(t) \quad [2.5]$$

onde a parcela de deformação dependente da tensão é dada por:

$$\varepsilon_{\sigma}(t) = \sigma_c(t_0) \left[\frac{1}{E_c(t_0)} + \frac{\phi(t, t_0)}{E_{c28}} \right] \quad [2.6]$$

Como no instante $t_0 = 0$ a função de desenvolvimento da fluência com o tempo (Eq. 2.1-70 do CEB 1990) é nula, o coeficiente $\phi(t, t_0)$, que desta depende, torna-se nulo, o que interfere tanto na expressão (2.6) ao cancelar o efeito diferido, bem como na expressão (2.4), tornando a nula. Assim sendo, a expressão [2.5] da deformação total fica:

$$\varepsilon_c(t) = \sigma_c(t_0) \left[\frac{1}{E_c(t_0)} \right] \quad [2.7]$$

As verificações de cálculo feitas na presente pesquisa, situam-se exclusivamente no âmbito do Estado Limite de Serviço, cujo limite de deflexão máxima (L/350) está estabelecido pela NBR 6118 (2014) quanto ao critério de aceitabilidade sensorial devido ao efeito das vibrações sentidas no piso da edificação provenientes das cargas acidentais. No capítulo que se encerra foram mostradas prescrições normativas e aspectos abordados da literatura técnica. No capítulo 3 será demonstrado o desenvolvimento do Método Bilinear do CEB 1990 para o cálculo da flecha de vigas para o Estado Limite de Serviço. Coube ao presente trabalho fazer as devidas adaptações do Método para o caso de viga com seção T com a consideração da influência da armadura longitudinal superior, o que fica demonstrado no decorrer do desenvolvimento da formulação apresentada a seguir.

3 MÉTODO BILINEAR PARA CÁLCULO DE DEFLEXÃO EM VIGAS

No presente Capítulo será apresentada uma formulação baseada no Método Bilinear, proposto no CEB-1983, para o cálculo da flecha em vigas de concreto armado, considerando flecha como a deflexão máxima que ocorre no vão do elemento estrutural. Será demonstrado que para o Estado de utilização (ELS), através de ponderação feita na relação momento-curvatura, pode-se, de forma aproximada, estabelecer por uma lei bilinear a relação momento-curvatura. Para a aplicação do Método, dois parâmetros são determinantes: a deformação média da armadura de flexão; e a curvatura média do elemento fletido. Um aspecto importante deste método e que justifica sua utilização no presente trabalho, é que o mesmo, ao considerar o efeito das armaduras, não o faz de forma simplificada, apenas com homogeneização das seções de aço e concreto. Tal coeficiente considera separadamente o efeito do aço e do concreto ativos nos Estádios 1 e 2. Fazendo uma consideração mais apurada, introduz na curvatura de base do elemento fletido, um coeficiente de correção do efeito das armaduras na deflexão.

Portanto, toda a formulação a seguir, incluindo-se os gráficos apresentados, baseia-se fundamentalmente na proposição do CEB-1983 (Manual de deformação e fissuração), sofrendo as devidas adaptações para incluir a parcela de resistência oferecida pela armadura superior de compressão, cujo estudo de caso da presente pesquisa assim exige.

3.1 GENERALIDADES

O cálculo das deflexões também é parte integrante dos diversos procedimentos analíticos para estudo do comportamento das estruturas, conforme LEET, M, K. *et al*, (2009), a partir dos quais se pode estabelecer o controle das deformações, impedindo que se tornem excessivas, pois, quando isto ocorre, conforme LIMA, P.R.L, *et al*, (2003), “podem alterar a aparência e a eficiência de uma estrutura, além de causar desconforto ou medo para seus ocupantes e usuários”. Por esta razão, os códigos de dimensionamentos estruturais em geral impõem limites a serem obedecidos, como valores máximos permitidos para as flechas de vigas.

Um elemento de estrutura linear, homogêneo e isotrópico, carregado na direção ortogonal ao seu eixo axial, pode, para pequenos deslocamentos em relação às dimensões da sua seção transversal, ter sua deformada (figura 3.1) prevista pelos

princípios da Teoria da Elasticidade. Portanto, partindo-se de um sistema de referência de coordenadas planas (x,y) e da hipótese básica de Bernoulli (seções planas permanecem planas e normais a superfície neutra antes e após a deformação), pode-se estabelecer um campo de deslocamento que permite representar relações deformação-deslocamento e relações constitutivas (tensão-deformação) para o material.

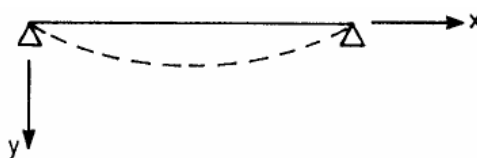


Figura 3.1 Linha elástica de um elemento estrutural linear, homogêneo e isotrópico.

Fonte: CEB-1983 (Manual de fissuração e deformação)

Desenvolvendo-se as integrais de tensões para determinação dos esforços internos, e utilizando as expressões dos trabalhos virtuais para as forças internas e externas, obtêm-se como resultado a clássica equação diferencial de vigas (SZILARD, 1974) (TIMOSHENKO, 1959):

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{M}{EI} \quad [3.1]$$

A partir da função momento fletor, $M = M(x)$, a deflexão em qualquer ponto pode ser determinada por dupla integração, desde que se tenham definidas as condições de contorno do sistema estrutural.

Já para o caso de uma viga de concreto armado há a não homogeneidade intrínseca do seu compósito (concreto-aço), e quando flexionada há a ocorrência de fissuras nas regiões mais solicitadas ao longo do vão. Sendo simplesmente bi-apoiada, por exemplo, a região abaixo da linha neutra das seções fissuradas, possui rigidez bem menor que a mesma região para as seções não fissuradas, pois naquelas apenas o aço colabora na resistência das seções (Estádio 2), enquanto nestas tanto aço como concreto, participam da resistência (Estádio 1). Portanto, os diferentes níveis de fissuração fazem com que a viga possua ao longo do vão, diferentes rigidezes, provocando o comportamento carga-deslocamento não linear.

Essa não linearidade torna o cálculo das deflexões mais difícil, sendo mais complexo quando se tem que levar em conta outros efeitos inerentes ao concreto, como a fluência e retração. Portanto, o cálculo elástico-linear, próprio para materiais homogêneos, não define a deflexão de uma viga de concreto armado. A figura 3.2 apresenta uma viga solicitada com regiões fissuradas e não fissuradas ao longo do vão:

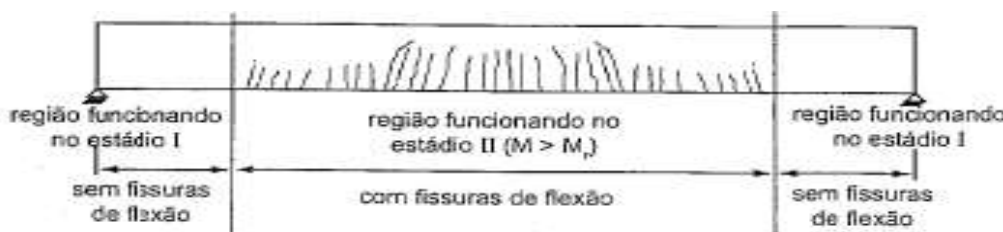


Figura 3.2 Viga de concreto armado sob flexão em estado de fissuração.

Fonte: Carvalho e Filho (2007).

3.2 DEFORMAÇÃO RELATIVA DOS MATERIAIS NA FLEXÃO SIMPLES

3.2.1 Aspectos do mecanismo de formação das fissuras

Em geral, as fissuras que ocorrem nas peças de concreto armado, têm origem em diferentes causas, gerando cada uma, um tipo de disposição. As causas principais são devido a:

- a) Ações diretas das solicitações externas, tais como tração uniaxial, flexão simples, torção, esforço cortante, aderência, e cargas concentradas aplicadas;
- b) Ações indiretas que geram deformações impostas, tais como diferencial de temperatura, dilatações térmicas, retração do concreto, e recalque das fundações de apoio;
- c) Corrosão da armadura.

A viga de concreto armado, quando se encontra em estado de fissuração proveniente da solicitação de flexão, pode ter sua região fissurada representada por um conjunto de pequenas peças de concreto armado em série, interligadas pela armadura longitudinal na face inferior tracionada. Na presente etapa serão abordados os aspectos relacionados com a formação de fissuras provenientes da viga de concreto em flexão simples, partindo inicialmente da situação elementar de tração axial pura.

3.2.1.a Tração axial

Primeiramente, conforme mostrado na figura 3.3, a partir de um modelo elementar, submetido à tração pura, idealiza-se um correspondente modelo de análise, constituído de duas partes de comprimento l_1 e l_2 , variáveis em função das solicitações.

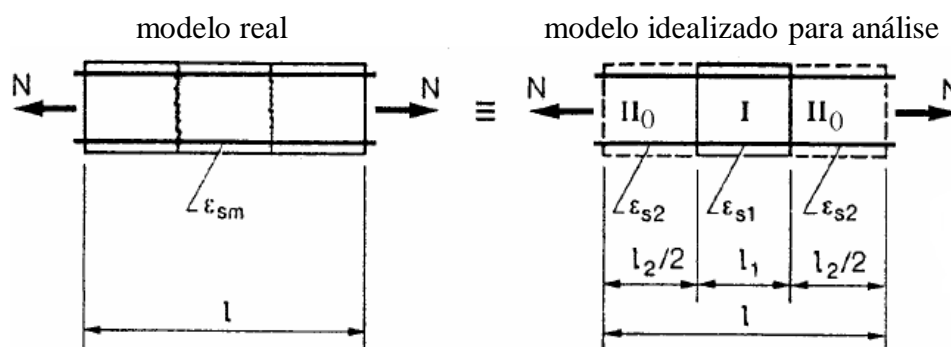


Figura 3.3 Viga de concreto armado sob tração axial. Modelo real e idealizado para análise.

Fonte: CEB-1983 (Manual de fissuração e deformação)

No modelo à tração pura, o comprimento l_1 corresponde ao trecho de viga, que encontra-se no Estádio 1 (com as seções não fissuradas), e o comprimento l_2 ao Estádio 2 puro (com seções fissuradas). Cada um desses comprimentos, a rigor, representa os extremos de um valor médio, cuja participação nesta média se dá em função de um coeficiente de distribuição ζ que é determinado pelas expressões:

$$l_1 = (1 - \zeta)l \quad [3.2.a]$$

$$l_2 = \zeta l \quad [3.2.b]$$

A deformação da armadura no trecho do Estádio 1, corresponde a ε_{s1} , e do trecho do Estádio 2, corresponde a ε_{s2} . A deformação média do aço para o elemento real é dada por:

$$\varepsilon_{sm} = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\Delta l_1 + \Delta l_2}{l} \quad [3.3]$$

e a deformação média do modelo idealizado é dada por:

$$\varepsilon_{sm} = \frac{l_1 \varepsilon_{s1} + l_2 \varepsilon_{s2}}{l} \quad [3.3.a]$$

Introduzindo [3.2.a] e [3.2.b] em [3.3.a], a expressão de ε_{sm} , dada em função do coeficiente de distribuição, fica:

$$\varepsilon_{sm} = (1-\zeta)\varepsilon_{s1} + \zeta\varepsilon_{s2} \quad [3.4]$$

Nessa expressão, porém, dois parâmetros precisam ficar melhor estabelecidos: a deformação ε_{sm} do aço e o coeficiente ζ . Isto será demonstrado no sub-item seguinte.

3.2.1.a.1 Deformação relativa média da armadura ε_{sm} e coeficiente de distribuição ζ

Retornando ao modelo real, agora apresentado na figura 3.4, que é de um tirante submetido a um gradativo aumento do esforço de tração.

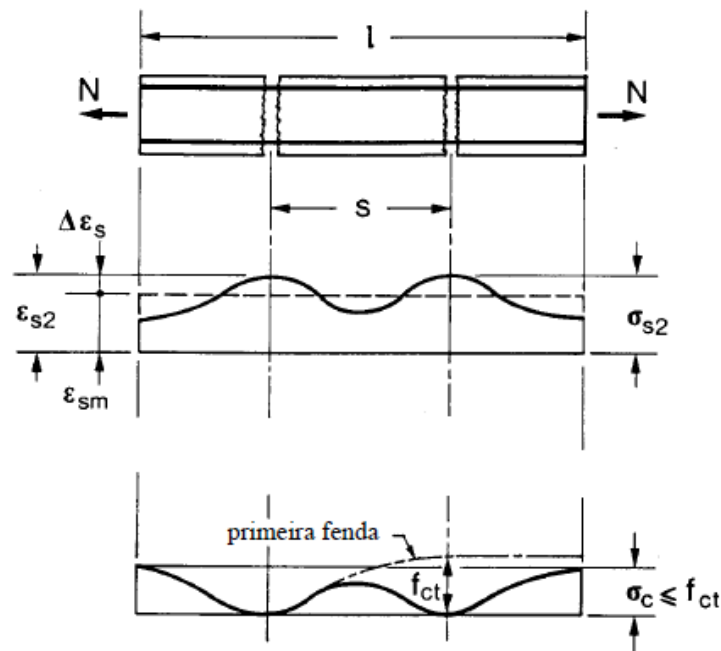


Figura 3.4 Mecanismo de aparecimento progressivo das fissuras de um elemento tracionando. Níveis de tensão e deformação ao longo do elemento.
Fonte: CEB-1983 (Manual de fissuração e deformação)

Antes que a tensão aplicada atinja valor igual a da resistência à tração do concreto, f_{ct} , toda a peça encontra-se no Estádio 1 (não fissurado). Ao atingir esta resistência, há o aparecimento da primeira fissura. Isto ocorre em uma seção qualquer ao longo do tirante, passando tal seção a trabalhar no Estádio 2. Neste instante, por conta da aderência existente entre o aço e o concreto, há uma transferência de tração que

atuava no concreto para o aço. Com a continuidade crescente deste esforço de tração, a uma determinada distancia s da seção fissurada, há o aparecimento de uma segunda fissura. E assim sucessivamente com o crescente aumento da tração até o escoamento e ruptura do aço.

Ocorre que na região entre as fissuras, há a compatibilidade de deformações entre o concreto e o aço, estando a peça nesta região, trabalhando no Estádio 1. Nas proximidades da fissura, é onde ocorre o maior nível de transferência de tensões do concreto para o aço, sendo que no centro da fissura o aço encontra-se com maior nível de tensão. E na seção, exatamente, da metade da distância entre a primeira e segunda fissura, ocorre o menor nível de transferência de tensão do concreto para o aço.

Diante desta variação de deformação relativa do aço ao longo da viga, e observando-se o modelo de tirante, e o gráfico tensão-deformação, apresentados na figura 3.5, pode-se deduzir que a deformação relativa média, pode ser representada pela expressão:

$$\varepsilon_{sm} = \frac{\Delta l}{l} = \varepsilon_{s2} - \Delta \varepsilon_s \quad [3.5]$$

sendo $\Delta \varepsilon_s$ a parcela de contribuição na deformação do concreto tracionado entre duas fissuras.

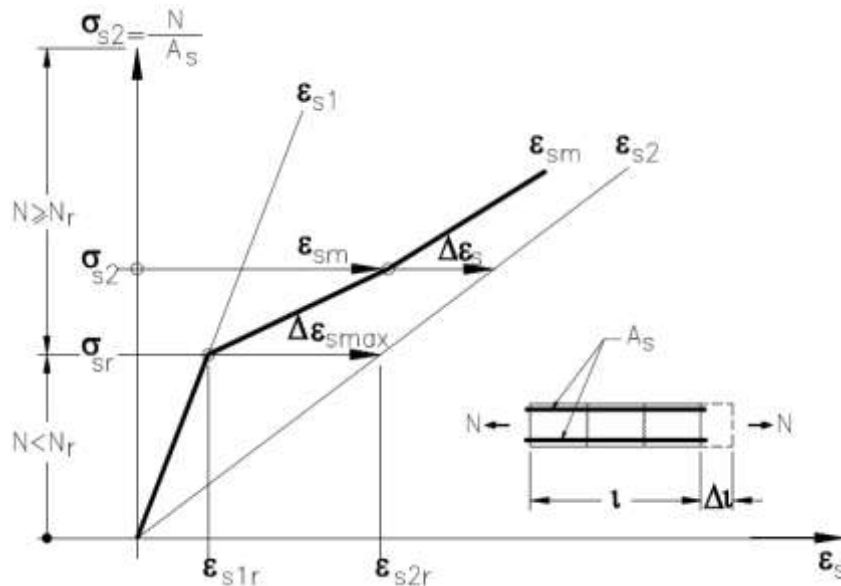


Figura 3.5 Deformação relativa da armadura
 Fonte: CEB-1983 (Manual de fissuração e deformação)

À medida que é aumentada a carga de tração N, a curva de ε_{sm} obtida experimentalmente, mostra que para valores superiores a carga de fissuração N_r , segue uma trajetória hiperbólica, tendendo a se aproximar de forma assintótica da curva ε_{s2} , a qual representa a deformação extrema no Estádio 2. Daí, então, a expressão de $\Delta\varepsilon_s$ pode ser descrita por:

$$\Delta\varepsilon_s = \Delta\varepsilon_{s\max} \cdot (\sigma_{sr} / \sigma_{s2}) \quad [3.6]$$

Ao introduzir o segundo membro de [3.6], na expressão [3.5], e desenvolvendo a expressão em função de $(\sigma_{sr} / \sigma_{s2})$, obtêm-se:

$$\varepsilon_{sm} = \varepsilon_{s2} \cdot [1 - (\sigma_{sr} / \sigma_{s2})^2] + \varepsilon_{s1} \cdot (\sigma_{sr} / \sigma_{s2})^2 \quad [3.7]$$

Chamando:

$$1 - (\sigma_{sr} / \sigma_{s2})^2 = \zeta \quad [3.8]$$

a equação [3.7] pode ser expressa da seguinte forma:

$$\varepsilon_{sm} = (1 - \zeta)\varepsilon_{s1} + \zeta\varepsilon_{s2} \quad [3.9]$$

sendo ζ , um coeficiente de distribuição dado pelas expressões:

$$\zeta = 1 - \frac{\sigma_{sr}^2}{\sigma_{s2}^2} \quad [3.10]$$

ou

$$\zeta = 0 \text{ para } \sigma_{s2} < \sigma_{sr} \quad [3.10.a]$$

Dois fatores interferem na repartição de deformações relativa média, entre os trechos de comprimentos l_1 e l_2 : a qualidade da aderência, entre as superfícies de contato do aço e do concreto envolvente; e o tempo de duração e ciclo das cargas atuantes. Para levar em conta estes fatores, são introduzidos os coeficientes β_1 e β_2 na expressão [3.10], ficando:

$$\zeta = 1 - \beta_1 \beta_2 \frac{\sigma_{sr}^2}{\sigma_{s2}^2} = 1 - \beta_1 \beta_2 \frac{N_r^2}{N^2} \quad [3.11.a]$$

ou

$$\zeta = 0, \text{ para } \sigma_{s2} < \sigma_{sr} \quad [3.11.b]$$

sendo:

$$\beta_1 = 1 \text{ para barras de alta aderência (superfície corrugada);} \quad [3.11.c]$$

$$\beta_1 = 0,5 \text{ para barras lisas.} \quad [3.11.d]$$

$$\beta_2 = 1 \text{ para o primeiro carregamento} \quad [3.11.e]$$

$$\beta_2 = 0,5 \text{ para cargas de longa duração, ou para cargas cíclicas.} \quad [3.11.f]$$

3.2.1.b Flexão simples

Na situação de tração axial, tanto concreto como armadura estão submetidas a tensões, unicamente, de tração. No presente tópico, o modelo real apresentado na figura 4.6, representa uma viga de concreto armado, solicitada a momento de flexão, ao longo do seu comprimento. Desta forma, pode-se observar no modelo idealizado a direita, que a região superior ao eixo neutro, está submetida a tensões de compressão, tendo em vista a indicação de deformação relativa de compressão ε_{c1} e ε_{c2} , das fibras superiores do concreto.

A região inferior, com deformações relativas de tração ε_{s1} e ε_{s2} , está submetida a tensões de tração. Portanto, o modelo idealizado é constituído de duas partes: Uma não fissurada, trabalhando no estágio 1, e outra fissurada, trabalhando no denominado

Estádio 2 puro, onde se tem as fibras de concreto superiores em compressão (portanto com deformação relativa de compressão), e a armadura, da região abaixo do eixo neutro tracionada (com deformação relativa de tração).

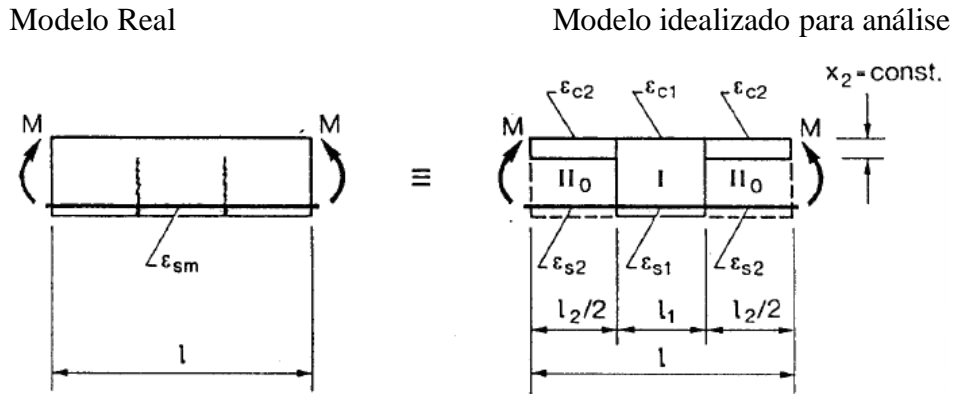


Figura 3.6 Modelo de cálculo para flexão simples

Fonte: CEB-1983 (Manual de fissuração e deformação)

Para a deformação relativa média de tração ε_{sm} , no caso de flexão simples, vale a mesma expressão [3.4], representada para a tração pura. Sendo l_1 e l_2 dados pelas expressões [3.2.a] e [3.2.b].

Admitindo a compatibilidade de deformações entre o aço e o concreto, a deformação relativa média do concreto, passa então a ser regida pela mesma relação que a deformação da armadura. Portanto, para as fibras superiores do concreto comprimido, a expressão é análoga a [3.9] sendo dada por:

$$\varepsilon_{cm} = (1 - \zeta)\varepsilon_{c1} + \zeta\varepsilon_{c2} \quad [3.12]$$

Na situação de tração pura, as tensões σ_{s2} e σ_{sr} no elemento originam-se da força de tração N, podendo a expressão [3.11a] do coeficiente de distribuição ζ , ficar também, em função de N e Nr. Para a situação de flexão, como as tensões no elemento σ_{s2} e σ_{sr} , são oriundas dos momentos fletores M e M_r , então a expressão do coeficiente de distribuição, por analogia, é idêntica, ficando:

$$\zeta = 1 - \beta_1\beta_2 \frac{M_r^2}{M^2} \quad [3.13]$$

ou

$$\zeta = 0, \text{ para } \sigma_{s2} < \sigma_{sr}, \text{ se } M < M_r \quad [3.13.a]$$

3.3 CURVATURA MÉDIA NA FLEXÃO SIMPLES

Em um elemento de estrutura linear, homogêneo e isótropo (Fig. 3.7), submetido à flexão simples, a curvatura em qualquer ponto é representada pela expressão, Timöshenko (1979):

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{EI} = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_c}{d} \quad [3.14]$$

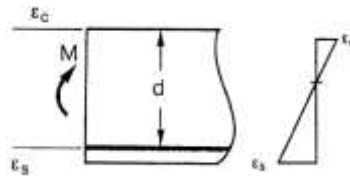


Figura 3.7 Elemento de estrutura linear sob flexão simples – deformação relativa

Fonte: CEB-1983 (Manual de fissuração e deformação)

Em uma viga de concreto armado, porém, tendo em vista as peculiaridades inerentes ao compósito aço-concreto (não homogeneidade e não linearidade do comportamento deflexional), demonstrada nas abordagens do item anterior quanto aos aspectos de fissuração, interferindo nas deformações relativas do aço e do concreto, a curvatura do elemento flexionado, já não pode simplesmente ser representado conforme [3.14]. Há que ser definida uma curvatura média, que de forma geral é definida por:

$$\frac{1}{r_m} = \frac{M}{EI_m} = \frac{\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}}{d} \quad [3.15]$$

observando que as deformações relativas médias do aço e concreto dadas pelas expressões [3.4] e [3.12], respectivamente. Na figura 3.8, estão representados os diagramas de deformação relativa média do aço e concreto, da viga sob flexão simples, sendo que o segundo membro representa a soma das parcelas das deformações no Estádio 1 e 2, respectivamente.

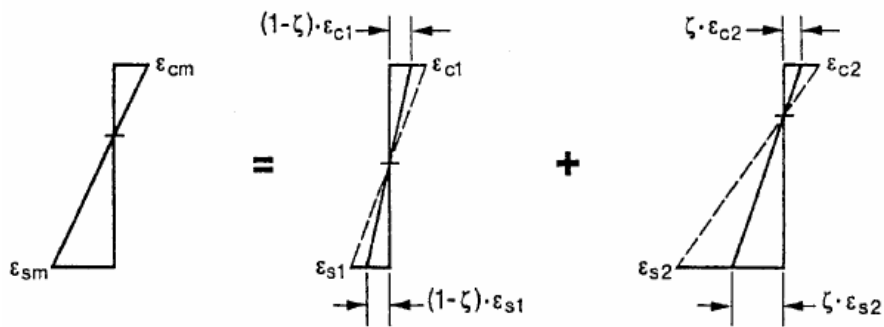


Figura 3.8 Diagrama de deformação relativa média total do aço e concreto. Soma das parcelas correspondentes aos Estádios 1 e 2.

Fonte: CEB-1983 (Manual de fissuração e deformação)

A curvatura média também pode ser representada pela expressão a seguir, ao se introduzir as expressões [3.4] e [3.12], na [3.15]:

$$\frac{1}{r_m} = (1-\zeta) \frac{1}{r_1} + \zeta \frac{1}{r_2} \quad [3.16]$$

sendo $\frac{1}{r_1}$ e $\frac{1}{r_2}$ as curvaturas resultantes das parcelas de deformações relativas indicadas nos diagramas do segundo membro da figura 3.8, para os Estádios 1 e 2, respectivamente, cujas expressões que as definem, serão mais adiante estabelecidas.

O momento de fissuração M_r é função do módulo de resistência da seção de concreto W_c e da resistência à tração do concreto f_{ct} , conforme a expressão:

$$M_r = W_c f_{ct} \quad [3.17]$$

O gráfico da figura 3.9 apresenta o comportamento da curvatura de uma viga de concreto armado em função do momento de flexão, para cargas de curta duração, no tempo $t=0$, ou seja, teoricamente aplicada instantaneamente num lapso de tempo que ocorre entre o fim da cura e início da retração. Portanto, não está sujeita ao efeito da fluência e da retração.

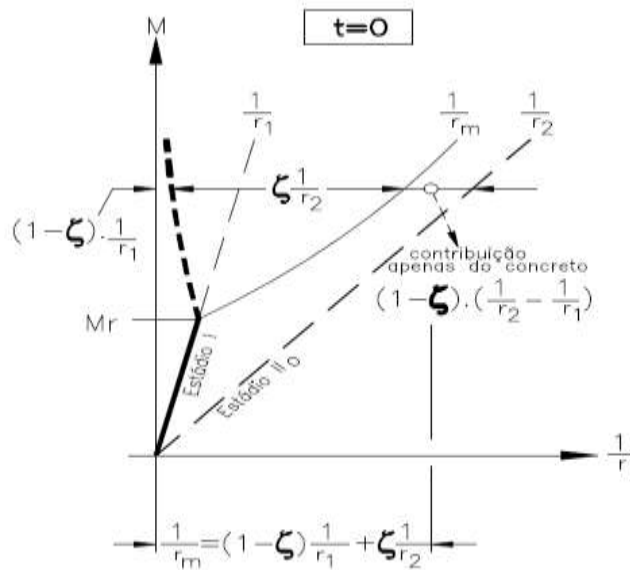


Figura 3.9 Curvas momento versus curvatura nos Estádios 1 e 2 para cargas instantâneas e sem o efeito da retração.

Fonte: CEB-1983 (Manual de fissuração e deformação)

3.3.1 Efeitos da armadura, da retração e fluência na curvatura

Da curvatura total de uma viga de concreto armado, até então, somente foi abordado, a parcela proveniente do cálculo elástico, para cargas de curta duração, no tempo $t = 0$, e seus efeitos nos estádios 1 e 2. Contudo, para a curvatura total ao longo do tempo t , existem as parcelas diferidas devido aos efeitos da retração e da fluência. Assim sendo, a expressão da curvatura total, é dada pela expressão:

$$\left(\frac{1}{r}\right)_t = \left(\frac{1}{r}\right)_0 + \left(\frac{1}{r}\right)_\varphi + \left(\frac{1}{r}\right)_{cs} \quad [3.18]$$

onde cada termo do segundo membro, corresponde respectivamente, a parcela de curvatura devido a solicitação instantânea, ao efeito da fluência ao longo do tempo, e a última parcela que é a curvatura proveniente do efeito da retração no concreto.

Assim sendo, como a curvatura média estabelecida na expressão [3.16] está em função das curvaturas extremas, inferior $\frac{1}{r_1}$, e superior $\frac{1}{r_2}$, dos Estádios 1 e 2, respectivamente, e considerando os efeitos imediatos e diferidos, as expressões que definem estes limites extremos são:

- a) Estádio 1 – Limite inferior de curvatura

$$\frac{1}{r_1} = \frac{1}{r_{10}} + \frac{1}{r_{1\phi}} + \frac{1}{r_{1cs}} \quad [3.19]$$

b) Estádio 2 – Limite superior de curvatura

$$\frac{1}{r_2} = \frac{1}{r_{20}} + \frac{1}{r_{2\phi}} + \frac{1}{r_{2cs}} \quad [3.20]$$

As curvaturas, nos Estádios 1 e 2, podem ser determinadas a partir da curvatura de base definida por:

$$\frac{1}{r_c} = \frac{M}{EIc} \quad [3.21]$$

onde EIc é a rigidez à flexão da seção bruta de concreto.

A partir desta curvatura são introduzidos coeficientes para levar em conta os efeitos das armaduras, da retração e da fluência ao longo do tempo t . A parcela de curvatura instantânea $(\frac{1}{r})_0$ é determinada através do coeficiente de correção ks , para levar em conta o efeito da armadura. A expressão da curvatura instantânea fica, então, definida por:

$$\frac{1}{r_0} = ks \frac{1}{r_c} \quad [3.22]$$

Sendo que a curvatura instantânea no Estádio 1 fica:

$$\frac{1}{r_{10}} = ks_1 \frac{1}{r_c} \quad [3.23]$$

e no Estádio 2:

$$\frac{1}{r_{20}} = k_{s_2} \frac{1}{r_c} \quad [3.24]$$

Os coeficientes de correção k_{s_1} e k_{s_2} serão definidos mais adiante através das expressões [3.43] e [3.44]. A parcela da fluência $(\frac{1}{r})_{\varphi}$, no aumento da curvatura total ao longo do tempo t , é determinada introduzindo-se na expressão da curvatura de base [3.21], além do coeficiente de correção da armadura k_s , o coeficiente de fluência φ , multiplicado por um coeficiente de correção $k\varphi$.

A expressão da curvatura devido ao efeito da fluência no Estádio 1 fica:

$$\frac{1}{r_{1\varphi}} = (k_{s_1}k\varphi_1) \frac{1}{r_c} \quad [3.25]$$

e no Estádio 2:

$$\frac{1}{r_{2\varphi}} = (k_{s_2}k\varphi_2\varphi) \frac{1}{r_c} \quad [3.26]$$

onde $k\varphi_1$ e $k\varphi_2$ estão definidos mais adiante através das expressões [3.45] e [3.46].

Observe-se que o coeficiente de correção da armadura, k_s atua tanto na curvatura proveniente das cargas instantâneas (vide expressões [3.23] e [3.24]), como na curvatura devido ao efeito diferido (vide expressões [3.25] e [3.26]). Portanto, interfere no efeito provocado pelas cargas permanentes. Porém, como mostrado a seguir, não interfere na curvatura proveniente do efeito da retração uniforme do concreto.

A parcela $(\frac{1}{r})_{cs}$ é determinada levando em conta a deformação relativa do concreto devido à retração uniforme, multiplicada por um coeficiente de correção k_{cs} , ficando a expressão, para o Estádio 1, assim estabelecida:

$$\frac{1}{r_{1cs}} = k_{cs1} \frac{|\mathcal{E}_{cs}|}{d} \quad [3.27]$$

E para o Estádio 2, fica:

$$\frac{1}{r_{2cs}} = k_{cs2} \frac{|\varepsilon_{cs}|}{d} \quad [3.28]$$

onde k_{cs1} e k_{cs2} estão definidos mais adiante através das expressões [3.47] e [3.48].

A curvatura total ($\frac{1}{r_1}$) no Estádio 1 fica, então, definida pela seguinte expressão:

$$\frac{1}{r_1} = k_{s1} \frac{1}{r_c} + (k_{s1} k \varphi_1 \varphi) \frac{1}{r_c} + k_{CS1} \frac{|\varepsilon_{cs}|}{d} \quad [3.29]$$

E no Estádio 2, pela expressão:

$$\frac{1}{r_2} = k_{s2} \frac{1}{r_c} + (k_{s2} k \varphi_2 \varphi) \frac{1}{r_c} + k_{CS1} \frac{|\varepsilon_{cs}|}{d} \quad [3.30]$$

O gráfico da figura 3.10 a seguir, apresenta as curvas de relação momento-curvatura, para os Estádios 1 e 2 (posições extremas de curvaturas $\frac{1}{r_1}$ e $\frac{1}{r_2}$), bem como

para a curvatura média $\frac{1}{r_m}$, considerando o efeito diferido das cargas de longa duração,

bem como o da retração uniforme do concreto.

Observe-se a particularidade nestas curvas, com relação ao efeito da retração uniforme. Esta é independente do nível de carregamento, e faz com que haja uma translação (vide região do gráfico em hachuras) das linhas que representam as curvaturas dos Estádios 1 e 2.

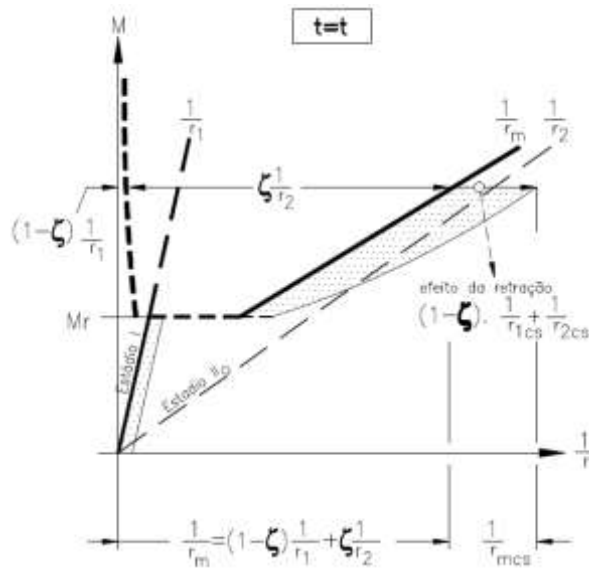


Figura 3.10 Curvas momento versus curvatura nos Estádios 1 e 2, para as cargas de longa duração e para o efeito da retração uniforme do concreto.
 Fonte: CEB-1983 (Manual de fissuração e deformação)

3.4 CÁLCULO DAS DEFLEXÕES

Em um elemento linear, homogêneo, em estado de carregamento sabe-se, conforme LIMA *et al* (2003), que a deflexão em qualquer ponto pode ser definida aplicando-se o Princípio dos Trabalhos Virtuais, a partir da curvatura deste elemento, na forma:

$$\delta = \int_L \left(\frac{1}{r} \right) \overline{M} dx \quad [3.31]$$

Sendo $\frac{1}{r}$ a curvatura em qualquer ponto onde se pretende calcular a deflexão, e \overline{M} o momento virtual resultante de uma carga unitária virtualmente aplicada neste ponto.

Aplicando o mesmo princípio para um elemento de geometria linear, não homogêneo, como é o caso das vigas de concreto armado, tem-se a seguinte expressão para determinar a flecha:

$$a = \int \frac{1}{r_m} \overline{M} . dx \quad [3.32]$$

Pelo Método Bilinear admite-se em muitos casos, como nas vigas bi-apoiadas e bi-engastadas, que a flecha ocorre na região do vão em que os momentos, devido às cargas virtuais e reais, estão próximos dos seus valores máximos (vide diagramas da figura 3.11). Por isso, esta região é denominada de zona determinante. E a seção onde o momento, devido às cargas reais, é máximo, é denominada de seção determinante.

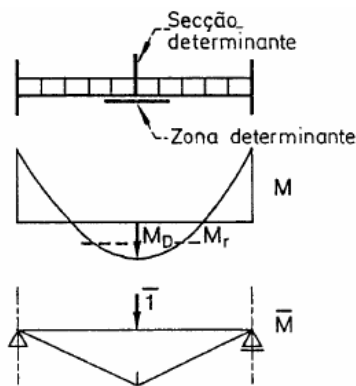


Figura 3.11 Zona e seção determinantes para o cálculo das flechas.

Fonte: CEB-1983 (Manual de fissuração e deformação)

O Método Bilinear, no transcorrer da sua formulação para determinação da flecha, estabelece algumas ponderações e simplificações:

- I) É desprezado o efeito da variação da armadura ao longo do elemento, desconsiderando, a re-distribuição de esforços no cálculo elástico;
- II) O coeficiente de repartição ζ , que é variável ao longo do elemento, é substituído por um coeficiente constante ζ_b , calculado na seção considerada determinante. Para tal simplificação o momento de fissuração M_r é suposto constante ao longo do elemento, e calculado na seção determinante. E o momento fletor M , que é variável ao longo do elemento, admite-se como constante e tendo como valor adotado, a média geométrica entre o momento de fissuração M_{rD} na seção determinante, e o momento total M_D nesta seção, devido às cargas atuantes. Assim sendo, as expressões para os momentos M_r e M ficam:

$$M_r = M_{rD} \quad [3.33]$$

$$M = \sqrt{M_{rD} \cdot M_D} \quad [3.34]$$

Desta forma o coeficiente de repartição ζ_b pode ser expresso independente de x , ou seja, da posição em que esteja a seção crítica ao longo do vão, conforme a seguir:

$$\zeta_b = 1 - \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \frac{M_{rD}}{M_D} \quad [3.35.a]$$

$$\zeta_b = 0 \text{ para } M_D < M_{rD} \quad [3.35.b]$$

III) Estando diretamente relacionado com a curvatura $\frac{1}{r_m}$ {vide equação [3.16]}, o valor da flecha considerada como provável, está na mesma proporção conforme coeficiente de repartição ζ , situada em um valor intermediário entre as flechas dos valores extremos a_1 e a_2 dos Estádios 1 e 2, sendo também determinada a partir de uma flecha base a_c de rigidez elástica EI_c .

$$a_c = \int \frac{1}{r_c} \cdot \bar{M} \cdot dx = \int \frac{M}{E \cdot I_c} \cdot \bar{M} \cdot dx \quad [3.36]$$

O gráfico da figura 3.12 apresenta a curva bi-linear, momento versus deflexão, para uma carga instantânea.

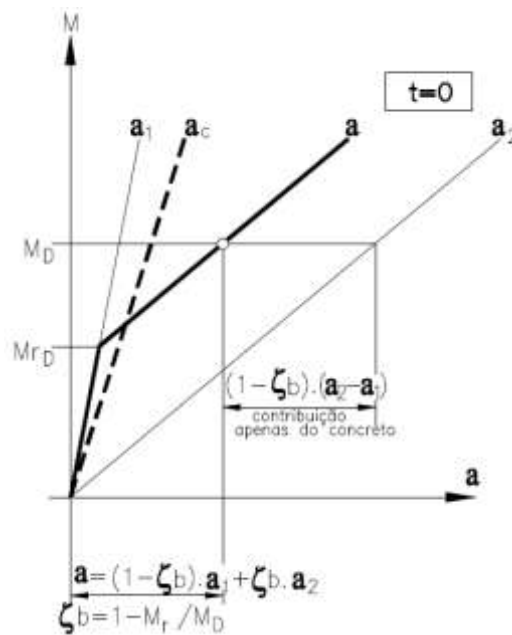


Figura 3.12 Curva Bilinear devido a cargas instantâneas, sem efeito de retração.
Fonte: CEB-1983 (Manual de fissuração e deformação)

Ao desenvolver a expressão [3.32], com a colocação da curvatura média $\frac{1}{r_m}$ em função das curvaturas extremas $\frac{1}{r_1}$ e $\frac{1}{r_2}$, e introdução do coeficiente de repartição ζ_b do Método Bilinear, a expressão da flecha provável fica:

$$a = \int (1 - \zeta_b) \cdot \frac{1}{r_1} \cdot \overline{M} \cdot dx + \int \zeta_b \cdot \frac{1}{r_2} \cdot \overline{M} \cdot dx \quad [3.37]$$

Retirando ζ_b da integral, sendo isto possível, por ser independente de x, tem-se:

$$a = (1 - \zeta_b) \cdot \int \frac{1}{r_1} \cdot \overline{M} \cdot dx + \zeta_b \cdot \int \frac{1}{r_2} \cdot \overline{M} \cdot dx \quad [3.38]$$

O segundo membro desta expressão expressa a soma de termos, cujas integrais contidas representam, respectivamente, as flechas nos Estádios 1 e 2, conforme discriminadas a seguir:

$$\text{Flecha no Estádio 1} \rightarrow a_1 = \int \frac{1}{r_1} \cdot \overline{M} \cdot dx \quad [3.39.a]$$

$$\text{Flecha no Estádio 2} \rightarrow a_2 = \int \frac{1}{r_2} \cdot \overline{M} \cdot dx \quad [3.39.b]$$

Assim sendo, a flecha provável e que representa a evolução da curva bi-linear do gráfico da figura 3.12, fica expressa por:

$$a = (1 - \zeta_b) \cdot a_1 + \zeta_b \cdot a_2 \quad [3.40]$$

Para explicitar na expressão anterior os efeitos provocados pela carga instantânea, pela fluência e retração uniforme do concreto, introduz-se nas expressões [3.39.a] e [3.39.b], os coeficientes de correção k , definidos nas expressões já estabelecidas [3.29] e [3.30], respectivamente. Têm-se então a formulação geral do Método Bilinear para determinação da flecha no Estado limite de serviço, assim estabelecida pela equação [3.41] abaixo:

$$a = (1 - \zeta_b) \cdot [k_{s1} \cdot (1 + k_{\varphi 1} \cdot \varphi) \cdot a_c + k_{cs1} \cdot |\varepsilon_{cs}| \cdot \delta \cdot \frac{l^2}{8 \cdot d}] + \zeta_b \cdot [k_{s2} \cdot (1 + k_{\varphi 2} \cdot \varphi) \cdot a_c + \dots + k_{cs2} \cdot |\varepsilon_{cs}| \cdot \delta \cdot \frac{l^2}{8 \cdot d}] \quad [3.41]$$

onde o parâmetro δ define as condições de contorno da viga sendo estabelecido pela expressão:

$$\delta = \frac{8}{l^2} \cdot \int |\overline{M}| \cdot dx \quad [3.42]$$

O resultado desta expressão, para as condições de contorno abaixo, resulta nos seguintes valores:

- Apoios simples $\rightarrow \delta = 1$
- Apoios bi-engastados $\rightarrow \delta = 0,5$
- Para consoles $\rightarrow \delta = 4$

Os gráficos das figuras 3.13 e 3.14, abaixo, apresentam as curvas bi-lineares, momento versus deflexão de cálculo das flechas, no tempo $t = t$, para cargas de longa duração, sem e com o efeito da retração, respectivamente.

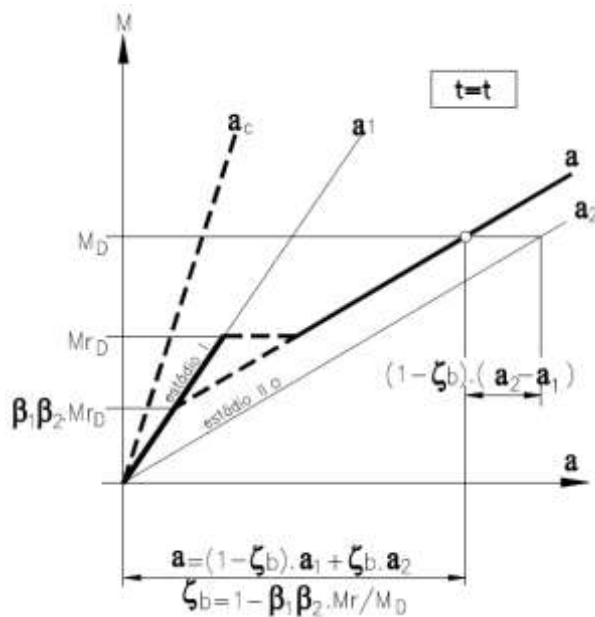


Figura 3.13 Curva Bilinear momento-deflexão, para cargas de longa duração e sem o efeito da retração.

Fonte: CEB-1983 (Manual de fissuração e deformação)

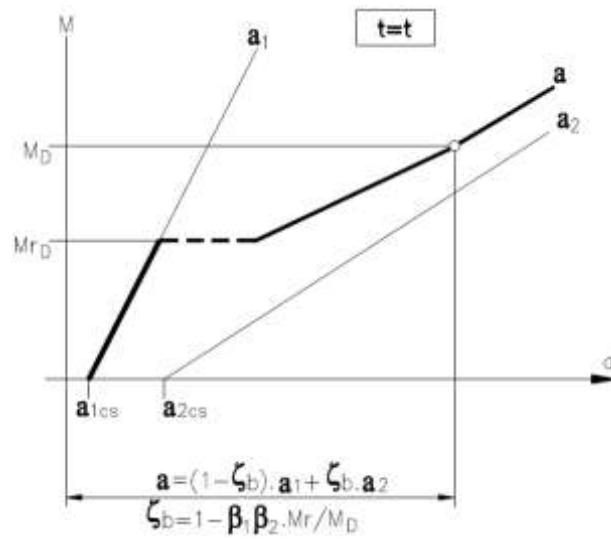


Figura 3.14 Curva Bilinear momento-deflexão, para cargas de longa duração e sem o efeito da retração

Fonte: CEB-1983 (Manual de fissuração e deformação)

3.4.1 Coeficientes de correção k_s , k_ϕ , k_{cs}

As formulações apresentadas a seguir, são adaptações feitas a partir das formulações do CEB, as quais estão estabelecidas para vigas de concreto considerando vigas apenas com armaduras inferiores de tração. Portanto, as expressões a seguir adaptadas, contemplam a inclusão de armaduras superiores de compressão..

3.4.1.1 Coeficiente de correção do efeito das armaduras k_s

Para o Estádio 1:

$$k_{s1} = \frac{1}{Ib x_1 + \alpha . I a x_1 + \alpha . I a s x_1} \quad [3.43]$$

Para o Estádio 2:

$$k_{s2} = \frac{1}{Ib x_2 + \alpha . I a x_2 + \alpha . I a s x_2} \quad [3.44]$$

3.4.1.2 Coeficiente de correção do efeito da fluência k_φ

Para o Estádio 1:

$$k_{\varphi 1} = \frac{1}{1 + \alpha \cdot \frac{(Aa_1 + Aas_1)}{Ab_1}} \cdot \left\{ \alpha \cdot \frac{(Aa_1 + Aas_1)}{Ab_1} + \right. \\ \left. + [1 - \alpha \cdot \frac{(Aa_1 + Aas_1)}{Ab_1}] \cdot \alpha \cdot \frac{Ia_1}{Ib_1} \cdot (1 + \chi \cdot \varphi) \cdot \frac{[1 + \alpha \cdot \frac{(Aa_1 + Aas_1)}{Ab_1}] \cdot (1 + \chi \cdot \varphi)}{\delta_1} \right\} \quad [3.45]$$

sendo δ_1 dado por:

$$\delta_1 = [1 + \alpha \cdot \frac{(Aa_1 + Aas_1) \cdot (1 + \chi \cdot \varphi)}{Ab_1}] \cdot [1 + \alpha \cdot \frac{Ia_1}{Ib_1} \cdot (1 + \chi \cdot \varphi)] + \\ + \alpha \cdot \frac{(Aa_1 + Aas_1) \cdot y_1^2 \cdot (1 + \chi \cdot \varphi)}{Ib_1}$$

Para o Estádio 2:

$$k_{\varphi 2} = \frac{1}{1 + \alpha \cdot \frac{(Aa_2 + Aas_2)}{Ab_2}} \cdot \left\{ \alpha \cdot \frac{(Aa_2 + Aas_2)}{Ab_2} + \right. \\ \left. + [1 - \alpha \cdot \frac{(Aa_2 + Aas_2)}{Ab_2}] \cdot \alpha \cdot \frac{Ia_2}{Ib_2} \cdot (1 + \chi \cdot \varphi) \cdot \frac{[1 + \alpha \cdot \frac{(Aa_2 + Aas_2)}{Ab_2}] \cdot (1 + \chi \cdot \varphi)}{\delta_2} \right\} \quad [3.46]$$

com δ_2 assim calculado:

$$\delta_2 = [1 + \alpha \cdot \frac{(Aa_2 + Aas_2) \cdot (1 + \chi \cdot \varphi)}{Ab_2}] \cdot [1 + \alpha \cdot \frac{Ia_2}{Ib_2} \cdot (1 + \chi \cdot \varphi)] + \\ + \alpha \cdot \frac{(Aa_2 + Aas_2) \cdot y_2^2 \cdot (1 + \chi \cdot \varphi)}{Ib_2}$$

3.4.1.3 Coeficiente de correção do efeito da retração k_{cs}

Para o Estádio 1:

$$k_{cs1} = \frac{[\alpha \cdot \frac{Aa_1}{Ib_1} \cdot y_1 \cdot d \cdot (1 + \chi \cdot \varphi)]}{\delta_1} \quad [3.47]$$

E para o Estádio 2, tem-se:

$$k_{cs2} = \frac{[\alpha \cdot \frac{Aa_2}{Ib_2} \cdot y_2 \cdot d \cdot (1 + \chi \cdot \varphi)]}{\delta_2} \quad [3.48]$$

4 CONCRETO ARMADO RECICLADO

4.1 GENERALIDADES

Nas sociedades modernas, em que os resíduos oriundos dos processos produtivos são repetidamente reutilizados para gerar novos produtos ou matérias primas, um modelo econômico circular vai se consolidando e substituindo o tradicional modelo econômico linear, em que os recursos naturais pareciam inesgotáveis Bosque *et al* (2017). Com o objetivo de promover o uso eficiente, a reutilização de resíduos de construção e demolição tem se tornado uma necessidade cada vez mais crescente. Insere-se neste contexto, a utilização de novos materiais na produção de elementos estruturais como uma prática cada vez mais freqüente, principalmente devido a aspectos de sustentabilidade. A utilização de resíduos de construção e demolição (RCD) em substituição aos agregados naturais do concreto, é uma dessas alternativas.

Segundo dados da Associação Brasileira para Reciclagem de RCD - ABRECON (2018), na Europa, 200 milhões de toneladas anuais de concreto, pedras e minerais valiosos são desperdiçados. Estima-se que essa quantidade de material "seria suficiente para construir uma rodovia com seis faixas de rolamento interligando as cidades de Roma, na Itália, a Londres, na Inglaterra." Ressalta ainda que no continente, países desenvolvidos como Alemanha, Holanda, França e Bélgica, e em outros continentes do mundo, Japão e Estados Unidos, tem intensificado sobremaneira as pesquisas de desenvolvimento tecnológico, visando o aperfeiçoamento dos procedimentos para obtenção de agregados reciclados, que permita atingir um nível mínimo de qualidade.

Na China, tal como nos países emergentes, o desenvolvimento acelerado da economia e da urbanização, tem fomentado a construção em grande escala. A modernização tem levado a demolição de construções antigas, principalmente aquelas em fim de vida útil e substituição por construções novas. (Zhou and Chen, 2017). Por conta disso, conforme Yehia *et al* (2015), há uma preocupação crescente por parte da indústria de construção, quanto ao rápido esgotamento dos recursos naturais agregados, diminuindo cada vez mais a disponibilidade. A escassez já tende a ocorrer a nível mundial, pois a demanda crescente do agregado de construção, conforme estatísticas recentes, chegou a 48,3 bilhões de toneladas no ano de 2015, sendo o maior consumo, registrado na Ásia e no Pacífico (YEHIA, 2015) (Figura 4.1) .

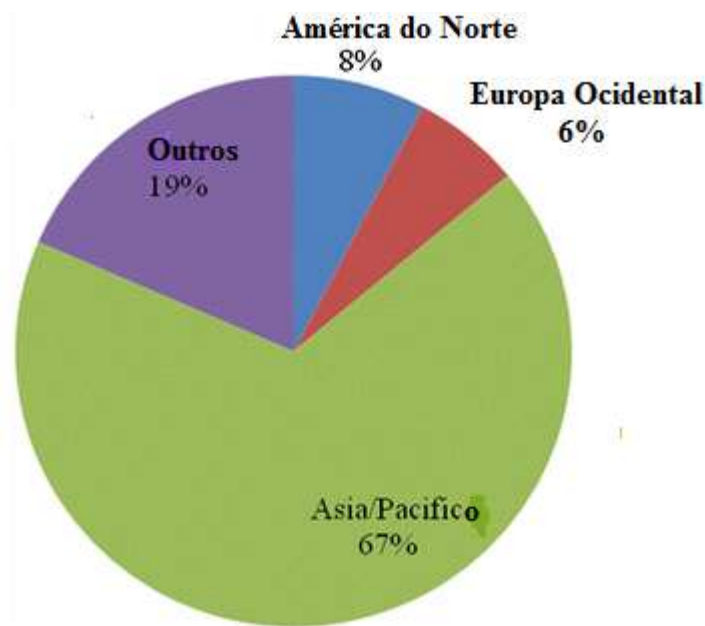


Figura 4.1 Demanda em agregados de construção em todo o mundo
 Fonte: Yehia (2015)

Os resíduos de construção e demolição vêm recebendo atenção crescente no Brasil. Proveniente de perdas no processo construtivo, o entulho gerado vem causando impacto ao meio ambiente urbano e elevando os custos das construções. Milhares de toneladas são geradas diariamente nas cidades brasileiras e sem destinação adequada. Somente na cidade de São Paulo, em 2000, conforme dados da ATESP - Associação dos Trabalhadores de Entulho de São Paulo, foram coletadas, aproximadamente 330 mil toneladas por mês de resíduos de construção civil e destes, 80% foram depositados em áreas clandestinas, cursos d'água, lagoas e regiões de mananciais (IBRACON, 2005). Na figura 4.2 está mostrada um exemplo de deposição irregular em bairro da cidade de Belo Horizonte, causando impacto ao meio ambiente.



Figura 4.2 Descarte irregular de Entulho na cidade de Belo Horizonte
Fonte: (Portal da Prefeitura de BH, (2018).
(<https://prefeitura.pbh.gov.br/politica-urbana/fiscalizacao/bota-fora>.)

4.2. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

Pressionadas pelo aumento do impacto ambiental e econômico decorrentes dessas deposições, várias administrações municipais por todo o país, têm buscado formas de melhor gerenciar as destinações dos resíduos. Em 2002 foi aprovada a Resolução nº307 do CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente, que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Sua implementação requer significativas mudanças de práticas das formas de gestão, de desenvolvimento e aprovação de projetos para uma adequada destinação dos resíduos. "Conservação dos recursos naturais e preservação do meio ambiente é a essência de qualquer desenvolvimento moderno" Sellakkannu and Subramani (2016).

O artigo 2º, parágrafo I desta Resolução, define resíduos da construção civil como aqueles “provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas,

madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, calça ou metralha”. No artigo 3º é definido que os resíduos que podem ser reutilizáveis ou recicláveis como agregados são aqueles, descritos a seguir e classificados como de classe A.

“I) De construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infra-estrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;

II) De construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;

III) De processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;”

Esses rejeitos de construção são constituídos por diversos materiais, sendo que, conforme levantamentos em três importantes cidades brasileiras, aproximadamente 65% é de material inerte (Fig. 4.3). Deste, cerca de 77% é constituído de restos de argamassa e concreto e o restante (23%) de material cerâmico (IBRACON, 2005).

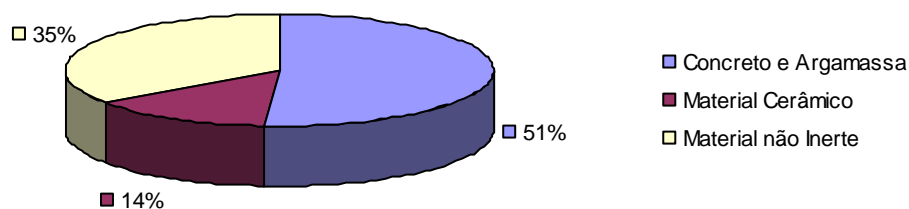


Figura 4.3 Composição média de resíduos de três grandes cidades brasileiras.
Fonte: IBRACOM (2005)

Apesar da diversidade, esses materiais constituintes, favorecem a utilização como agregado. Vários fatores concorrem para variação da composição básica do entulho: sistema construtivo adotado, tipo de tecnologia, material e mão de obra disponível, etc. O percentual dos constituintes podem ser mensurados no bota-fora das obras.

4.3 ASPECTOS DA PRODUÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS

O Beneficiamento dos resíduos de construção civil são feitas em Usinas de Reciclagem de Entulhos (URE's). De acordo com Frasson (2017), as URE's ao potencializar o recebimento e reciclagem de tais resíduos, se constituem em importante ferramenta dentro do contexto de gestão e manejo destes, mitigando os impactos ao meio ambiente pois, segundo Melo (2011), evitam o desperdício de matéria prima mineral que podem ser recolocadas na cadeia produtiva da construção civil.

O produto final de uma URE é o agregado reciclado proveniente do esmagamento de resíduos sólidos inertes utilizáveis com posterior triagem de todo material triturado (MELO, 2011). Ainda segundo este autor, um fator determinante que influencia o rendimento da produção é o nível de contaminação do material recebido.

As plantas de instalações das Usinas, podem ser do tipo fixa ou móvel: A primeira, com maior capacidade de processamento, situa-se em local determinado da região urbana ou rural, necessitando de permissão legal de instalação e funcionamento (Figura 4.4); Já as móveis (Figura 4.5), são de menor capacidade, e disponíveis sob rodas ou esteiras, podendo se deslocar para o local da obra e dentro do canteiro, por si ou rebocadas (MELO, 2011). Segundo Leite (2001), estas plantas encontram-se disponíveis no mercado em variados tamanhos e tipo de sistema de operação, proporcionando flexibilidade e versatilidade a todos os envolvidos na operação.

Ainda segundo Melo (2011), tanto as plantas fixas, como as móveis fazem o mesmo beneficiamento, pois as unidades básicas do sistema se assemelham. Tais unidades consiste em: "sistema de alimentação, triturador ou britador, separador de metais, saídas em correias transportadoras e instalações de triagem".



Figura 4.4 Usina de reciclagem de entulho (tipo fixa) da cidade de Guarulhos.
Fonte: FRASSON, 2017



Figura 4.5 Conjunto Móvel em Assis/SP
Fonte: Portal da Maqbrit (2018). Site:
http://www.maqbrit.com.br/usina_reciclagem_entulho.html

4.4 O AGREGADO RECICLADO DE RCD

A resolução CONAMA 307, no artigo 2º, parágrafo IV, define agregado reciclado como “material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de

construção que apresentem características técnicas para a aplicação em obras de edificação, de infra-estrutura, em aterros sanitários ou outras obras de engenharia”.

A norma NBR 15116 (ABNT 2004), no seu item 5.1, define como sendo agregado de resíduo de concreto (ARC), "o agregado reciclado obtido do beneficiamento de resíduo pertencente à classe A, composto na sua fração graúda, de no mínimo 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas. Sua composição deve ser determinada conforme o anexo A (*da referida norma*) e atender aos requisitos das aplicações específicas.". E no item 5.2 da mesma, define como agregado de resíduo misto (ARM) "o agregado reciclado obtido do beneficiamento de resíduo de classe A, composto na sua fração graúda com menos de 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland e rochas."

De acordo com Leite (2001), as características e qualidade final do agregado reciclado está diretamente relacionado com os materiais que chegam nas usinas de reciclagem, bem como do tipo de processo utilizado no beneficiamento (tipo de britador, eficácia da triagem e retirada de impurezas, contaminantes e materiais não inertes. Complementando, Yehia *et al* (2015) afirma que "a qualidade do agregado reciclado é influenciada pela qualidade dos materiais coletados e entregues às usinas de reciclagem."

Segundo Metha e Monteiro (2008), várias propriedades e parâmetros dos agregados devem ser avaliados para sua utilização, sendo as mais importantes, a forma e textura, a granulometria, a absorção de água e as substâncias deletérias presentes nos materiais, bem como as propriedades mecânicas de resistência a compressão e módulo de elasticidade.

Ainda conforme Leite (2001), os agregados reciclados possuem características bastante diversas dos agregados naturais, conferindo àqueles singularidades próprias. A maior delas é a heterogeneidade dos seus constituintes que confere maior porosidade, por conseqüência, eleva a capacidade de absorção de água. Todos estes fatores juntos afetam as propriedades mecânicas (Figura 4.6), sendo considerável a diminuição do módulo de elasticidade. A autora ressalta que a forma mais rugosa e angulosa dos agregados irão influenciar no desempenho final do concreto.

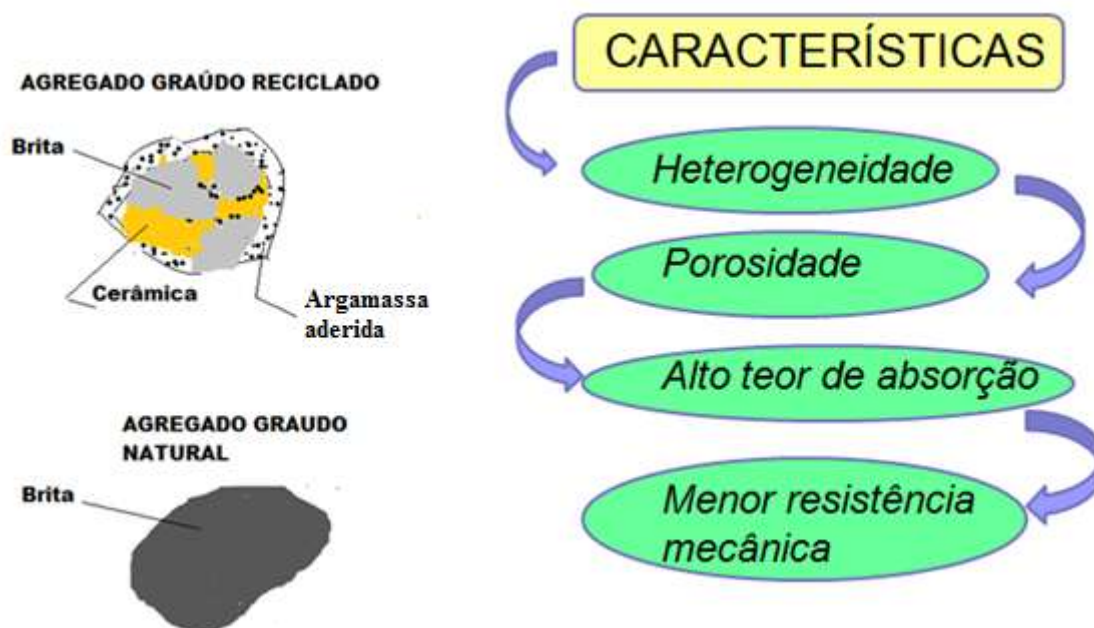


Figura 4.6 Desenho esquemático dos agregados graúdo reciclado e natural; Características específicas do agregado reciclado.

Fonte: (O Autor)

Angulo e Figueiredo (2011) afirmam que os agregados reciclados são mais porosos que os agregados de rochas britadas e areias naturais, seixos e areias lavadas de rio, os quais, diferentemente dos primeiros, são muito pouco porosos. A maior porosidade dos agregados reciclados são provenientes tanto das fissuras causadas no agregado existente no concreto de origem durante a britagem dos resíduos, quanto da quantidade de argamassa aderida neste agregado. De acordo com Taboada *et al* (2016), a qualidade do concreto original, o tamanho da fração dos agregados originais e o método utilizado no beneficiamento para a produção dos agregados reciclados, irão influenciar na quantidade e qualidade da argamassa aderida. Segundo Duan and Poon (2014), a presença de argamassa aderida residual no agregado reciclado, leva a diminuição da sua densidade e resistência à compressão.

Na figura 4.7 estão apresentadas amostras de agregados graúdos. Na figura 4.8 constam amostras de agregados miúdos, cuja classificação granulométrica obedece aos mesmos critérios dos agregados naturais, ou seja, são os materiais que passam na peneira de #4,8mm.



Figura 4.7 Amostras de agregados graúdos de RCD.
Fonte: (Aragão 2007)



Figura 4.8 Amostras de agregado miúdo de RCD
Fonte: Aragão (2007)

4.5 O CONCRETO RECICLADO DE RCD

As características predominantes do concreto reciclado de RCD são influenciadas diretamente pelo agregado reciclado. A menor resistência mecânica do agregado reciclado, provocada pela porosidade e a quantidade e qualidade de argamassa antiga aderida, irão interferir para um menor módulo de deformação, quando comparado com a do concreto convencional.

Conforme Angulo e Figueiredo (2011), "a porosidade de um agregado é expressa pela relação percentual entre o volume de vazios e o volume de sólidos" e "absorção de água é expressa percentualmente pela relação entre a massa de água absorvida pelo agregado, após 24 h, e a massa do agregado seco". Conforme Mehta e Monteiro (2008), "existe uma relação inversa fundamental entre porosidade e resistência dos sólidos". Prosseguindo, descreve que no concreto, embora haja uma maior complexidade devido a presença de micro-fissuras na zona de transição localizada na interface entre a matriz e o agregado graúdo, esta relação deve ser respeitada, pois tal porosidade é limitante para resistência do concreto.



Figuras 4.9 e 4.9a Interface do agregado reciclado.
Fonte: Taboada *et al* (2016)

No mesmo sentido, Taboada *et al* (2016) afirma que um fator determinante no desempenho do concreto formado com agregado reciclado é a qualidade do agregado reciclado utilizado, que por sua vez é influenciada pela qualidade e quantidade de argamassa aderida (Figuras 4.9 e 4.9a). Prosseguindo, ressalta que a presença desta argamassa constitui uma das principais diferenças entre o concreto de agregado reciclado e o de agregado natural. O autor caracteriza a argamassa aderida como "um material poroso com densidade entre 1,0 a 1,6 ton/m³, portanto mais baixa que a das

partículas de agregados naturais". Ainda observa que esta densidade está relacionada com a resistência e o fator água-cimento do concreto original, sendo mais densa e de melhor qualidade, quanto mais elevada for essa resistência. Esta maior porosidade confere mais capacidade de absorção de água ao agregado reciclado do que ao natural (TABOADA *et al*, 2016).

Sobéron (2002), em análise experimental de amostras de concreto reciclado, já observava que a porosidade aumentava consideravelmente a medida que ia sendo feito a substituição dos agregados naturais por reciclados. Os ensaios mecânicos mostraram variação nas propriedades mecânicas em relação ao concreto convencional com o aumento da porosidade.

Conforme Angulo e Figueiredo (2011), "a diferença essencial entre um concreto convencional e um concreto com agregado reciclado é a porosidade". E sobre esta característica completa: "a resistência e durabilidade deste outro tipo de concreto são controladas, não apenas pela porosidade da pasta de cimento, mas também pela porosidade do agregado".

Comparando os dois compósitos em escala microscópica, Taboada *et al* (2016) ainda observa que enquanto o concreto convencional é formado de três fases (matriz de argamassa, agregado e uma zona de transição, que é a interface pasta-agregado), o concreto reciclado tem duas interfaces (zonas de transição): uma, que é a interface descrita e uma nova entre o agregado reciclado e a nova argamassa. De acordo com Mehta e Monteiro (2008), na zona de transição (região de interface que forma uma ponte entre as partículas de agregado e a pasta de cimento) do concreto em geral, ocorre a presença de micro-fissuras (que são formadas ainda na fase de endurecimento do concreto) e um maior volume de vazios no compósito. A micro-estrutura desta região, exerce grande influência no módulo de elasticidade do concreto. Há ainda o aspecto de que, como os agregados são muito pouco porosos, há um acúmulo de água junto ao agregado, aumentando nesta região o fator água cimento, o que a torna menos resistente do que outros pontos da pasta. (MEHTA E MONTEIRO, 2008).

Diante desta singularidade, a zona de transição é compreendida como uma fase distinta do compósito. Sendo o limite de resistência do compósito limitado pelas regiões mais frágeis, os vazios e micro-fissuras presentes na interface pasta-agregado, ainda segundo Mehta e Monteiro (2008), reduz a transferência de tensões, o que torna a zona de transição a fase do compósito com menor rigidez que as duas outras (pasta e agregado), portanto onde primeiro ocorre a ruptura do concreto convencional.

Bosque *et al* (2017), utilizando nanoindentação e microscopia eletrônica de varredura, investigou a influência das propriedades da Zona de Transição com as propriedades mecânicas do concreto com agregado reciclado. Concluiu que o módulo de elasticidade na Zona de Transição, depende dos materiais presentes no agregado reciclado. E que estes diferentes materiais e as propriedades micro-mecânicas da Zona de Transição é que determinam o grau de influência desta nas propriedades mecânicas do concreto.

Através análises de resultados de teste de nanoindentação em amostras de concreto reciclado e concreto de agregado reciclado, Sindorova *et al* (2014), observou que as características da micro-estrutura e propriedades mecânicas da Zona de Transição são determinadas pelo fator água cimento e o tipo do agregado utilizado. E que, diferentemente do que ocorre com os agregados naturais, a alta porosidade existente no agregado reciclado impede o acúmulo de água na interface com a pasta, dificultando a formação da Zona de Transição, o que somente passa a ocorrer quando se diminui o fator água-cimento. Acrescenta que a micro-estrutura formada na interface do agregado reciclado é diferente da do agregado natural. Explica que os sulfo-aluminatos formados primeiramente, impedem o crescimento de cristais na interface, formando cristais menores de portlandita, o que contribui para uma elevação da resistência local.

Diante de tudo exposto, conclui-se que as características do agregado reciclado de RCD (heterogeneidade, elevada porosidade, alto teor de absorção d'água e redução das propriedades mecânicas) influencia diretamente nas características finais do concreto de agregado reciclado de RCD: Alteração das propriedades mecânicas (menor módulo de elasticidade), menor dureza e durabilidade (Figura 4.10).

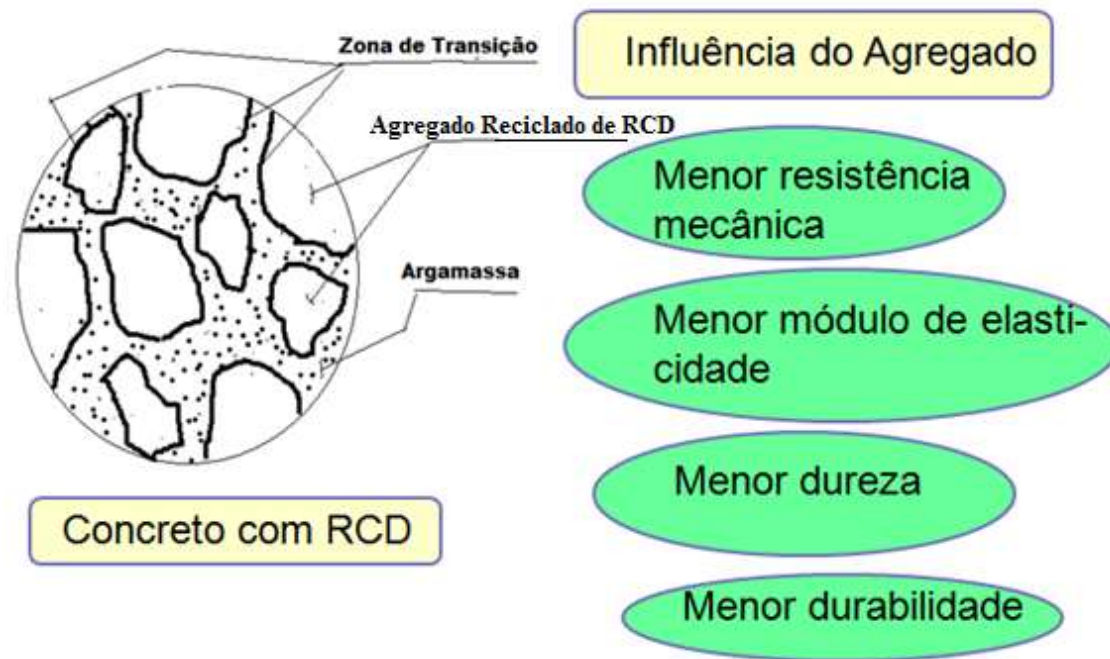


Figura 4.10 Representação esquemática de amostra do concreto de RCD; Influência do agregado reciclado nas características do concreto.
 Fonte: O Autor (2018)

4.6. ASPECTOS DO CONCRETO ESTRUTURAL COM RCD

Tendo em vista as diferenças essenciais das características do concreto de RCD, comparado ao convencional, a sua aplicação como elemento de concreto armado, requer um conhecimento pormenorizado das suas singularidades, de forma que se possa ter o controle satisfatório de todas as variáveis envolvidas no dimensionamento estrutural. Enfatizando toda argumentação já descrita anteriormente, Reis (2009) reforça, quando afirma que algumas particularidades do agregado reciclado, como a heterogeneidade, a menor resistência mecânica e o alto teor de absorção, criam dificuldades na utilização para fins estruturais. Além dessas propriedades, a dureza, o módulo de elasticidade e a durabilidade são influenciados pela porosidade e composição mineralógica dos agregados.

Como verificado em capítulo anterior, a deflexão de vigas é influenciada pelas propriedades mecânicas dos materiais. Para o concreto, o módulo de elasticidade longitudinal e a resistência à tração participam diretamente das formulações de cálculo de deflexão. Essas propriedades, por sua vez, podem ser obtidas em função da resistência à compressão. O estabelecimento de relações matemáticas para as

propriedades mecânicas do RCD (módulos de elasticidade versus resistência a compressão; e resistência à tração por compressão diametral versus resistência a compressão), permitirão a sua utilização para fins estruturais.

4.7. PANORAMA GLOBAL DA CODIFICAÇÃO TÉCNICA

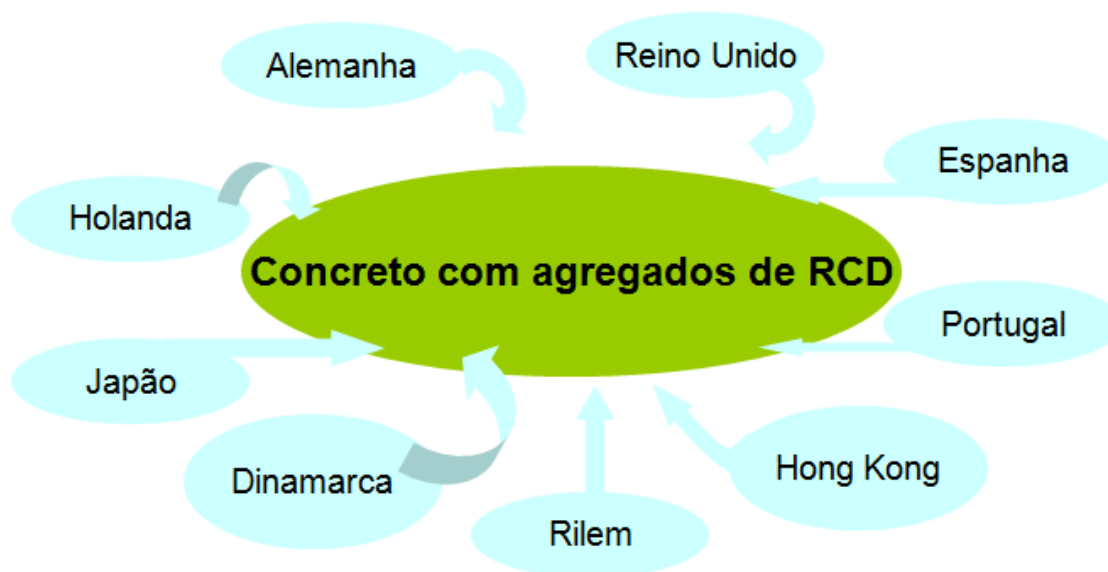


Figura 4.11 Panorama Internacional

Fonte: O Autor, (2018)

A utilização de agregados reciclados, em substituição aos agregados naturais na constituição do concreto, encontra recomendações em várias prescrições nacionais e internacionais. A utilização mais recomendada ainda é para fins não nobres, ou seja, não estruturais. Observa-se, que de forma geral predomina ainda nos códigos, características bastante restritivas, de viés, a princípio conservador, não contemplando de forma plena a utilização para fins estruturais. Há uma grande variação nos limites de tolerâncias das resistências máximas admitidas para o concreto, e nos teores máximos admitidos de substituição dos agregados graúdos e miúdos naturais por agregados de RCD. Isso significa que os códigos e especificações possuem graus de restrições e permissões diferenciados quanto à utilização do concreto com RCD para fins estruturais. Isto pode ser constatado através dos dados, do sistema normativo nacional e internacional, coletados por Gonçalves (2007) e apresentados na tabela 4.1.

Os dados referentes ao Brasil (Tabela 4.1), estão baseados nas normas brasileiras NBR 15115 e NBR 15116 da ABNT, que regem a aplicação de agregados de

RCD na construção civil. Estes agregados são provenientes do beneficiamento dos resíduos oriundos de construções, reutilizáveis, e composto, principalmente, de concreto, argamassa e material cerâmico. A NBR 15115 aplica-se à execução de camadas de pavimentação. A utilização em concreto, somente está contemplada pela NBR 15116. Observa-se, porém, que apesar desta permitir a substituição total dos agregados de origem natural do concreto, por agregados reciclados, não admite a utilização para fins estruturais. Além desta limitação, o concreto produzido não pode ser especificado para resistências à compressão maiores que 15 MPa.

Na Alemanha há limitação quanto ao teor de agregados utilizados e ao clima do local: Há restrições de procedimentos para ambientes de clima seco ou de baixa umidade. (MELO, 2011); Apesar de permitir a utilização do concreto com RCD para fins estruturais, e com resistências a compressão do concreto de até 37 MPa, os teores de substituição são de 20 e 35% para agregados graúdos e 0% para agregado miúdos. Portanto, pode-se considerar que esta codificação é restritiva (Tabela 4.1), embora permita que, dentro destas restrições, sejam adotados (sem ajustes) os mesmos parâmetros de dimensionamento estrutural utilizados para o concreto convencional (GONÇALVES, 2007).

No Japão prioriza-se a reinserção do agregado da construção civil de origem (MELO, 2011), também pode ser considerada como restritiva, pois apesar de permitir teores de substituição em até 100%, a depender da aplicação, restringe as condições de aplicação (apenas para fundações e soluções pouco exigentes) e a resistência do concreto (18MPa) (Tabela 4.1).

O Reino Unido permite, para fins estruturais, a utilização do agregado reciclado apenas o proveniente do beneficiamento dos resíduos de concreto. Embora para as resistências a compressão do concreto possa utilizar até 50 MPa, os teores de substituição são de até 20% para agregados graúdos e 0% para agregados miúdos. Portanto pode-se considerar que esta codificação é restritiva.

Dinamarca, mesmo com restrições de caráter ambiental (MELO, 2011), pode ser considerada a mais flexível quanto a utilização do RCD em concreto com fins estruturais, pois em ambientes não agressivos, a resistência permitida é de até 40MPa para teores de substituição de 100% dos agregados graúdos naturais por concreto reciclado, embora o limite de substituição dos agregados miúdos seja de até 20%.

Tabela 4.1 Aplicação do agregado reciclado segundo normas de vários países

Especificação	Classificação	Máxima substituição de agregados naturais por reciclados		Condições de aplicação ^b	Resistência máxima autorizada
		Grossos	Finos		
Brasil	ARC ARM	100%	100%	Betão sem função estrutural	15 MPa
Alemanha	1-ARC	20 a 35%, conforme a aplicação	0%	X0, XC1 a XC4, XF1 a XF3, XA1; pré-esforço não é permitido	C30/37 (20% substituição); C25/30 (35% substituição)
	2-ARC				
	3-ARA	n.d	n.d	Betão sem função estrutural	n.d
	4-ARM				
Hong-Kong	ARC	20 ou 100%	0%	Soluções pouco exigentes ou betão estrutural, consoante a substituição é 100 ou 20%, respectivamente	20 MPa (100% substituição); 35 MPa (20% substituição)
Japão	ARM	100%	Até 100% dependendo da aplicação	Fundações e soluções pouco exigentes	18 MPa
RILEM	ARC+AP	100%	Apenas se cumprirem os requisitos impostos aos naturais	Ambiente seco, húmido e marítimo	Sem limite
	ARC			Ambiente seco e húmido, sem acção do gelo	C50/60
	ARA				C16/20
Reino Unido	RCA	20%	0%	X0, XC1 a XC4, XF1, DC-1	C40/50
	RA	n.d	0%	Betão sem função estrutural	n.d
Holanda	ARC	100%	Apenas se utilizados com agregados grossos convencionais	Ambientes não agressivos	C40/50
	ARA				C20/25
Portugal	ARC	25%	0%	X0, XC1 a XC4, XS1, XA1	C40/50
	ARC	20%	0%		C35/45
	ARM	n.d	0%	Betão sem função estrutural	n.d
Suíça	ARC	100%	20%	São requeridos testes adicionais para utilização em betão pré-esforçado	C30/37
	ARM		100%	Betão simples	n.d
Dinamarca	ARC testados	100%	20%	Ambientes não agressivos	40 MPa
	ARC não testado				20 MPa
	ARM				15 MPa
Rússia	ARM	100%		Não é permitida a utilização em betão pré-esforçado	15 MPa
		50%			20 MPa

Fonte: Gonçalves (2007)

Na Holanda, também para ambientes não agressivos, a resistência máxima autorizada chega a 50MPa, com teores de substituição dos agregados graúdos de 100%, embora permita a substituição dos miúdos misturando-os com agregados graúdos naturais (GONÇALVEZ, 2007). Considera-se que concretos com teores de substituição de agregado graúdo natural menores que 20% de agregado de concreto reciclado, deve atender as exigências de concreto convencional. Para obtenção de rigidez satisfatória no dimensionamento estrutural, exige-se que as dimensões das peças que forem definidas pela deflexão máxima admissível, sejam majoradas em 10% na altura ou espessura.

Na Rússia, o nível de utilização de agregados reciclados de RCD em concreto

pode já considerado de avanço intermediário, pois embora os teores de substituição possam situar-se de 50 a 100% para agregados graúdos e miúdos, a resistência máxima autorizada é de 15 a 20 MPa.

Enfim, a codificação do RILEM, introduz nas suas prescrições, coeficientes de projeto para o cálculo de elementos estruturais em concreto armado, formados de agregados graúdos de RCD, com recomendações de restrições para aplicação elevando em consideração a origem dos reciclados. Pode-se afirmar, como a das mais avançadas, pois permite a utilização de resistências à compressão até 60MPa e a exposição a ambientes diversos, como os secos, úmidos e marítimos quando formados de agregados reciclados de concreto. Permite substituição de 100% dos agregados graúdos, embora faça restrições à substituição dos agregados miúdos: Somente permitem se cumprirem os requisitos dos agregados naturais (Tabela 4.1).

4.7.1 Prescrições normativas nacionais

O sistema normativo brasileiro apresenta as seguintes codificações para resíduos de construção civil:

- NBR 15112 (2004) - Resíduos de construção civil e resíduos volumosos;
- NBR 15113 (2004) - Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes;
- NBR 15114 (2004) - Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem;
- NBR 15115 (2004) - Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos;
- NBR 15116 (2004) - Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos.

4.8. EQUAÇÕES ANALÍTICAS DE PROPRIEDADES MECÂNICAS

As propriedades mecânicas são determinantes no projeto das peças de concreto armado, tanto na fase inicial de análise, quanto na de dimensionamento, onde são verificados os estados limites últimos e de serviço da estrutura. As equações que regem este dimensionamento têm nas propriedades (massa específica, resistência à compressão

e tração na flexão, resistência à tração por compressão diametral, módulos de elasticidade longitudinal e transversal, coeficiente de dilatação térmica e coeficiente de Poisson) parâmetros que participam diretamente das formulações.

Algumas variáveis como quantidade de finos e contaminantes incorporados aos agregados reciclados, e teor de substituição destes por agregados naturais no concreto, interferem diretamente na diferença entre as propriedades mecânicas do concreto com agregados naturais e com RCD (LEITE, 2001). E nas propriedades mecânicas do concreto com RCD, no estágio endurecido, duas características têm influência significativa: a heterogeneidade e a porosidade. Estas propiciam concretos menos resistentes em comparação com concretos convencionais, constituídos de agregados naturais. Desta forma, as equações e relações que regem as propriedades do concreto com agregados reciclados não são as mesmas do concreto convencional.

No presente estudo, o concreto com agregados reciclados de RCD terá sempre como referência os parâmetros já consagrados para o concreto com agregados naturais de peso normal conforme definido pela CEB-FIB MODEL CODE 1990, no item 2.1, e com densidade a ser considerada de 2400 kg/m³, para concreto simples e 2500 kg/m³ para concreto armado, e resistência a compressão de 10 a 80 MPa. A escolha deste código é em função do Modelo Teórico Bilinear a ser aplicado no presente trabalho que também pertence ao CEB.

4.8.1 Do concreto convencional

a) Resistência à compressão

A resistência à compressão é obtida experimentalmente conforme ensaios de corpos de prova cilíndricos moldados com 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura, conforme critérios e procedimentos das normas brasileiras da ABNT. Como os ensaios experimentais foram feitos no país, os mesmos seguiram as codificações a NBR 5738 e executados conforme NBR 5739. Estas dimensões também são adotadas pelo CEB-90.

A estimativa de resistência à compressão média f_{cmj} , correspondente a uma resistência característica f_{ckj} especificada em projeto, deve obedecer às prescrições da NBR 12655 (ABNT, 2015). Sendo f_{cmj} a resistência média à compressão do concreto

aos j dias, e f_{ckj} a resistência característica aos j dias. Quando não estiver indicada a idade j , fica definida como sendo aos 28 dias.

A partir da resistência característica à compressão f_{ck} , define-se a resistência média à compressão f_{cm} . Em função desta última é que estarão propostas pelo CEB-1990, as formulações para determinação da resistência média a tração f_{ctm} e do módulo de elasticidade longitudinal E_c .

O CEB propõe, no item 2.1-1, a seguinte expressão para determinação de f_{cm} :

$$f_{cm} = f_{ck} + \Delta f \quad [4.1]$$

onde:

$$\Delta f = 8MPa \quad [4.2]$$

As prescrições das relações entre as propriedades mecânicas estão definidas conforme a seguir.

b) Resistência à tração

A resistência à tração no concreto apresenta uma grande variabilidade de resultados em torno de um valor médio. Este valor é definido em função da resistência à compressão. O CEB-1990 prescreve que, na falta de ensaios específicos, adote-se os limites inferior e superior da resistência característica à tração, correspondentes aos quantís de 5% e 95%, respectivamente, na curva de densidade de probabilidade dos ensaios de resistência à tração (curva de Gauss). Os valores máximos e mínimos interferem, respectivamente, na determinação da seção mínima do aço de tração na flexão, e no efeito da aderência entre as superfícies de contato do aço e concreto, podem ser obtidos por meio das seguintes equações:

$$f_{ctk,\min} = f_{ctk0,\min} \left(\frac{f_{ck}}{f_{ck0}} \right)^{2/3} \quad [4.3]$$

$$f_{ctk,\max} = f_{ctk0,\max} \left(\frac{f_{ck}}{f_{ck0}} \right)^{2/3} \quad [4.4]$$

Sendo:

$$f_{ctk0} = 10MPa \quad [4.5]$$

$$f_{ctk0,\min} = 0,95MPa \quad [4.5.a]$$

$$f_{ctk0,\max} = 1,85MPa \quad [4.5.b]$$

E o valor médio da resistência à tração:

$$f_{ctm} = f_{ctk0,m} \left(\frac{f_{ck}}{f_{ck0}} \right)^{2/3} \quad [4.6]$$

com

$$f_{ctk0,m} = 1,40MPa \quad [4.7]$$

observando-se que as unidades dessas resistências são o mega-pascal (MPa).

c) Módulo de elasticidade longitudinal secante do concreto

O CEB-1990 estabelece que:

$$E_{ci} = E_{co} \cdot [(f_{ck} + \Delta f) / f_{cm0}]^{1/3} \quad [4.8]$$

onde E_{ci} é o módulo de elasticidade tangente (MPa) e

$$E_{co} = 2,15 \times 10^4 MPa \quad [4.9]$$

Tem-se ainda que $f_{cm0} = 10MPa$. Portanto, o módulo de Elasticidade longitudinal secante fica definido por:

$$E_c = 0,85E_{ci} \quad [4.10]$$

4.8.2 Do concreto com RCD

Vários trabalhos, dentre os quais destacamos os de Juan (2004), Leite (2001) e Xiao e Zhang (2006), têm proposto formulações no sentido de estabelecer equações para co-relacionar as propriedades mecânicas do concreto com RCD. O de Leite foi escolhido, não somente pela profundidade da pesquisa, mas pela composição dos resíduos que estão de acordo com a realidade brasileira. O de Juan (2004) por está acolhido pelo RILEM, comitê Internacional que contem as prescrições mais avançadas para utilização de concreto reciclado para fins estruturais. Por fim o de Xiao e Zhang (2006), visto a amplitude da base de dados de sua pesquisa, formulações criteriosas e composição de resíduos que guardam certa proximidade com os resíduos do presente trabalho.

Juan (2004) realizou programa experimental com misturas de concreto convencional e reciclado com teores de substituição de 20%, 50% e 100% dos agregados graúdos naturais por agregados provenientes de concreto reciclado. Como resultado, propõe relações como função da resistência à compressão, para o módulo de elasticidade longitudinal e para resistência a tração por compressão diametral.

Leite (2001), em estudo de investigação das características físicas e granulométricas dos agregados miúdos e graúdos reciclados (obtidos do beneficiamento de resíduos de construção e demolição), e da influência destes agregados nas propriedades mecânicas do respectivo concreto produzido, propôs equações que estabelece relações (em função da resistência a compressão) para o Módulo de Elasticidade Longitudinal e Resistência a Tração por compressão diametral. Os teores de substituição, tanto para agregados graúdos como miúdos foram de 0%, 11,5%, 50%, 88,5% e 100%.

Xiao e Zhang (2006), baseado em grande número de trabalhos experimentais publicados, coletou cerca de 1200 resultados, o que possibilitou formar uma ampla base de dados. Através de análise estatística, propôs formulação para determinação do módulo de elasticidade longitudinal e tração por compressão diametral do concreto com agregado reciclado em função da respectiva resistência a compressão. Os agregados utilizados foram formados predominantemente por concreto, tijolos britados e entulhos de alvenaria. Os agregados reciclados beneficiados substituíram os agregados graúdos naturais com teores que variaram de 10% a 100%, na confecção do concreto. O

agregado miúdo usado foi areia natural, não havendo, portanto substituição do agregado miúdo.

4.8.2.1. Relação entre a resistência à compressão e a densidade

Xiao e Zhang (2006) fizeram a análise regressiva de vários resultados experimentais, concluindo que a relação entre a resistência à compressão e densidade, de concretos com RCD, é aproximadamente linear entre elas, propondo a seguinte equação:

$$f_{cm} = 0,069\rho - 116,1 \quad [4.11]$$

onde:

f_{cm} é a resistência à compressão em MPa;

ρ é a densidade de massa.'

4.8.2.2. Relação entre Resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão

Xiao e Zhang, (2006), Leite (2001) e Juan (2004), através de análise regressiva de resultados experimentais, propõem as seguintes equações para relacionar resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão de concreto com RCD, em MPa:

$$f_{ctm} = 0,24f_{cm}^{0,65}, \quad \text{Xiao e Zhang (2006)} \quad [4.12.a]$$

$$f_{ctm} = 1,325 + 0,09f_{cm}, \quad \text{Leite (2001)} \quad [4.12.b]$$

$$f_{ctm} = 0,98.[0,33.\sqrt[3]{(f_{cm} - 8)^2}], \quad \text{Juan (2004) para RCD50} \quad [4.12.c]$$

$$f_{ctm} = 1,44.[0,33.\sqrt[3]{(f_{cm} - 8)^2}]^{0,5841}, \quad \text{Juan (2004) para RCD100} \quad [4.12.d]$$

sendo f_{ctm} a resistência à tração por compressão diametral, e $f_{ck(50\%)}$ e $f_{ck(100\%)}$ as resistências características à compressão, para teores de substituição de 50% e 100%, respectivamente, determinadas em função dos respectivos valores experimentais de f_{cm} .

Para concreto com agregados naturais, o CEB-1990, na sua expressão 2.1.5, recomenda a utilização de um fator da ordem de 0,9, a ser aplicada no resultado da tração quando a mesma for obtida através de testes de ensaios de tração por compressão diametral. No caso do concreto com agregados reciclados, as expressões propostas pelos autores acima, são todas obtidas destes ensaios. Portanto, na figura 4.12, os valores obtidos de resistência à tração para concreto com RCD para composição das curvas, estão com este fator redutor implícito nos resultados. Estas representam graficamente as expressões formuladas pelas Eq. [4.12.a] a [4.12.d] dos três autores acima, bem como a do CEB, expressa pela Eq.[4.6].

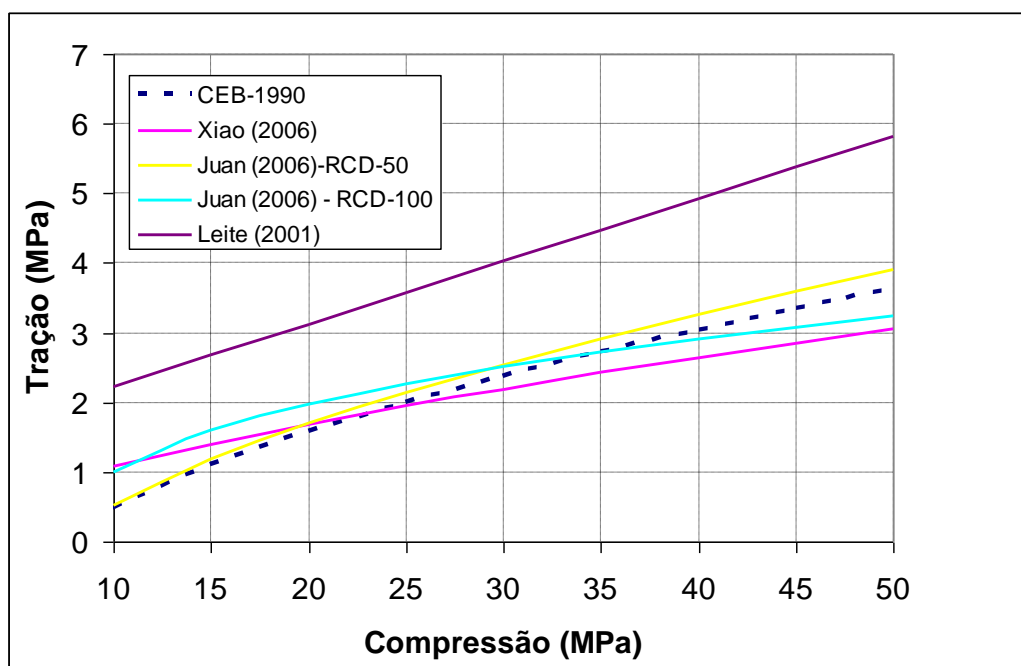


Figura 4.12 Relação entre à tração por compressão diametral e resistência à compressão para concreto. Fonte: (O Autor, 2018)

Pode-se observar, na figura 4.12, que as curvas segundo os autores Juan e Xiao para RCD, possuem um comportamento não linear semelhantes e próximas em ordem de grandeza. Já a curva segundo Leite, possui padrão bem distinto pois, além de situar-se bem mais acima das demais, possui comportamento linear, o que não corresponde ao padrão dos demais autores e também ao do CEB. Esta equação não será utilizada no presente trabalho.

4.8.2.3 Relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão

Xiao e Zhang (2006), Leite (2001) e Juan (2004), através de análise regressiva de resultados experimentais, propõem as seguintes equações para relacionar resistência à tração por compressão diametral e Módulo de Elasticidade Longitudinal Secante de concreto com RCD em MPa.

$$E_{ci} = \frac{10^5}{2,8 + \frac{40,1}{f_{cm}}}, \quad \text{Xiao e Zhang (2006)} \quad [4.13.a]$$

$$E_{ci} = (-3,48 + 4,63\sqrt{f_{cm}}) \cdot 10^3, \quad \text{Leite (2001)} \quad [4.13.b]$$

$$E_{ci} = 8936 \cdot \sqrt[3]{f_{cm(50\%)}}, \quad \text{Juan (2004) para RCD50} \quad [4.13.c]$$

$$E_{ci} = 7017 \cdot \sqrt[3]{f_{cm(100\%)}}, \quad \text{Juan (2004) para RCD100} \quad [4.13.d]$$

observando que $f_{cm(50\%)}$ e $f_{cm(100\%)}$ são as resistências médias à compressão para teores de substituição de 50% e 100%, respectivamente.

Na figura 4.13 estão representadas as curvas das equações 4.13.a a 4.13.d.

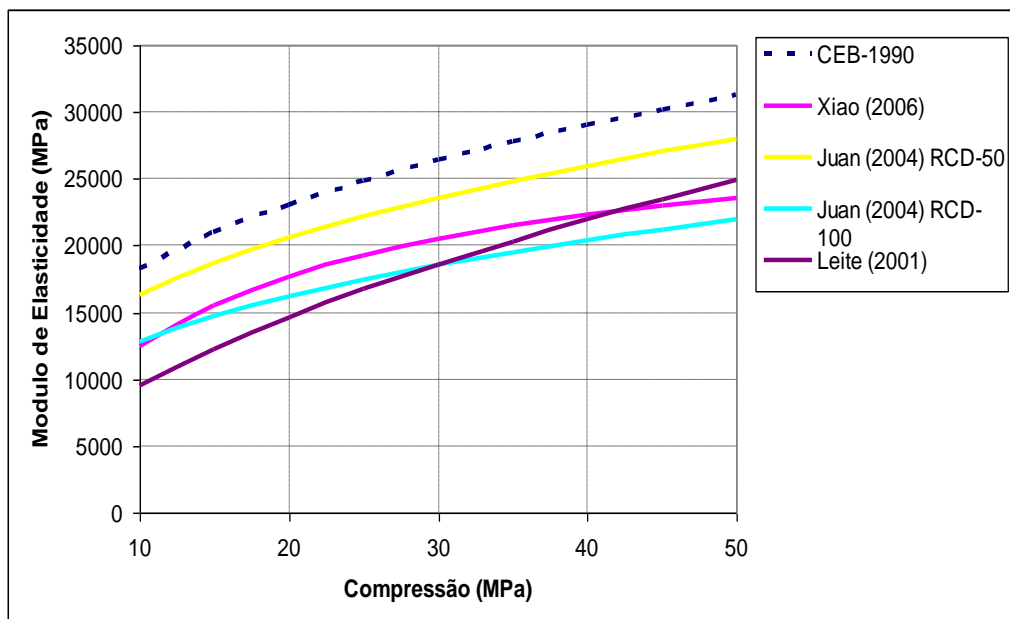


Figura 4.13 Relação entre módulo de elasticidade e resistência à compressão
Fonte: O Autor (2018)

4.9 DADOS EXPERIMENTAIS COLETADOS - ENSAIOS DE REFERÊNCIA

4.9.1 Coleta de Resíduos de Construção e demolição

Os dados experimentais do presente trabalho foram obtidos dos resultados dos ensaios realizados por Aragão (2007), no laboratório da Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), nos quais foi avaliado experimentalmente o comportamento mecânico de vigas tipo T e lajes nervuradas pré-moldadas, formadas de concreto armado convencional e reciclado de RCD. Estes dados foram disponibilizados por esta mesma instituição para a presente pesquisa. Os agregados graúdos e miúdos utilizados neste experimento foram obtidos a partir da caracterização e beneficiamento de resíduos de construção e demolição, realizados por Lima (2007), de quatro amostras (20m³), coletadas em dois bairros de Feira de Feira de Santana (Ba). Está apresentada na figura 4.14 conforme Aragão (2007), a composição do resíduo definido por caracterização gravimétrica.

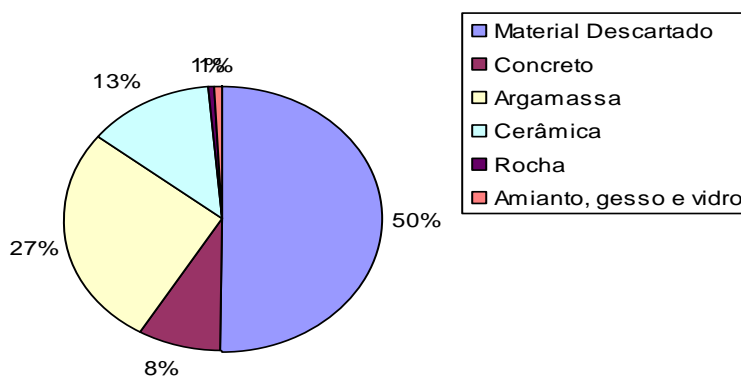


Figura 4.14 Composição média dos resíduos coletados.

Fonte: Aragão (2007) *apud* Lima (2007)

A composição da parcela de material inerte, não descartável, considerado reciclável como agregados, conforme artigo 3º da Resolução 307 do CONAMA e classificados como de classe A, estão apresentados na figura 4.15.

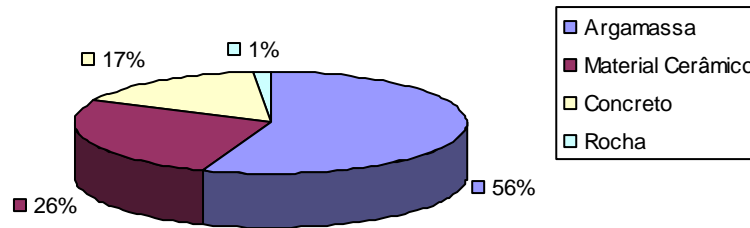


Figura 4.15 Composição do material inerte reciclável.
Fonte: Aragão (2007) *apud* Lima (2007)

4.9.2 Elementos estruturais confeccionados em experimento - Dados coletados

O material granular (agregados graúdos e miúdos) proveniente do beneficiamento dos resíduos inertes, está conforme parágrafo IV da Resolução CONAMA, portanto apresentam características técnicas aplicáveis em obras de edificação,

Conforme descreve Aragão (2007), para a fabricação das vigas T, foram confeccionados três tipos de concreto: O primeiro concreto convencional, formados com 100% de teor de agregados graúdos e miúdos naturais. Este, por ser utilizado como referência para os outros tipos de concreto produzido, foi denominado concreto RCD 00; O segundo, com 50% de agregados graúdos e miúdos reciclados, substituindo os agregados naturais, foi denominado de RCD-50. No terceiro concreto produzido, foram utilizados 100% de agregados reciclados, portanto ficou denominado de RCD-100.

Para os três tipos de concreto foram realizados ensaios de resistência à compressão, aos 7 dias, mesma idade da realização dos ensaios mecânicos nos elementos estruturais pré-moldados produzidos, no caso as vigas T. Os valores de resistência à compressão obtidos foram: 17,8 MPa para concreto RCD 00, 15,2 MPa para RCD-50 e 14 MPa para RCD-100.

Os concretos produzidos foram utilizados na fabricação de três séries de vigas T pré-moldadas, denominadas de T1, T2 e T3. Cada viga T é formada de uma vigota pré-moldada com dimensões utilizadas nas construções em geral, e capa de concreto moldada posteriormente. Todas as vigotas para as vigas foram moldadas com concreto convencional. Já nas capas de concreto foi aplicado concreto convencional RCD 00 na série T1 e concretos RDC-50 e RCD-100 nas séries T2 e T3, respectivamente. As vigas

possuíam 300 cm de comprimento cada uma e dimensões acabadas da seção para cada série, conforme indicada na tabela 4.2. A armadura distribuiu-se da seguinte maneira: para a vigota, 2Ø5mm na parte inferior e 1Ø5mm na parte superior; já para a capa, foram colocadas armaduras de distribuição de 3Ø5mm. (ARAGÃO, 2007). Na figura 4.16 está mostrada uma seção típica generalizada das vigas T ensaiadas.

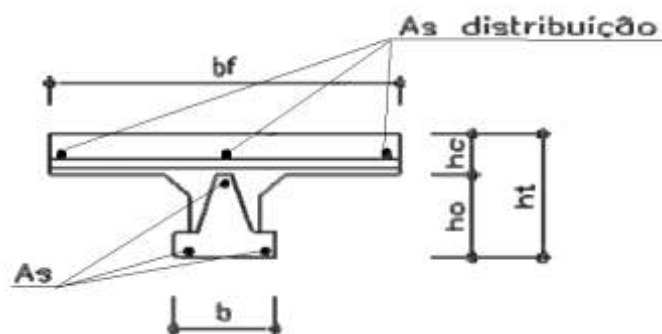


Figura 4.16 Seção típica de Viga T conforme pré-moldada.
Fonte: Aragão (2007)

Na tabela 4.2 estão apresentadas as dimensões reais das seções de cada viga T após pré-moldadas.

Tabela 4.2 Dimensões das seções das vigas.

Séries	b_f (cm)	h_c (cm)	h_o (cm)	h_t (cm)	b (cm)
Série T1	33,00	4,30	7,00	11,30	9,18
Série T2	33,00	4,70	7,00	11,70	9,07
Série T3	33,00	4,00	7,00	11,00	9,12

Fonte: Aragão (2007).

Consta na tabela 4.3 os tipos de concreto utilizados nas vigotas e capas das vigas fabricadas.

Tabela 4.3 Tipos de concreto utilizado na confecção de cada viga.

Denominação da Série	Tipo de Elemento	Concreto da Vigota	Concreto da Capa	Teor de Substituição
T1	Viga T	Convencional	Convencional	-
T2	Viga T	Convencional	Reciclado	50%
T3	Viga T	Convencional	Reciclado	100%

Fonte: Aragão (2007)

Na figura 4.17 está apresentada uma viga fabricada antes do ensaio de flexão.



Figura 4.17 Seção T após a moldagem e antes do ensaio. Fonte: Aragão (2007)

4.9.2.1 Ensaio de flexão em quatro pontos - Dados coletados

A segunda etapa do programa experimental conforme Aragão (2007), consistiu em submeter as três vigas das séries T1, T2 e T3 a um ensaio de flexão em 4 pontos (Figura 4.18) para avaliar o comportamento mecânico do elemento estrutural.



Figura 4.18 Configuração do ensaio de flexão das vigas e indicação da fissuração
Fonte: Aragão (2007)

A estrutura de reação das forças foi composta por pórtico metálico e uma laje de reação em concreto armado. O comprimento do vão entre apoios foi de 2,70m (Figuras 4.18 e 4.19). A força atuante foi aplicada através de um atuador hidráulico de capacidade 500 kN, com uma velocidade de carregamento igual a 2 mm/min. Um

sistema digital de aquisição de dados registrou as leituras indicadas pela célula de carga com capacidade para 5KN e pelo LVDTs de 100mm de curso montado no meio do vão.

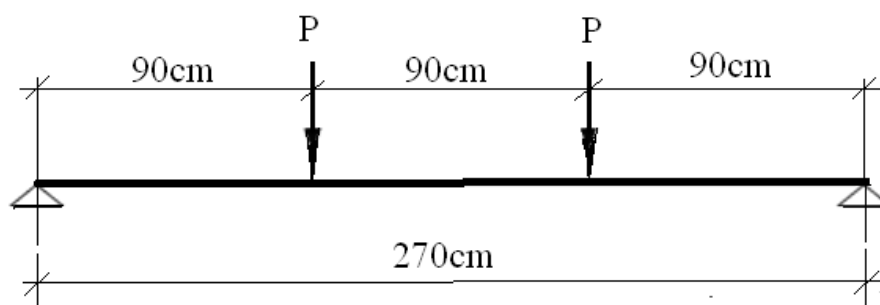


Figura 4.19 Diagrama de carregamento do ensaio de flexão em 4 pontos.

Fonte: Aragão (2007).

Conforme dados coletados dos ensaios de Aragão (2007), estão apresentadas na tabela 4.4, a seguir, os valores das cargas de serviço e dos momentos de fissuração experimental para a deflexão correspondente a flecha limite ($1/350$ do vão = 7,7mm). A indicação deste valor visou ter como referência a exigência da NBR 6118 para o atendimento ao Estado limite de utilização, no que concerne ao controle das deflexões para a aceitabilidade sensorial a vibrações em pisos de edificações.

Tabela 4.4 Momentos e Cargas de Serviço Experimentais.

Fonte: Aragão (2007)

Vigas T	Momento de Fissuração (kN.m)	Carga de Serviço (kN)
SÉRIE T1 -RCD 00	0,43	1,63
SÉRIE T2 - RCD 50	0,45	1,79
SÉRIE T3 - RCD 100	0,35	1,33

As curvas experimentais momento versus deflexão para as três séries T1, T2 e T3, estão apresentadas e inseridas nos gráficos das figuras 5.1, 5.2 e 5.3 do Capítulo 5.

4.10 CONCLUSÕES GERAIS DO CAPÍTULO

Diante da pesquisa de Revisão Bibliográfica e do exposto neste capítulo, algumas conclusões são possíveis:

a) A heterogeneidade dos materiais constituintes dos agregados de RCD, junto com a porosidade, são diferenças essenciais que tornam o concreto feito com este material, com complexidade diversa do concreto convencional;

b) Essas diferenças interferem diretamente nas propriedades mecânicas, sendo o módulo de elasticidade o mais afetado negativamente. Este fator faz com que as equações de relações de propriedades mecânicas para o concreto convencional, adotadas em prescrições normativas nacionais e internacionais, não se apliquem ao concreto com agregado reciclado de RCD:

b.1. As equações analíticas apresentadas neste capítulo e que serão aplicadas no presente trabalho, são as referentes as das relações de propriedades mecânicas:

- Equações [4.1] a [4.10] para o concreto convencional;
- Equações [4.13.a] a [4.13.d] para o concreto com agregado reciclado.

c) As vigotas das vigas de RCD 50 e RCD 100 são formadas de concreto convencional RCD 00. O concreto com agregado reciclado é aplicado apenas na capa superior;

d) O processo e nível de controle exercidos durante o beneficiamento dos resíduos de RCD interferem na qualidade do agregado reciclado, refletindo também na qualidade do concreto;

e) Há consenso, até então, no meio acadêmico sobre o concreto com RCD quanto:

- A maior influência dos agregados graúdos nas propriedades mecânicas;
- A redução do módulo de elasticidade do concreto quando os agregados graúdos naturais são substituídos por agregados de reciclados de RCD;
- A porosidade e teor de absorção, que sendo mais elevados afetam a dureza e durabilidade das peças estruturais, sendo necessárias mais pesquisas para o conhecimento e controle dessas variáveis;
- Ao conhecimento ainda incipiente quanto a influência dos agregados miúdos nas propriedades mecânicas: A divergência de pesquisadores,

quanto a influência dos agregados miúdos na resistência a tração do concreto, faz com que mais pesquisas sejam necessárias.

- f) O nível de maturidade do conhecimento do agregado de RCD já permite obter concretos com resistência a compressão igual ou mais elevada que a do concreto convencional, desde que sejam adequadamente feitas correções no fator água cimento e utilizados aditivos pozolânicos apropriados;
- g) Pode-se afirmar, no estágio atual do conhecimento científico, como consensual o entendimento entre a maioria das nações que estudam e utilizam o RCD, de que mesmo com restrições, este material pode ser utilizado em concreto para fins estruturais.
 - g.1. A classificação do agregado reciclado, o teor de substituição, as condições ambientais e as resistências permitidas são condições de restrições que diferem de um país para o outro.
 - g.2. Mesmo em países, como o Brasil, cuja codificação existente somente permite a utilização de agregado reciclado em concreto sem fim estrutural, os atuais estudos de diversos pesquisadores já apontam na direção da utilização em elementos estruturais.
- h) O presente trabalho, no contexto da codificação nacional sobre utilização de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição, busca agregar conhecimento no sentido da utilização em concreto para fins estruturais ainda não permitido no Brasil.
 - h.1. No contexto da codificação internacional, situa-se no entendimento geral quanto limitações do comportamento estrutural do concreto com RCD em relação ao teor de substituição de agregados naturais reciclados, com mais uma modesta contribuição.

5 APLICAÇÃO DO MODELO TEÓRICO EM VIGA T DE CONCRETO ESTRUTURAL COM AGREGADOS RECICLADOS DE RCD.

5.1 METODOLOGIA

No sentido de atingir os objetivos a que se propôs a presente pesquisa, está apresentada a seguir a forma sistemática com que foram desenvolvidos os trabalhos, a qual se constituiu na metodologia adotada, para a implementação dos procedimentos necessários ao desenvolvimento e obtenção dos resultados alcançados. A revisão bibliográfica (REFERÊNCIAS), que substanciou o embasamento teórico, e a coleta dos dados experimentais e das equações analíticas existentes, com formulações de propriedades mecânicas para concreto convencional e de RCD, permitiram executar as simulações teóricas para estudo do comportamento da deflexão das vigas T de concreto armado.

5.1.1 Levantamento de dados experimentais

A base experimental da pesquisa, consistiu na coleta dos resultados obtidos do trabalho de Aragão (2007) de ensaios mecânicos de três vigas T de concreto armado, denominadas de VT1, VT2 e VT3, formadas, respectivamente, de concreto com 100% de agregados graúdos e miúdos provenientes de jazidas naturais, de 50% de agregados reciclados de RCD em substituição aos naturais, e de 100% de agregados de RCD. Seguindo esta mesma ordem, os concretos são denominados, respectivamente, ao longo do trabalho de: RCD 00, RCD-50 e RCD-100.

Os dados experimentais coletados e que permitiram a necessária caracterização das vigas VT1, VT2 e VT3, foram: as dimensões das seções [(concreto e aço) e comprimento das vigas], a resistência à compressão dos concretos RCD 00, RCD-50 e RCD-100 aos 7 dias, especificação do aço, e os resultados dos ensaios mecânicos [curvas experimentais momento versus deflexão diagrama de carregamento, momento de fissuração e carga de serviço]. Todos estes dados, constam no Capítulo 4 do presente trabalho, com exceção das curvas experimentais dos ensaios mecânicos, que constam no presente Capítulo.

5.1.2 Levantamento de equações de propriedades mecânicas existentes

Para todas as simulações teóricas das vigas de concreto convencional e de RCD foi necessário, também, a utilização das propriedades mecânicas do concreto (Módulo de Elasticidade longitudinal e tração por compressão diametral). Foram levantados estudos dos pesquisadores Xiao e Zhang (2006), Leite (2001) e Juan (2004), que propõem formulações que relacionam estas propriedades com a resistência a compressão do concreto com RCD. Já para o concreto convencional (de referência) foram adotadas as formulações do CEB-1990. Todas estas formulações estão representadas pelas equações do Capítulo 4 do presente trabalho.

5.1.3 Aplicação do Método Bilinear

O modelo teórico adotado para o estudo das deflexões em vigas foi o Método Bilinear do Manual de Deformação e Fissuração do CEB-1983. Toda a fundamentação teórica do método está demonstrada no Capítulo 3. Para aplicação prática do mesmo, há que se tomar conhecimento dos conceitos e parâmetros definidos nos capítulos de fundamentação teórica 2 a 4, abrangentes para concreto convencional e concreto com agregados reciclados.

De uma maneira geral, a modelagem teórica do elemento estrutural (viga T) para determinação das flechas imediatas pelo Modelo Bilinear deu-se, basicamente, seguindo os seguintes passos principais:

I) Dados básicos de entrada da formulação do método:

- Geometria das seções de concreto e de aço (dimensões das vigas T e diâmetro e disposições das barras de aço);
- Propriedades mecânicas dos materiais, concreto e aço (f_{cm} , f_{ct} , E_c , E_s);
- Diagrama de carga (viga bi-apoiada sob flexão em 4 pontos);
- Coeficiente de aderência das barras β_1 , conforme definido na expressão;
- Coeficiente de duração do carregamento β_2 .

II) Parâmetros obtidos ao longo da formulação para os Estádios 1 e 2:

- A profundidade da linha neutra x_1 conforme e x_2 ;

- Os momentos de inércia da seção bruta de concreto ativo em relação ao respectivo centro de gravidade Ib_1 e Ib_2 , e em relação a linha neutra, Ibx_1 e Ibx_2 ;
- Os momentos de inércia das seções de aço em relação ao respectivo centro de gravidade Ia_1 e Ia_2 e a linha neutra Iax_1 e Iax_2 ;
- Os coeficientes de correção $ks1$ e $ks2$ das armaduras;
- O valor da flecha base ac (seção bruta de concreto) para vigas sob flexão em 4 pontos conforme expressão;
 - A flecha no Estádio 1, $a1$;
 - A flecha no Estádio 2 puro, $a2$;
 - O momento de fissuração M_r ;
 - Finalmente, a flecha imediata no meio do vão, $a = (1 - \zeta_b) \cdot a_1 + \zeta_b \cdot a_2$,
 apresentada o capítulo 4 de formulação do Método Bilinear.

Seguindo este roteiro, determinou-se um conjunto de pares ordenados (momento versus deflexão), para um domínio pré-estabelecido (faixa de deflexão), gerando gráficos com curvas, o que possibilitou executar as simulações teóricas, para todas as análises que se fizeram necessárias.

Constam em tabelas do presente Capítulo, os dados básicos referentes a propriedades geométricas, mecânicas e condições de contorno referentes a todas as simulações feitas para a viga de concreto, formada apenas de agregados graúdos e miúdos naturais, e para vigas de concreto com teor de 50% e 100% de substituição destes agregados por agregados de RCD. E na seqüência de cada simulação, construiu-se tabelas de resultados resultados com valores dos momentos de serviço e de fissuração obtidos para a flecha de serviço (7,7 mm) prescrita pela NBR-6118, para atendimento ao critério de aceitabilidade sensorial a vibrações em piso de edificações.

5.1.4 Validação do modelo teórico e análise dos resultados

Para testar e validar o modelo teórico a ser adotado, fez-se necessário, para cada viga em e um mesmo gráfico, estabelecer o confronto entre os resultados obtidos da aplicação do modelo teórico com a curva experimental coletada dos ensaios de Aragão (2007). As três vigas T ensaiadas foram analisadas pelo Método Bi-linear descrito no Capítulo 3, para o Estado limite de utilização, e limitadas ao estudo das

flechas imediatas provocadas por carregamento externo aplicado instantaneamente.

Para simulação da viga de concreto convencional VT1 (RCD 00), requereu-se a inserção no modelo teórico (Método Bilinear) das propriedades mecânicas (módulo de elasticidade e tração por compressão diametral) conforme equações do CEB. Para as vigas de concreto com agregados reciclados, VT2 (RCD-50) e VT3 (RCD-100), foram inseridas o módulo de elasticidade, porém conforme equações propostas por Xiao (2006), Leite (2001) e por Juan (2004). Do confronto das curvas teóricas momento versus deflexão, com as respectivas curvas experimentais de VT1, VT2 e VT3, análise regressivas definidas por coeficiente de determinação R^2 , em conjunto com os parâmetros momento de serviço, o momento de fissuração e a rigidez no Estádio 1.

O confronto das curvas teóricas momento versus deflexão com as respectivas curvas experimentais de VT1, VT2 e VT3, foi feita utilizando análises regressivas em conjunto com os parâmetros momento de serviço, momento de fissuração e rigidez no Estádio 1. Isto permitiu, além de validar o Modelo Bi-linear, fazer as análises necessárias para cada tipo de concreto, para atendimento dos objetivos propostos pela presente pesquisa.

5.2 SIMULAÇÕES TEÓRICAS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.2.1 Deflexão da viga de concreto convencional (VT1-RCD00)

No presente trabalho, o comportamento momento versus deflexão considerado como ideal, é aquele desempenhado pela viga T de concreto com agregados convencionais. Portanto, a viga VT1-RCD00 é tida como referência em todas as simulações teóricas e análises feitas posteriormente, para as vigas de concreto com RCD. Porém, para que se ateste que esta viga possa ser teórica e experimentalmente considerada como referência, torna-se necessário, fazer a validação do modelo adotado, aplicando o Método Bi-linear para a própria VT1. Estão apresentados nas tabelas 5.1, 5.1.a e 5.1.b, os dados de entrada e na tabela 5.2 os resultados obtidos.

Tabela 5.1 VT1 RCD 00 - Simulação teórica - Método Bilinear - Dados Básicos.

Geométricos	Unidade	Valor
Altura da viga (h)	cm	11,3
Largura da nervura (bw)	cm	9,18
Altura da mesa (hf)	cm	4,3
Largura da mesa (bf)	cm	33
Vão da viga (L)	m	2,7
Terço do vão (z)	m	0,9
ESTÁDIO 1		
Nº de barras inferiores (n)	und	3
Diâmetro de barras (\emptyset)	mm	0,5
Vigota - Distância da barra 1 a face superior da viga (d1)	cm	6,55
Vigota - Distância da barra 2 a face superior da viga (d2)	cm	9,05
Vigota - Distância da barra 3 a face superior da viga (d3)	cm	9,05
Nº de barras superiores (w)	und	3
Distância das barras superiores a face superior da viga (d')	cm	2,75
ESTÁDIO 2		
Nº de barras inferiores (n)	und	6
Diâmetro de barras (\emptyset)	mm	0,5
Vigota - Distância da barra 1 a face superior da viga (d1)	cm	6,55
Vigota - Distância da barra 2 a face superior da viga (d2)	cm	9,05
Vigota - Distância da barra 3 a face superior da viga (d3)	cm	9,05
Nº de barras superiores (w)	und	0
Distância das barras superiores a face superior da viga (d')	cm	na

Fonte: O Autor (2018)

Tabela 5.1.a VT1 RCD 00 - Simulação teórica - Método Bilinear - Dados Básicos - (Continuação da tabela 5.1)

Propriedades Mecânicas	Unidade	Valor
Resistência média a compressão do concreto (fmc)	MPa	17,8
Resistência a tração por compressão diametral do concreto (fct)	MPa	1,381
Módulo de elasticidade longitudinal secante do concreto (Ecs)	MPa	22150
Resistência característica do aço (fyk)	MPa	600
Módulo de elasticidade do aço (Es)	MPa	214200
Coefficiente de qualidade da aderência das barras nervuradas (b1)	-	na
Coefficiente de qualidade da aderência das barras lisas (b1)	-	0,5
Coefficiente de fluência do concreto (Y)	-	0
Coefficiente de deformação específica de retração do concreto (ecs)	-	0
Coefficiente de envelhecimento (Y)	-	0,8

Fonte: O Autor (2018)

Tabela 5.1.b VT1 RCD 00 - Continuação da tabela 5.1.a - Dados Básicos - Método Bilinear

Condições de contorno / carregamento	Unidade	Valor
Número de apoios	und	2
Tipo de apoio	-	simples
Tipo de carregamento	-	Flexão em 4 pontos
Coefficiente de duração do carregamento (b2)	und	1

Fonte: O Autor (2018)

Exceto os valores de Módulo de Elasticidade, resistência à tração por compressão diametral do concreto e os fatores β_1 , β_2 , ψ , ϵ_{cs} , todos os demais dados de propriedades mecânicas dos materiais (incluindo resistência à compressão do concreto), geometria e condições de contorno foram obtidos dos dados experimentais descrito no Capítulo 4, dos ensaios experimentais de Aragão (2007). A tração (fct) e a elasticidade (Ec) foram obtidos à partir das equações [4.6] e [4.8] apresentadas no capítulo 4, em conformidade com as prescrições do CEB-1990 para concreto com agregados naturais. Estas formulações estão em função da resistência média à

compressão (f_{cm}), que por sua vez é oriunda dos resultados experimentais e reproduzida na tabela 5.1.a.

Tabela 5.2 - VT2 RCD 00 Resultados das simulações teóricas do Método Bilinear

Fonte da Equação da Propriedade Mecânica	Momento de Inércia I_x (cm ⁴)	Linha Neutra x^2 (cm ²)	Momento Fissuração	Momento Fissuração	Momento Serviço	Momento Serviço
			MrD (kN.m)	MrD (kN.m)	Mserv (kN.m)	Mserv (kN.m)
	Estádio 1	Estádio 2	Teórico	*Experim	Teórico	*Experim
CEB-1990	1893	1,628	0,347	*0,43	1,5879	*1,467

Obs.: - O momento de fissuração teórico foi obtido utilizando a equação [4.17].

- * Resultados experimentais dos ensaios de Aragão (2007)

Fonte: O Autor (2018)

Na figura 5.1, a seguir, está apresentado o gráfico com as curvas momento versus deflexão, teórica e experimental, para a viga de concreto com agregados naturais VT1-RCD00.

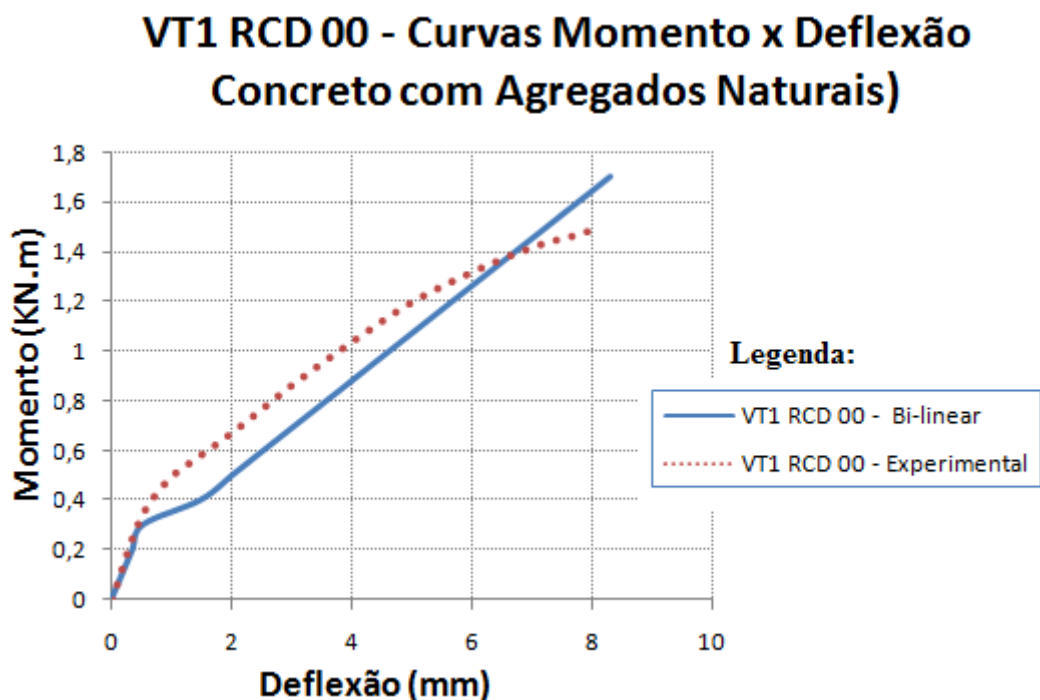


Figura 5.1 – Viga VT1- RCD 00 - Curvas momento versus deflexão (teórica e experimental).

Da análise de validação do modelo teórico para esta viga (Fig. 5.1) constata-se que a curva possui inclinação que se aproxima bem da experimental (rigidezes próximas) no Estádio 1. Embora o momento de fissuração teórico fique abaixo 19,3% (Tab. 5.2), este representa bem as deflexões abaixo do estado limite, pois o Momento de Serviço teórico possui boa aproximação com o respectivo valor experimental, diferindo apenas 7,6% deste, cuja flecha limite é de 7,71mm admitido pelo ELS (Estado limite de serviço). O comportamento experimental traduziu com realismo a progressiva perda de rigidez da viga, pois possui concavidade voltada para baixo, enquanto que a Bi-Linear caracteriza-se, como a própria denominação indica, comportamento de linearidade. Portanto é de se esperar que em determinadas regiões elas se afastem, para depois convergirem, nas proximidades da flecha limite definido pelo ELS.

Para avaliar o grau de dispersão entre os pontos das curvas, realizou-se análise de regressão não linear, entre os pontos de coordenadas teórica e experimental. O coeficiente de determinação resultou em $R^2=0,97$. Desta forma, considera-se que o modelo teórico é adequado para o cálculo de deflexão em vigas de concreto com agregados naturais, para o ELS.

5.2.2 Deflexão da viga de concreto com RCD50 (VT2-RCD50)

Estão apresentados nas tabelas 5.3, 5.3.a, os dados de entrada e na tabela 5.4, os resultados obtidos. A diferença existente entre os valores do módulo de elasticidade longitudinal, de cada autor, que consta na tabela 5.3.a dos dados para a VT2, é proveniente das diferentes formulações para esta propriedade mecânica, representada pelas equações [4.13.a], [4.13.b], [4.13.c], próprias para RCD, e que, por sua vez, estão em função da resistência à compressão obtida dos dados experimentais.

A resistência a tração, iguais para todos os autores, foi determinada pela equação [5.6] do CEB, visto que o bordo e as armaduras mais tracionadas da viga estão situadas na vigota formada de concreto com agregados naturais (RCD00). Esta propriedade mecânica é que define o momento de fissuração, conforme equação [3.17] do modelo bi-linear. Assim posto, os momentos de fissuração independem do autor que esteja sendo considerado na simulação teórica, conforme pode-se observar nos resultados da tabela 5.4. Portanto, são os módulos de elasticidades, oriundos da formulação de cada autor, que determinaram os diferentes valores de momento de serviço.

Tabela 5.3 VT2 RCD 50 - Simulação teórica - Método Bilinear - Dados Básicos.

Geométricos	Unidade	Juan	Leite	Xiao
Altura da viga (h)	cm	11,7		
Largura da nervura (bw)	cm	9,07		
Altura da mesa (hf)	cm	4,7		
Largura da mesa (bf)	cm	33		
Vão da viga (L)	m	2,7		
Terço do vão (z)	m	0,9		
ESTÁDIO 1				
Nº de barras inferiores (n)	und	3		
Diâmetro de barras (\emptyset)	mm	0,5		
Barra da Vigota - Distância da barra 1 a face superior da viga (d1)	cm	6,95		
Barra da Vigota - Distância da barra 2 a face superior da viga (d2)	cm	9,45		
Barra da Vigota - Distância da barra 3 a face superior da viga (d3)	cm	9,45		
Nº de barras superiores (w)	und	3		
Distância das barras superiores a face superior da viga (d')	cm	2,75		
ESTÁDIO 2				
Nº de barras inferiores (n)	und	6		
Diâmetro de barras (\emptyset)	mm	0,5		
Barra da Vigota - Distância da barra 1 a face superior da viga (d1)	cm	6,95		
Barra da Vigota - Distância da barra 2 a face superior da viga (d2)	cm	9,45		
Barra da Vigota - Distância da barra 3 a face superior da viga (d3)	cm	9,45		
Nº de barras superiores (w)	und	0		
Distância das barras superiores a face superior da VT (d')	cm	Na		

Fonte: (O Autor,2018)

Tabela 5.3.a VT2 RCD 50 - Continuação da tabela 5.3 - Dados Básicos - Método Bilinear

Propriedades Mecânicas	Unidade	Juan	Leite	Xiao
Resistência média a compressão do concreto (fmc)	MPa	15,2		
Resistência a tração do aço (fct)	MPa	1,381	1,381	1,381
Módulo de elasticidade longitudinal secante do concreto (Ecs)	MPa	18820	12390	15630
Resistência característica do aço (fyk)	MPa	600		
Módulo de elasticidade do aço (Es)	MPa	214200		
Coefficiente de qualidade da aderência das barras nervuradas (b1)	-	na		
Coefficiente de qualidade da aderência das barras lisas (b1)	-	0,5		
Coefficiente de fluência do concreto (γ1)	-	0		
Deformação específica de retração do concreto	ecs	0		
Coefficiente de envelhecimento	c	0,8		

Fonte: (O Autor, 2018)

Tabela 5.3.b VT2 RCD 50 - Continuação da tabela 5.3.a - Dados Básicos - Método Bilinear

Condições de contorno/carregamento	Unidade	Juan	Leite	Xiao
Número de apoios	und	2		
Tipo de apoio	-	Simples		
Tipo de carregamento	-	Flexão em 4 pontos		
Coefficiente de duração do carregamento (b2)	und	1		

Fonte: (O Autor, 2018)

Tabela 5.4 VT2 RCD 50 Resultados das simulações teóricas do Método Bilinear

Autor da Equação da Propriedade Mecânica	Momento de Inércia Ix (cm ⁴)	Linha Neutra x ² (cm ²)	Momento Fissuração	Momento Fissuração	Momento Serviço	Momento Serviço
			MrD (kN.m)	MrD (kN.m)	Mserv (kN.m)	Mserv (kN.m)
	Estádio 1	Estádio 2	Teórico	*Experim	Teórico	*Experim
Juan	2086	1,802	0,369	*0,45	1,6825	*1,611
Leite	2086	2.268	0,369	*0,45	1,5355	*1,611
Xiao	2086	1,961	0,369	*0,45	1,6186	*1,611

* Dados coletados dos resultados experimentais de Aragão (2007).

Na figura 5.2 estão representadas para a viga com 50% de substituição dos agregados naturais por reciclados de RCD, as curvas teóricas conforme propriedades mecânicas propostas por Juan, Leite e Xiao, bem como a curva experimental dos ensaios de Aragão (2007).

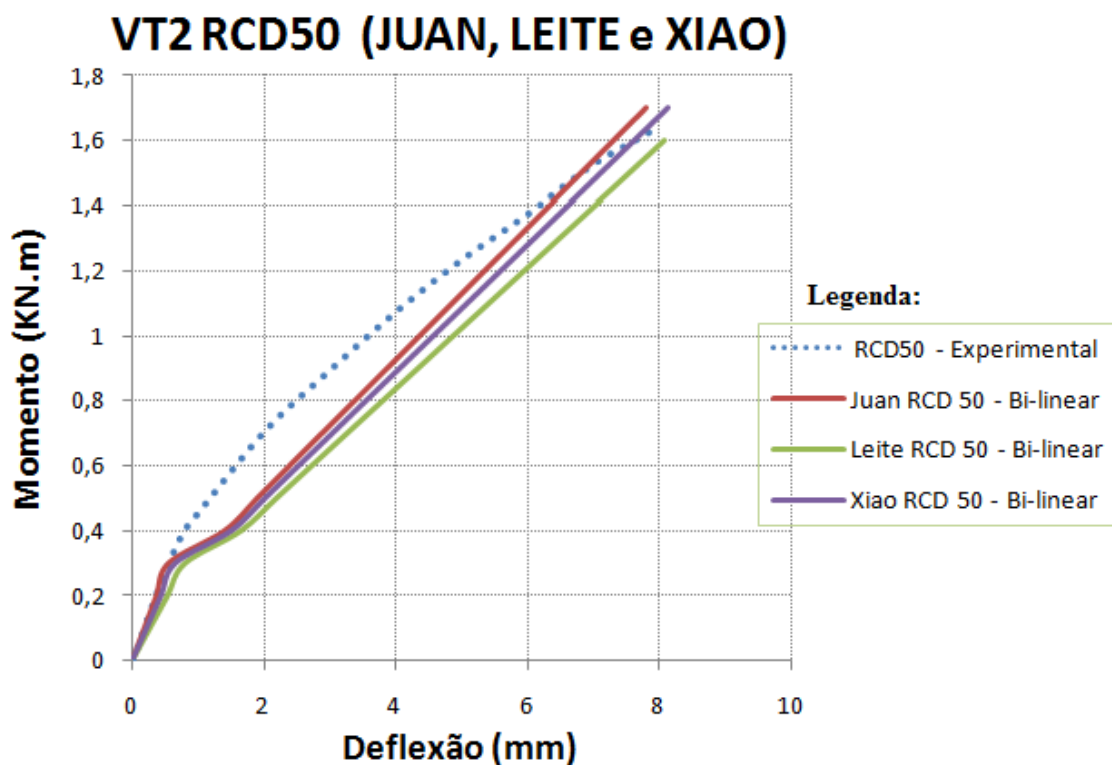


Figura 5.2 – Viga VT2-RCD-50 - Curvas momento versus deflexão (teórica e experimental).

Observa-se no gráfico (Fig. 5.2), que no Estádio 1 (fase Elasto-linear), as curvas teóricas, segundo as propriedades de Juan e Xiao, ficaram bem próximas da experimental, portanto com rigidez que reflete bem a realidade dos ensaios. Já a curva segundo propriedades mecânicas de Leite, possui, para este estágio de carregamento, menor inclinação que as demais, portanto menor rigidez. Esta diferença é explicada pela expressão [4.13.b], cujo módulo de elasticidade, para faixa de resistência a compressão menores que 42 MPa, resulta em valor inferior aos apresentados pelos demais autores, conforme gráfico da figura 4.13. Isto é refletido nos valores de módulo de elasticidade apresentado na tabela 6.5.

Com relação a fissuração, observa-se, pelos dados da tabela 5.4, que as curvas segundo todos os autores, tem início do processo coincidindo exatamente no mesmo

estágio de solicitação, com boa aproximação com o do ensaio experimental, embora situado 18% abaixo deste. Portanto, a resistência de tração que interfere no momento de fissuração tem valor determinado pela Eq. [5.6] do CEB para concreto com agregados naturais, o mesmo utilizado para a vigota, já que, do concreto da viga, apenas o da capa é formada com agregados de RCD.

Imediatamente após a fissuração, fica evidenciado nas curvas do gráfico da figura 5.2, um aumento abrupto e localizado nas deflexões, com dois pontos de descontinuidade, gerando uma decalagem nas curvas, caracterizando bem o modelo de bi-linearidade análogo ao representado no gráfico da figura 3.10 do Capítulo 3 de formulação do Método Bilinear. Neste, observa-se que o produto dos fatores β_1 e β_2 , se menor que a unidade, provoca um deslocamento localizado na curva, com patamar definido no nível de M_{rD} .

Terminada a fissuração, inicia-se o denominado Estádio 2. A visualização gráfica apresenta curvas segundo Juan e Xiao, com bastante proximidade de inclinação, significando rigidezes próximas. Já a de Leite acentua-se para uma menor inclinação. Todas estas curvas convergem para a experimental, a medida que a deflexão aproxima-se do valor limite admitido pelo Estado limite de utilização (flecha=1/350=7,7mm). Relembrando que por definição da NBR 6118 (2014), este é o valor requerido para o controle de flechas quanto atendimento ao critério de aceitabilidade sensorial a vibrações em piso de edificações.

Quanto ao momento de serviço, que por definição, é aquele em que a deflexão atinge o Estado limite de utilização, as curvas teóricas e os valores indicados na tabela 5.4, mostram que o de Xiao coincide exatamente com o experimental. O valor segundo a curva de Leite está 4.7% abaixo, enquanto a de Juan, 4.4% acima da experimental.

No sentido de avaliar o grau de dispersão entre os pontos das curvas de cada autor e a curva experimental, realizou-se para cada uma, análise regressiva não linear. Os coeficientes de determinação para as curvas segundo propriedades mecânicas de Juan, Leite e Xiao, resultaram em R^2 igual a 0,97 para os dois primeiros e 0,96 para o último.. Estes coeficientes denotam que as curvas possuem praticamente, mesmo grau de aproximação com a experimental.

Diante da comparação entre curvas teórica e experimental, quanto às rigidezes nos Estádios 1 e 2, início do processo de fissuração e momento de serviço, portanto, quanto ao comportamento na faixa de deflexões dentro do Estado limite de serviço

(ELS), refletido nos coeficientes de determinação R^2 acima apresentados, a presente pesquisa recomenda a formulação de Xiao, Li e Zhang (2006) para determinação do módulo de elasticidade, como a mais recomendável para simulações teóricas de viga T de concreto com RDC-50 na capa. Desta forma, considera-se que o modelo teórico Bi-linear é adequado para o cálculo de deflexão em vigas de concreto com agregados RCD50, para o ELS.

5.2.3 Deflexão da viga de concreto com RCD100 (VT3-RCD100)

Estão apresentados nas tabelas 5.5, 5.5.a e 5.5.b , os dados de entrada e na tabela 5.6, os resultados obtidos. A diferença existente entre os valores do módulo de elasticidade longitudinal, de cada autor, que consta na tabela 5.5 dos dados para a VT3, é proveniente das diferentes formulações para esta propriedade mecânica, representada pelas equações [4.13.a], [4.13.b], [4.13.d], próprias para RCD, e que, por sua vez, estão em função da resistência à compressão obtida dos dados experimentais.

A resistência a tração, iguais para todos os autores, foi determinada pela equação [5.6] do CEB, visto que o bordo e as armaduras mais tracionadas da viga estão situadas na vigota formada de concreto com agregados naturais (RCD00). Esta propriedade mecânica é que define o momento de fissuração, conforme equação [3.17] do modelo bi-linear. Assim posto, os momentos de fissuração independem do autor que esteja sendo considerado na simulação teórica, conforme pode-se observar nos resultados da tabela 5.4. Portanto, são os módulos de elasticidades, oriundos da formulação de cada autor, que determinaram os diferentes valores de momento de serviço.

Nos gráficos da figura 5.3 a seguir, estão representadas, para a viga com 100% de substituição dos agregados naturais por reciclados de RCD, as curvas teóricas bi-lineares conforme propriedades mecânicas propostas por Juan, Leite e Xiao, bem como a curva experimental dos ensaios de Aragão (2007).

Tabela 5.5 VT3 RCD 100 - Simulação teórica - Método Bilinear - Dados Básicos.

Geométricos	Unidade	Juan	Leite	Xiao
Altura da viga (h)	cm	11		
Largura da nervura (bw)	cm	9,12		
Altura da mesa (hf)	cm	4		
Largura da mesa (bf)	cm	33		
Vão da viga (L)	m	2,7		
Terço do vão (z)	m	0,9		
ESTÁDIO 1				
Nº de barras inferiores (n)	und	3		
Diâmetro de barras (\emptyset)	mm	0,5		
Vigota - Distância da barra 1 a face superior da viga (d1)	cm	6,95		
Vigota - Distância da barra 2 a face superior da viga (d2)	cm	9,45		
Vigota - Distância da barra 3 a face superior da viga (d3)	cm	9,45		
Nº de barras superiores (w)	und	3		
Distância das barras superiores a face superior da viga (d')	cm	2,75		
ESTÁDIO 2				
Nº de barras inferiores (n)	und	6		
Diâmetro de barras (\emptyset)	mm	0,5		
Vigota - Distância da barra 1 a face superior da viga (d1)	cm	6,95		
Vigota - Distância da barra 2 a face superior da viga (d2)	cm	9,45		
Vigota - Distância da barra 3 a face superior da viga (d3)	cm	9,45		
Nº de barras superiores (w)	und	0		
Distância das barras superiores a face superior da viga (d')	cm	Na		

Fonte: (O Autor, 2018)

Tabela 5.5.a –VT3 RCD 100 - Continuação da tabela 5.5 - Dados Básicos - Método Bilinear

Propriedades Mecânicas	Unidade	Juan	Leite	Xiao
Resistência média a compressão do concreto (fmc)	MPa	14		
Resistência a tração por compressão diametral do concreto (fct)	MPa	1,381*		
Módulo de elasticidade longitudinal secante do concreto (Ecs)	MPa	14380	11770	15010
Resistência característica do aço (fyk)	MPa	600		
Módulo de elasticidade do aço (Es)	MPa	214200		
Coefficiente de qualidade da aderência das barras nervuradas (b1)	-	na		
Coefficiente de qualidade da aderência das barras lisas (b1)	-	0,5		
Coefficiente de fluência do concreto (γ1)	-	0		
Deformação específica de retração do concreto	ecs	0		
Coefficiente de envelhecimento	c	0,8		

Fonte: (O Autor, 2018)

Tabela 5.5.b VT3 RCD 100 - Continuação da tabela 5.5.a - Dados Básicos - Método Bilinear

Condições de contorno/carregamento	Unidade	Juan	Leite	Xiao
Número de apoios	und	2		
Tipo de apoio	-	Simple		
Tipo de carregamento	-	Flexão em 4 pontos		
Coefficiente de duração do carregamento (b2)	und	1		

Fonte: (O Autor)

Tabela 5.6 VT3 RCD 100 - Resultados das simulações teóricas do Método Bilinear

Autor da Equação da Propriedade Mecânica	Momento de Inércia I_x (cm ⁴)	Linha Neutra x^2 (cm ²)	Momento Fissuração M_{rD} (kN.m)	Momento Fissuração M_{rD} (kN.m)	Momento Serviço M_{serv} (kN.m)	Momento Serviço M_{serv} (kN.m)
			Teórico	*Experim.	Teórico	*Experim.
	Estádio 1	Estádio 2				
Juan	1738	1,941	0,337	*0,35	1,3488	*1,197
Leite	1738	2,114	0,337	*0,35	1,2846	*1,197
Xiao	1738	1,905	0,337	*0,35	1,3624	*1,197

* Dados coletados dos resultados experimentais de Aragão (2007).

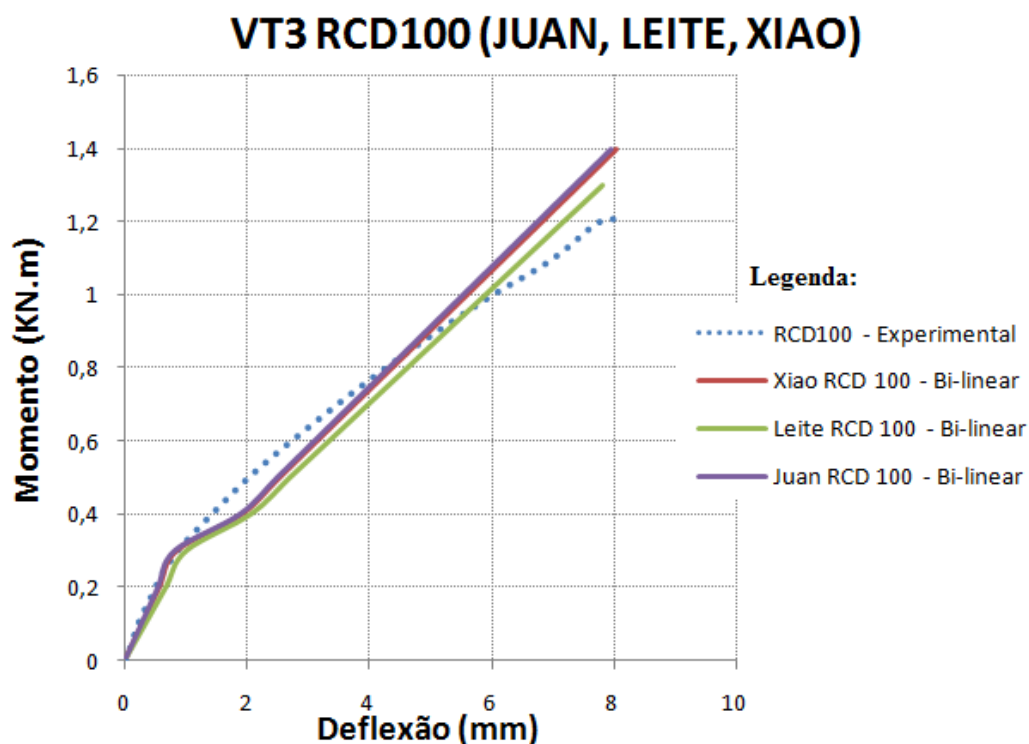


Figura 5.3 Viga VT3-RCD-100 - Curvas momento versus deflexão (teórica e experimental).

Dos gráficos apresentados pela figura 5.3, observa-se que na fase-elástico linear (Estádio 1), as inclinações das curvas conforme Xiao e Juan, praticamente coincidem com a experimental. Portanto quanto às rigidezes, estas curvas refletem bem os resultados experimentais antes do início do processo de fissuração. Já a curva segundo as propriedades mecânicas de Leite (2001), a inclinação neste Estádio, apresenta-se ligeiramente inferior a experimental. Sendo o módulo de Elasticidade, o

parâmetro de propriedade mecânica que comanda a rigidez no Estádio 1, quando se compara vigas com mesmas propriedades geométricas, o valor do módulo proposto por Leite [4.13.b], é menor, respectivamente 21,6% e 18,15% que o de Xiao [4.13.a], e Juan [4.13.d], os quais praticamente coincidem com a inclinação experimental.

Com relação a fissuração, observa-se, pelos dados da tabela 5.6, que as curvas segundo todos os autores, tem início do processo coincidindo exatamente no mesmo estágio de solitação, com boa aproximação com o do ensaio experimental, embora situado 6,6 % abaixo deste. Portanto, a resistência de tração que interfere no momento de fissuração tem valor determinado pela Eq. [5.6] do CEB para concreto com agregados naturais, o mesmo utilizado para a vigota, já que, do concreto da viga, apenas o da capa é formada com agregados de RCD.

Imediatamente após a fissuração, fica evidenciado nas curvas do gráfico da figura 5.3, um aumento abrupto e localizado nas deflexões, com dois pontos de descontinuidade, gerando uma decalagem nas curvas, caracterizando bem o modelo de bi-linearidade análogo ao representado no gráfico da figura 3.10 do capítulo 3 de formulação do Método Bi-linear. Neste, observa-se que o produto dos fatores β_1 e β_2 , se menor que a unidade, provoca um deslocamento localizado na curva, com patamar definido no nível de M_{rD} .

Quanto ao momento de serviço, que por definição, é aquele em que a deflexão atinge o Estado limite de utilização, as curvas teóricas e os valores indicados na tabela 5.6, mostram que o de Leite é a que mais se aproxima do experimental, ficando acima deste 7,3%. Já o valor segundo a curva de Juan está 12,7%, enquanto a de Xiao, 13,8% acima da experimental. Todas as curvas teóricas, embora com momento de serviço um pouco acima dos resultados dos ensaios experimentais, possuem boa aproximação, representando bem o limite de estado de serviço.

No sentido de avaliar o grau de dispersão entre os pontos das curvas de cada autor e a curva experimental, realizou-se para cada uma, análise regressiva não linear. Os coeficientes de determinação para as curvas segundo propriedades mecânicas de Juan, Leite e Xiao, resultaram em R^2 igual a 0,98. Estes coeficientes denotam que as curvas possuem praticamente, mesmo grau de aproximação com a experimental.

Diante da comparação entre curvas teórica e experimental, quanto às rigidezes nos Estádios 1 e 2, início do processo de fissuração e momento de serviço, portanto, quanto ao comportamento na faixa de deflexões dentro do Estado limite de serviço

(ELS), refletido nos coeficientes de determinação R^2 acima apresentados, a presente pesquisa recomenda as formulações de Juan, Leite e Xiao, para determinação do módulo de elasticidade longitudinal, como recomendáveis para simulações teóricas para viga T de concreto com RDC-100 na capa. Desta forma, considera-se que o modelo teórico Bi-linear é adequado para o cálculo de deflexão em vigas de concreto com agregados RCD100, para o ELS.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o objetivo de avaliar a influencia da substituição dos agregados naturais do concreto convencional por agregados de RCD, na deflexão imediata de vigas de concreto armado, foi verificada a adequação de equações analíticas existentes para predição de propriedades mecânicas do concreto reciclado. Isto se fez utilizando o Modelo Bi-linear do CEB, para simulações teóricas em três vigas: Uma em concreto com agregado natural, uma segunda com 50% dos agregados miúdos e graúdos substituídos por agregados reciclados de RCD e a terceira com 100% de teor de substituição. Os resultados foram comparados com resultados experimentais já existentes de vigas, com as mesmas características físicas e geométricas, que foram submetidas a ensaio de flexão em quatro pontos.

6.1 CONCLUSÕES

Dos resultados obtidos a partir do confronto entre as curvas experimentais e teóricas para validação do modelo adotado, e das simulações teóricas que se fizeram necessárias, tornou-se possível chegar as seguintes conclusões:

- A curva teórica momento versus deflexão, para a viga RCD00 de concreto convencional, representa bem o comportamento deflexional abaixo do estado limite de serviço pois, embora o Momento de Fissuração fique 19,3% abaixo do experimental, esta possui inclinação que se aproxima bem da experimental (rigidezes próximas) no Estádio 1. Além disso, o Momento de Serviço teórico possui boa aproximação com o respectivo valor experimental, diferindo apenas 7,6% deste, cuja flecha limite é de 7,71mm, valor admitido pelo ELS (Estado limite de serviço);
- Para a viga de RCD 50, pode-se verificar que o módulo de elasticidade interferiu significativamente no desempenho da curva momento-deflexão, quando comparada com a da viga com concreto convencional. Analiticamente, isto é decorrente das formulações das propriedades mecânicas dos autores que resultam em valores inferiores de módulos de elasticidade, quando comparados com o do concreto convencional, inclusive diversos entre si. Isto faz com que, no Estádio 1, as curvas segundo Juan (2004) e Xiao (2006) fiquem bem próximas da experimental,

enquanto a de Leite (2001), cujo módulo é menor que os desses autores, possua inclinação inferior, portanto menor rigidez.;

- Como apenas a capa da viga RCD 50 é formada de agregados reciclados, (pois a vigota é de concreto convencional), as simulações teóricas, independente do autor, mostram que todas curvas iniciam o processo de fissuração no mesmo estágio. Isto se explica porque a tração máxima, que interfere diretamente no momento de fissuração, ocorre no bordo inferior da vigota. Estes valores apresentam boa aproximação com o Momento de Fissuração experimental, embora 18% abaixo deste;
- Quanto ao momento de serviço da viga de RCD 50, as curvas teóricas mostram que a de Xiao coincide exatamente com o experimental. O valor segundo a curva de Leite está 4.7% abaixo, enquanto a de Juan, 4.4% acima da experimental. Possuem portanto boa aproximação;
- Diante da comparação entre curvas teórica e experimental, quanto às rigidezes nos Estádios 1 e 2, início do processo de fissuração e momento de serviço, a presente pesquisa recomenda a formulação de determinação do módulo de elasticidade, segundo Xiao (2006) como a mais recomendável para simulações teóricas de viga T de concreto com 50% de teor de substituição de agregados graúdos e miúdos naturais por agregados reciclados de RCD na capa;
- Para a viga de RCD 100, as curvas teóricas momento versus deflexão no Estádio 1, segundo Xiao e Juan, praticamente coincidem com a experimental, refletindo com fidelidade os resultados experimentais antes do início da fissuração. Já segundo Leite, a curva mostra inclinação menor, explicado pelo menor módulo de elasticidade nesta fase elasto-linear, sendo inferior 21,6% e 18,15%, respectivamente, ao de Xiao e Juan. Segundo todos os autores, a fissuração tem início do processo coincidindo exatamente no mesmo estágio de solicitação, com boa aproximação com o do ensaio experimental, embora situado 6,6 % abaixo deste. Isto se explica pelo fato da vigota da viga ser formada de concreto convencional, o que leva a ser adotado mesma resistência a tração em todas as simulações com RCD 100;
- Quanto ao Momento de Serviço, os resultados mostram que o de Leite é a que mais se aproxima do experimental, ficando acima deste 7,3%. Já o valor segundo a curva de Juan está 12,7%, enquanto a de Xiao, 13,8% acima da experimental. Todas as

curvas teóricas de simulações da viga RCD 100, embora com momento de serviço um pouco acima dos resultados dos ensaios experimentais, possuem boa aproximação, representando bem o limite de estado de serviço;

- Diante da comparação entre curvas teórica e experimental, quanto às rigidezes nos Estádios 1 e 2, início do processo de fissuração e momento de serviço, a presente pesquisa recomenda a formulação de determinação do módulo de elasticidade de todos os autores como recomendável para simulações teóricas de viga T de concreto com 100% de teor de substituição de agregados graúdos e miúdos naturais por agregados reciclados de RCD na capa de concreto;
- As curvas e resultados das simulações teóricas mostraram que o modelo Bi-linear traduziu com realismo os resultados experimentais, pois sua característica de bi-linearidade mostrou a progressiva perda de rigidez da viga ensaiada. Isto ficou comprovado pela análise do comportamento das curvas na fase Elasto-linear, a proximidade dos valores momento de serviço e fissuração obtidos teoricamente, e respectivos estudos de análise regressiva. Desta forma, considera-se que o modelo teórico Bi-linear é adequado para o cálculo de deflexão imediata de vigas de concreto com agregados reciclado de RCD para qualquer teor de substituição;
- A heterogeneidade dos materiais constituintes dos agregados de RCD, junto com a porosidade, são diferenças essenciais que tornam o concreto feito com este material, com complexidade diversa do concreto convencional. Essas diferenças interferem diretamente nas propriedades mecânicas, sendo o módulo de elasticidade o mais afetado negativamente;
- O agregado graúdo de RCD exerce maior influência que os agregados miúdos nas propriedades mecânicas do concreto. Ocorre significativa redução do módulo de elasticidade do concreto quando os agregados graúdos naturais são substituídos por agregados de reciclados de RCD;
- Quanto a influência dos agregados miúdos de RCD nas propriedades mecânicas do concreto, não há ainda um consenso. A divergência dos pesquisadores, quanto a influência dos agregados miúdos na resistência a tração do concreto, faz com que mais pesquisas sejam necessárias;
- A porosidade e teor de absorção do agregado reciclado, que sendo mais elevados afetam a dureza e durabilidade das peças estruturais de concreto, demandam mais pesquisas para o maior conhecimento e controle dessas variáveis;

- No Brasil, cuja codificação existente somente permite a utilização de agregado reciclado em concreto sem fim estrutural, os atuais estudos de diversos pesquisadores já apontam na direção da utilização em elementos estruturais;
- No âmbito internacional, o uso de concreto com agregado reciclado com finalidade estrutural já se encontra, embora com restrições, bastante utilizado e tendo respaldo em legislações e normatização técnica vigentes. Tais restrições, cujas limitações variam conforme a nacionalidade, referem-se especialmente ao tipo e teor de substituição de agregados, as condições ambientais e resistências máximas permitidas para o concreto.

6.2 SUGESTÃO PARA FUTURAS PESQUISAS

Para a continuidade do desenvolvimento de aplicação de agregados de RCD em concreto estrutural, sugere-se que novas pesquisas teóricas e experimentais sejam realizadas, aprofundando principalmente os seguintes temas:

- Fissuração;
- Aderência, considerando barras de aço lisas e nervuradas;
- Compatibilidade entre coeficientes de dilatação térmica do concreto RCD e o aço estrutural;
- Fluência e Retração.

REFERÊNCIAS

ABRECON, 2018. **Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição**. Av. Francisco Matarazzo, 229 – Água Branca São Paulo / SP. Disponível no site do Portal < <http://abrecon.org.br/entulho/>> acesso em 11/10/2018 às 10:14hs.

ÂNGULO E FIGUEIREDO, 2011. **Concreto com agregados reciclados**. Livro Concreto: Ciência e Tecnologia do Instituto Brasileiro do Concreto, Cap. 47. Conteúdo disponibilizado em 10/02/2016. Disponível no endereço eletrônico: <<https://www.researchgate.net/publication/293811678/download>>.

ARAGÃO, H. G., 2007. **Análise estrutural de lajes pré-moldadas produzidas com concreto reciclado de construção e demolição**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Alagoas – UFAL. Maceió, Alagoas.

BOSQUE, I. F., *et al*, 2017. **Properties of interfacial transition zones (ITZs) in concrete containing recycled mixed aggregate**. Artigo. Cement and Concrete Composites V.81, p25-34. Science direct. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article>>

CABRAL, A.E.B., 2007. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. Tese. Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, SP.

CARVALHO, R. C.; FILHO J. R. F, 2007. **Cálculo e detalhamento de estruturas usuais de concreto armado**. Editora da Universidade Federal de São Carlos, 3ª edição, São Carlos, SP.

CEB-FIP MODEL CODE 1990. **Comitê Euro-International du Béton**. Design Code. Lousanne, Switzerland.

CEB 1983. **Manuel du Fissuration et Déformations**. Comité Euro-International du Béton (CEB). École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse.

DUAN, Z. H. AND POON, C. S., 2014. **Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars**. Artigo. Department of Civil and Environmental Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong.

FRASSON, S.A., 2017. **Usinas de Reciclagem de Entulho como Agentes na Valoração dos Resíduos Gerados pela Construção Civil**. Artigo. Anais do XIX ENGEMA - Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e meio Ambiente. São Paulo. SP. Disponível: Site do Portal<<http://engemausp.submissao.com.br/19/anais/>.

FUSCO, P. B., 1981. **Estruturas de concreto. Solicitações Normais**. Editora Guanabara Dois S.A. Rio de Janeiro, RJ.

GONZALEZ AND ETXEBERRIA, 2013 **Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete**. Artigo. Department of Construction Engineering, Polytechnic University of Catalonia, Jordi Girona, Barcelona, Spain

GONÇALVES, P. C. M., 2007. **Betão com agregados reciclados – Análise comentada da legislação existente**. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.

IBRACON, 2005. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações Vol.1** , Editora Isaia. São Paulo SP.

JUAN, M.S., 2004. **Influence of recycled aggregate quality on concrete properties**. Laboratório Central de Estruturas ey Materiales (CEDEX), Spain.

LATTERZA, L. M., 1998. **Concreto com agregado graúdo proveniente da reciclagem de resíduos de construção e demolição: um novo material para fabricação de painéis leves de vedação**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos São Paulo, SP.

LEET, K. M., UANG, C. M., GILBERT, A. M, 2009. **Fundamentos da análise estrutural**. Editora McGraw-Hill Interamericana do Brasil Ltda. 3ª edição. São Paulo, SP.

LEITE, M. B, 2001. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS.

LEONHARDT, F. MÖNNIG, E, 2008. **Construções de concreto. Princípios básicos de dimensionamento de estruturas de concreto. Vol. 1**. Editora Interciência Ltda. Rio de Janeiro, RJ.

LIMA, P.R.L., Fontes, C.M.A., Lima, J.M.F. 2003. **Análise não linear da deflexão de vigas de concreto armado**. Universidade Estadual de Feira de Santana. Feira de Santana, Ba.

LIMA,P.R.; LIMA,M.B.L.; MOURA,W.A.; GONSALVES,J.P.; BORGES,M.G. (2007).. **Comportamento mecânico de concreto com agregado reciclado**. Artigo - 49º Congresso Brasileiro do Concreto. Anais 14p. Bento Gonçalves, RS.

LOVATO, P.S. 2007. **Verificação dos parâmetros de controle de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS.

MEHTA P.K., MONTEIRO P.J.M., 2008. **Concreto Microestrutura, Propriedades e Materiais**. Editora IBRACON - Instituto Brasileiro do Concreto. São Paulo, SP.

McNEIL K, KANG T.H.K. 2013. Recycled Concrete Aggregates: A Review - International Journal of Concrete Structures and Materials

MELO, A. S. V., 2011 **Diretrizes para a produção de agregado reciclado em usinas de reciclagem de resíduos de construção civil**. Dissertação. Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Salvador, Ba.

NORMA BRASILEIRA NBR 6118. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento, ABNT 2014, Brasil.

NORMA BRASILEIRA NBR 5738. Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova, ABNT 2015, Brasil.

NORMA BRASILEIRA NBR 5739. Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos, ABNT 2018, Brasil.

NORMA BRASILEIRA NBR 7480. Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação, ABNT 2007, Brasil.

NORMA BRASILEIRA NBR 7481. Tela de aço soldada - Armadura para concreto, ABNT 1990, Brasil

NORMA BRASILEIRA NBR 8681. Ações e segurança nas estruturas - Procedimento, ABNT 2003, Brasil.

NORMA BRASILEIRA NBR 12655. Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento, ABNT, 2015, Brasil.

NORMA BRASILEIRA NBR 14859-1. Laje pré-fabricada – Requisitos. Parte 1: Lajes unidirecionais, ABNT 2016, Brasil.

NORMA BRASILEIRA NBR 15112. Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação, ABNT 2004, Brasil.

NORMA BRASILEIRA NBR 15113. Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação. ABNT 2004, Brasil.

NORMA BRASILEIRA NBR 15114. **Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação.** ABNT 2004, Brasil.

NORMA BRASILEIRA NBR 15115. **Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos,** ABNT 2004, Brasil.

NORMA BRASILEIRA NBR 15116. **Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos,** ABNT 2004, Brasil.

OLIVEIRA, M. J. E.; ASSIS, C.S, 2006. **Aderência do aço-concreto produzido com agregado reciclado.** Exata, Centro Universitário UNENOVE, São Paulo, SP.

REIS, C. N. S, 2009. **Influência da utilização de agregado miúdo de RCD na aderência aço-concreto reciclado.** Dissertação. Universidade Estadual de Feira de Santana. Feira de Santana, Ba.

RESOLUÇÃO CONAMA 307, 2002. **Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.** Conselho Nacional de Meio Ambiente, Ministério do Meio Ambiente, Brasília, DF.

RILEM, 2004. **International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures.** UPC - Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, Spain.

SATO *et al.*, 2007. **Flexural behavior of reinforced recycled concrete beams.** **Article in Journal** of Advanced Concrete Technology · Nagoya University. Japão.

SELLAKKANNU, N. AND SUBRAMANI, V., 2016. **Study On Properties Of Recycled Aggregate - A Review.** Artigo. **Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR) Vol-2, Issue-3 , 2016 ISSN : 2454-1362,**
<<http://www.onlinejournal.in>

SIDOROVA, A. *et al*, 2014. **Study of the recycled aggregates nature's influence on the aggregate–cement paste interface and ITZ**. Artigo. Construction and Building Materials 68 (2014), p. 677–684. Department of Construction Engineering, Polytechnic University of Catalonia, Barcelona, Spain.

SOBERÓN, 2002. **Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate - An experimental study**. Artigo. Department of Architecture Technology. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain.

SÜSSEKIND, J. C, 1987. **Curso de concreto, Vol. 1**, Editor Globo S.A., 5ª Edição, Rio de Janeiro, RJ.

SZLARDI, R, 1974. **Theory and analysis of plates: Classical and Numerical Methods**. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, 720 pages, New Jersey, Estados Unidos.

TABOADA *et al*, 2016. **Study of recycled concrete aggregate quality and its relationship with recycled concrete compressive strength using database analysis**. Artigo. Materiales de Construcción Vol. 66, Issue 323, July–September 2016, e089. Acesso::<<http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/viewFile/2027/2498>>.

TIMOSHENKO, S. 1979. **Resistência dos materiais. Vol.1**. Livros técnicos e científicos editora S.A. Rio de Janeiro, RJ.

TIMOSHENKO, S. P e KRIEGER, S. W, 1959. **Theory of plates and shells**, 2ª edition, MacGraw-Hill International Editions, United States.

VIEIRA, G. L., 2003. **Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons de cloreto em concreto obtidos de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre - RS.

VIEIRA, G. L.; DAL MOLIN, D. C. C.; LIMA, F. B., 2004. **Resistência e Durabilidade de Concretos Produzidos Com Agregados Reciclados Provenientes de Resíduos de Construção e Demolição**. Revista Engenharia Civil da Universidade do Minho, v. 19, p. 5-18, Portugal.

XIAO, J. Z. e ZHANG, C, 2006. **On relationships between the mechanical properties of recycled aggregate concrete: An overview**. Artigo. RILEM.

XIAO, J. *et al.*, 2012. **An overview of study on recycled aggregate concrete in China**. Article in Journal Construction and Building Materials. China.

WERLE, A. P., 2010. **Determinação de propriedades de concretos com agregados reciclados de concreto, com ênfase na carbonatação**. Dissertação. 162 p. Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, RS.

YEHIA *et al.* 2015. **Strength and Durability Evaluation of Recycled Aggregate Concrete**. Article. International Journal of Concrete Structures and Materials Vol.9, No.2, pp.219–239.

YODA, K. AND SHINTANI, A., 2014. **Building application of recycled aggregate concrete for upper-ground structural elements**. Artigo. Kajima Technical Research Institute, Tokyo, Japan.

ZHOU, C AND CHEN, Z., 2017. **Mechanical properties of recycled concrete made with different types of coarse aggregate**. Artigo. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning, China.