



Iuri D'Oliveira Cabelo Borges

**DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO DE CORPOS DE PROVA
PRISMÁTICOS DE CONCRETO COM FIBRAS DE AÇO E RCD.**

Brasília - DF
2017



Iuri D'Oliveira Cabelo Borges

**DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO DE CORPOS DE PROVA
PRISMÁTICOS DE CONCRETO COM FIBRAS DE AÇO E RCD.**

Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Civil,
apresentado ao Centro Universitário de Brasília
Uniceub como requisito para conclusão da graduação.

Orientador: Prof^a M.e Javier Andres Forero

Brasília - DF
2017

Ficha Catalográfica

D'Oliveira Cabelo Borges, Iuri DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO DE CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS DE CONCRETO COM FIBRAS DE AÇO E RCD / Iuri D Oliveira Cabelo Borges. -- Brasília, 2017. 47 f. : il

Orientador: Javier Andres Forero. TCC (Graduação - Engenharia civil) -- Universidade Federal da Bahia, Centro Universitário de Brasília, 2017.

1. Fibras. 2. Fibras de aço. 3. RCD. 4. RILEM. 5. Testes. I. Andres Forero, Javier. II. Título.

Iuri D'Oliveira Cabelo Borges

**DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO DE CORPOS DE PROVA
PRISMÁTICOS DE CONCRETO COM FIBRAS DE AÇO E RCD.**

Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Civil,
apresentado ao Centro Universitário de Brasília
Uniceub como requisito para conclusão da graduação.

Orientador: Prof^a M.e Javier Andres Forero

BANCA EXAMINADORA:

Nome do examinador: Gabriela Bahia
Titulação: Mestre
Instituição: Uniceub – Centro universitário de Brasília

Nome do examinador: Javier Forero
Titulação: Mestre
Instituição: Uniceub – Centro universitário de Brasília

Nome do examinador: Jocinez Lima
Titulação: Mestre
Instituição: Uniceub – Centro universitário de Brasília

Local: Centro Universitário de Brasília – Uniceub
Data da aprovação: __/__/2017

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus que vem me guiando em todos os meus caminhos e permitindo as minhas conquistas, ao meu pai Helder Borges e minha mãe Ana Claudia Borges.

***“Feliz aquele que transfere o que sabe
e aprende o que ensina”.***

(Cora Coralina)

AGRADECIMENTOS

A todos os professores que fizeram parte da minha formação educacional e acadêmica, que me orientaram, motivaram e fizeram com que eu não perdesse nem desviasse dos meus estudos e objetivos.

Agradeço a toda equipe do Laboratório de Engenharia e Arquitetura do Uniceub, que me auxiliaram e incentivaram em todos os momentos dos ensaios.

Aos amigos professores, Ireni Joffily e Flavio Costa que me incentivaram e forneceram materiais para a realização dos testes.

Agradeço as empresas Areia Bela Vista de Sobradinho, Pecol Materiais para Construção da Vila Planalto, Door-Matec Manutenção e Assistência Técnica da Dormakaba do Guara II, pelos equipamentos e materiais fornecidos.

Quero agradecer aos diretores da empresa em que trabalho Door-Matec Manutenção e Assistência Técnica da Dormakaba, Rinaldo Leite e Migmar de Freitas por permitirem que eu cursasse algumas matérias no período da manhã e cederam alguns dias de trabalho para realização dos testes.

A minha grande amiga e companheira de estudos Natane Sartori, que me incentivou, ajudou e esteve presente no decorrer da minha graduação.

Ao meu colega de trabalho Jaime Barbosa que me incentivou a manter o foco, durante esse curto prazo para realização das pesquisas, principalmente para estudantes com nós, que possuem um trabalho formal de 40h semanais e estudam a noite.

Finalmente, agradeço aquele que mais me desafiou, incentivou, acolheu e me conduziu pelos caminhos das pesquisas, meu professo, amigo e orientador Javier Andres Forero, que transferiu com prazer seu conhecimento e me ajudou a concluir esta pesquisa.

RESUMO

A mecânica da fratura é uma área que permite determinar as características comportamentais do concreto, principalmente seu desempenho quanto a resistência a tração, sendo um fator relevante para o dimensionamento das estruturas. Devido a necessidade em dispor de novas alternativas para o RCD (resíduo da construção e demolição), este trabalho apresentou os resultados de testes de tração por compressão, de acordo com a metodologia do RILEM (International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures) por meio da aplicação de carga em três pontos para cinco traços de concreto com o mesmo fator água cimento, reforçados com fibras de aço e com diferentes porcentagens de RCD, substituídos no agregado miúdo, sendo, 0%, 5%, 10%, 25% e 50%. Ao realizar a betonagem, foi possível identificar a diferença na trabalhabilidade e homogeneidade de cada traço e ao realizar os testes foi possível analisar a energia de fraturamento e o comportamento de cada traço, identificando que o RCD não influencia na energia de fraturamento e sim, a homogeneidade e a disposição das fibras de aço, material responsável pelas transferências de energia e aumento da tenacidade do concreto.

Palavras-chaves: RCD, fibra de aço, RILEM, energia de fraturamento, tenacidade.

ABSTRACT

The fracture mechanics is an area that allows to determine the behavioral characteristics of the concrete, mainly its performance regarding the tensile strength, being a relevant factor for the dimensioning of the structures. Due to the need to have new alternatives for RCD (construction and demolition residue), this work presented the results of compression traction tests, according to the methodology of RILEM (International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures) by applying a three-point load for five traces of concrete with the same water-cement factor, reinforced with steel fibers and with different RCD percentages, substituted in the small aggregate, being 0%, 5%, 10% 25% and 50%. During the concreting, it was possible to identify the difference in the workability and homogeneity of each trait and in the tests it was possible to analyze the fracturing energy and the behavior of each trait, identifying that the RCD does not influence the fracturing energy and yes, the homogeneity and the disposition of the steel fibers, material responsible for the energy transfers and increase of the tenacity of the concrete.

Keywords: RCD, steel fiber, fracturing energy, toughness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Curvas de tensão/ deformação para concreto com e sem fibras. (Fonte: BENTUR & MINDESS – 1990).....	10
Figura 2: Tensões acumuladas em concreto sem adição de fibras (a) e com adição de fibras (b). (Fonte: FIGUEREDO – 2000)	11
Figura 3: Gráficos de tensão/ deformação de materiais elásticos frágeis e elásticos plásticos. (Fonte: BENTUR & MINDESS – 1990).....	12
Figura 4: Exemplos do comportamento da fissura para concreto com (a) e sem (b) compatibilidade de tamanho entre fibras e agregados graúdos (Fonte: Figueiredo – 2000)	13
Figura 5: Classificação da geometria e das classes de fibras de aço (Fonte: Figueiredo – 2008)	14
Figura 6: Sequência de betonagem. (RILEM, 2000)	18
Figura 7: Entalhe do provete. (RILEM, 2000).....	18
Figura 8: Esquema de suporte e aplicação de carga. (RILEM, 2000).....	19
Figura 9: Aplicação do “clip gauge” no entalhe. (RILEM, 2000).....	19
Figura 10: Provete posicionado na máquina de compressão.....	21
Figura 11: Extensômetro posicionado no “clip gauge”	21
Figura 12: Entalhe realizado com a serra de disco para concreto.....	22
Figura 13: Montagem das formas em MDF.....	22
Figura 14: RCD pozolânico coletado.....	23
Figura 15: RCD pozolânico sendo triturado.....	23
Figura 16: Superplastificante Glenium 51.	24
Figura 17: Atuação das fibras Wirand. (Fonte: MACAFERRI do Brasil Ltda – 2008) 25	
Figura 18: Concreto convencional com fibra de aço moldado.....	26
Figura 19: Concreto com 5% de RCD e fibra de aço moldado.....	27
Figura 20: Concreto com 10% de RCD e fibra de aço moldado.....	27
Figura 21: Concreto com 25% de RCD e fibra de aço moldado.....	28
Figura 22: Concreto com 50% de RCD e fibra de aço moldado.....	28
Figura 23: Mistura das fibras de aço no processo de betonagem.....	29

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Relação estabelecida pela NBR 15530/07 para tipos de fibras, fator de forma mínimo e resistência mínima a tração do aço.	15
Quadro 2: Peneiramento do RCD conforme NBR 7181/84.	30
Quadro 3: Peneiramento da areia conforme NBR 7181/84.	31
Quadro 4: Peneiramento da brita conforme NBR 7181/84.	32

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Curva granulométrica do RCD conforme NBR 7181/84.....	30
Gráfico 2: Curva granulométrica da areia conforme NBR 7181/84.	31
Gráfico 3: Curva granulométrica da brita conforme NBR 7181/84.	32
Gráfico 4: (a) Energia de faturamento para o concreto sem RCD, (b) imagem da fratura.....	33
Gráfico 5: (a) Energia de faturamento para o concreto com 5% de RCD, (b) imagem da fratura.....	33
Gráfico 6: (a) Energia de faturamento para o concreto com 10% de RCD, (b) imagem da fratura.....	34
Gráfico 7: (a) Energia de faturamento para o concreto com 25% de RCD, (b) imagem da fratura.....	34
Gráfico 8: (a) Energia de faturamento para o concreto com 50% de RCD, (b) imagem da fratura.....	35

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	8
1.1.	OBJETIVO.....	9
1.2.	OBJETIVO ESPECÍFICO	9
1.3.	JUSTIFICATIVA	9
2.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	10
2.1.	FIBRAS	10
2.2.	FIBRAS DE AÇO.....	13
2.3.	CONCRETO COM RCD (RESÍDUO DA CONTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO)	16
2.4.	ENSAIO DE FLEXÃO POR COMPRESSÃO PELA METODOLOGIA DO RILEM	17
3.	METODOLOGIA.....	20
3.1.	RESULTADOS	29
4.	CONCLUSÃO.....	35
5.	BIBLIOGRAFIA.....	37

1. INTRODUÇÃO

Há alguns anos quando se falavam em projetos de construção civil, os tópicos mais importantes e comentados pelas partes interessadas eram: qual a necessidade de executar o empreendimento, tempo necessário para execução, o custo e a segurança. Era sabido que qualquer tipo de construção afetava diretamente o meio ambiente, porém o crescimento acelerado da sociedade e a agressão que os empreendimentos traziam, originou a necessidade de priorizar o fator ecológico.

O apelo ecológico como valor agregado do empreendimento ganha cada vez mais importância no que tange à vida útil da edificação, não somente em relação ao patrimônio em si, mas principalmente em relação à qualidade de vida que essa edificação proporcionará aos seus usuários. (MUNIN, 2014, *on-line*).

Conforme essa necessidade os órgãos reguladores vêm desenvolvendo incentivos e selos de qualidade para os projetos que possuam itens oriundos de recursos renováveis e biodegradáveis. Conseqüentemente, enxergando essa necessidade, as indústrias começaram a desenvolver diversos produtos que proporcionam a preservação do meio ambiente, o que permite a engenharia mantenha a qualidade de seus projetos e preserve ao máximo a natureza e seus recursos não renováveis, podendo assim resguardar as gerações futuras.

De maneira geral hoje já podemos afirmar que a indústria possui tecnologia suficiente para oferecer ao mercado produtos de baixa agressão ao meio ambiente com garantia de estanqueidade e durabilidade, colaborando de forma eficaz para a sustentabilidade da edificação, desde que haja um projeto previamente estudado que seja adequado à necessidade específica a qual estará sujeita a edificação. (MUNIN, 2014, *on-line*).

De acordo com esse pensamento pretende-se realizar ensaios de traços de concreto contendo fibras de aço e diferentes porcentagens de resíduos de obra (RCD). Mais que uma responsabilidade socioambiental, a inserção da sustentabilidade é pré-requisito básico à engenharia moderna e condição sem a qual o próprio conceito de modernidade se desfaz.

1.1. OBJETIVO

O objetivo geral da pesquisa é realizar ensaios de flexão por compressão em corpos de prova prismáticos com traços de concreto contendo fibras de aço e resíduos de tijolos e compará-los com o traço convencional de concreto (cimento, areia e brita).

1.2. OBJETIVO ESPECÍFICO

A pesquisa realizada visa demonstrar qual a resistência a 28 dias à tração na compressão de corpos de prova prismáticos com quatro tipos de traço de concreto, contendo 1% de fibras e aço e com quatro tipos de porcentagens de resíduo de tijolo, 5%, 10%, 25% e 50% e compara-lo com o traço convencional de concreto 1: 2: 3 (cimento, areia e brita) também com fibra de aço.

1.3. JUSTIFICATIVA

Com a limitação dos recursos naturais, a carência de preservação do meio ambiente e o grande volume de resíduos gerados pela construção civil adveio a necessidade do controle dos recursos e dos resíduos. Através deste, a pesquisa proposta visa determinar um parâmetro comportamental de resistência a tração dos traços de concreto com resíduos de obra e fibra de aço, para que, caso os dados provem ser favoráveis, proporcionem estudos futuros, pois, além de diminuir o custo do concreto irá dispor de um novo destino para o grande volume de resíduos das construções depositados no meio ambiente.

2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

2.1.FIBRAS

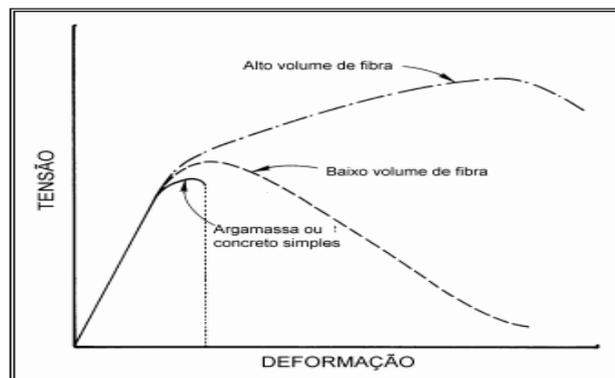
O concreto convencional não resiste bem à tração, sendo essa resistência cerca de 8% a 15% da sua resistência a compressão. Devido a esse motivo, usualmente não se considera a contribuição dessa resistência nas peças. Entretanto, a resistência à tração está diretamente relacionada com a capacidade de resistir as forças cortantes e ao aparecimento de fissuras nas estruturas.

Com o objetivo de aumentar a resistência à tração e diminuir o tempo de manifestação das fissuras, os cientistas vêm pesquisando e desenvolvendo novas técnicas e materiais que atinjam essas metas. Atualmente o mais usual é a adição de fibras no traço do concreto, pois, as fibras permitem o aumento da resistência à tração e a ductilidade do concreto.

As fibras são materiais descontínuos com o comprimento muito maior que a seção transversal, podendo ser de diversos materiais como: aço, polipropileno, vidro, náilon, carbono, sisal, madeira, entre outros.

Segundo ACI 544.1R (1986), a energia total absorvida por uma viga de concreto com fibras é cerca de 10 a 40 vezes maior que o concreto simples, corroborando para o aumentando da resistência de ruptura do concreto conforme Figura 1.

Figura 1: Curvas de tensão/ deformação para concreto com e sem fibras. (Fonte: BENTUR & MINDESS – 1990)

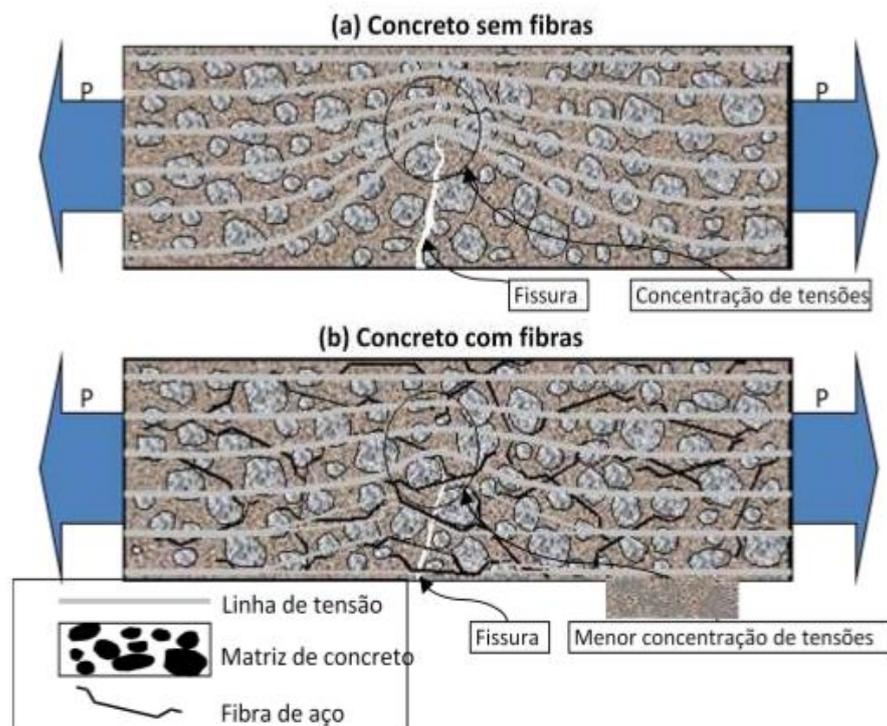


De acordo com Metha e Monteiro (2008), a pequena capacidade de resistência à flexão do concreto está relacionada com a dificuldade do material em interromper a propagação das fissuras quando submetido à flexão, esse fenômeno ocorre porque a direção de propagação das fissuras segue transversal a direção principal de tensão.

Conforme surge cada fissura, a área de atuação vai diminuindo e as tensões nas extremidades vão aumentando. Esse comprometimento é maior quando submetido a flexão, ou seja, a fissuração na flexão ocorre por um acúmulo de micro fissuras, diferentemente de quando submetido a compressão, ocorrendo por numerosas fissuras.

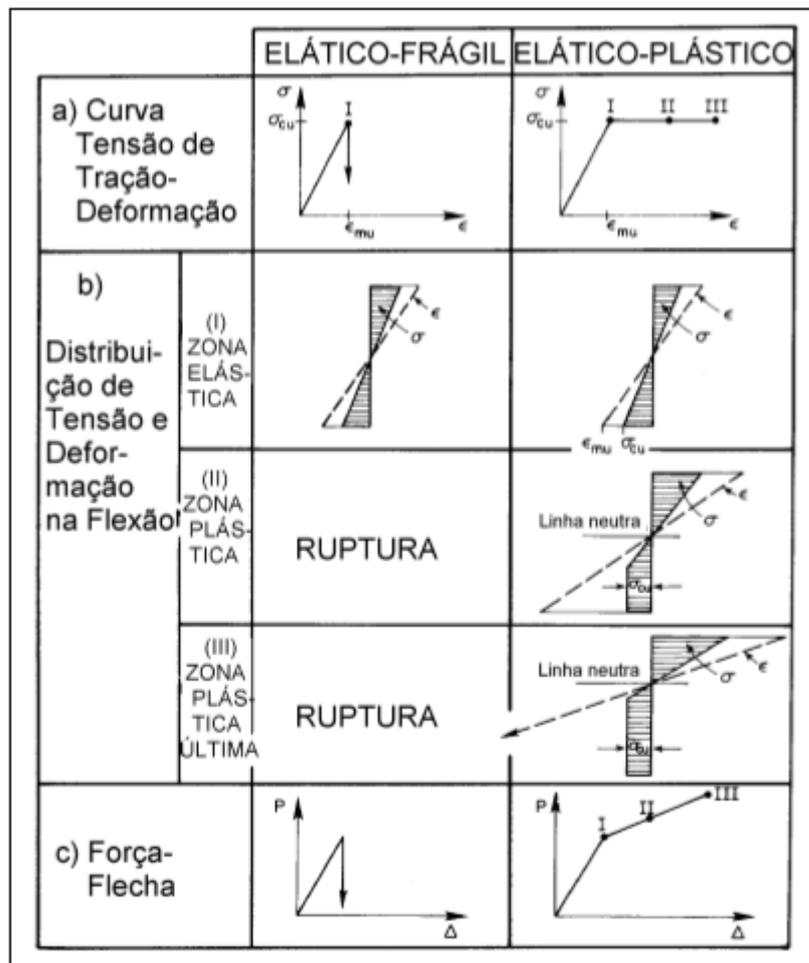
As fibras atuam realizando uma ponte de transferência de energia e esse fenômeno é possível porque quando a superfície de ruptura é menor, o gasto energético acaba sendo proporcionalmente menor, o que permite a transferência da energia pelas fibras (Figura 2).

Figura 2: Tensões acumuladas em concreto sem adição de fibras (a) e com adição de fibras (b). (Fonte: FIGUEREDO – 2000)



Conforme os ensaios realizados por Bentur & Mindess (1990), as distribuições das tensões a flexão é diretamente relacionada com o aumento da resistência a ruptura proporcionado pelas fibras. Sendo elas um material elástico plástico, ou seja, possuem a capacidade de retornar a forma original após certa deformação, esse material permite o aumento da resistência à flexão do concreto, que porventura é um material elástico frágil, que sofrem ruptura após certo aumento da deformação, conforme a Figura 3.

Figura 3: Gráficos de tensão/ deformação de materiais elásticos frágeis e elásticos plásticos. (Fonte: BENTUR & MINDESS – 1990)

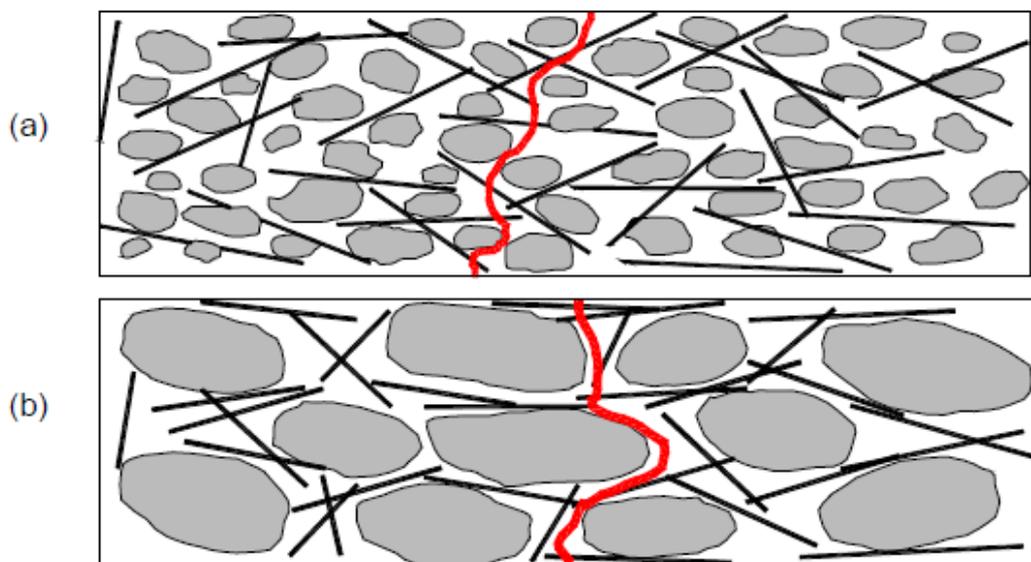


Quanto maior for a dimensão dos agregados, maior será a interferência na relação fibra e agregado, o que compromete o efeito de transferência de energia das fibras. Para que obtenha a transferência de energia prevista, deve haver uma relação entre o comprimento das fibras e o tamanho dos agregados, pois as fissuras

se propagam na região de interface entre o agregado graúdo e a pasta. (Figueiredo, 2000).

Concluíram Aguado e Laranjeira (2007), que o comprimento das fibras devem ser duas vezes a dimensão máxima do agregado graúdo, para que assim elas possam atuar como ponte de transferência de tensões nas fissuras (Figura 4).

Figura 4: Exemplos do comportamento da fissura para concreto com (a) e sem (b) compatibilidade de tamanho entre fibras e agregados graúdos (Fonte: Figueiredo – 2000)



2.2. FIBRAS DE AÇO

O Brasil desenvolveu a norma ABNT NBR 15530/07 – “Fibras de aço para concreto – Especificação” onde estabelece os parâmetros para classificação das fibras de aço de baixo teor de carbono, definindo os requisitos mínimos em relação a dimensão, resistência a tração e dobramento, de forma a garantir um comportamento mínimo para o concreto reforçado com fibras, pois é muito difícil garantir um desempenho fixo, uma vez que o mesmo depende da relação entre matriz e fibra (Figueiredo, 2000).

São previsto pela norma a classificação de três tipos de fibras em função da geometria:

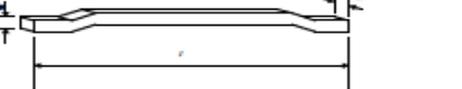
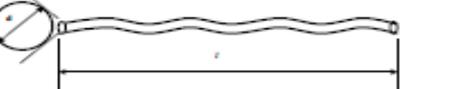
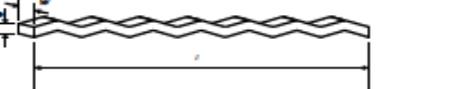
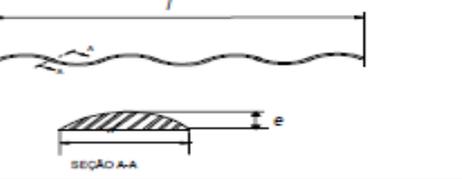
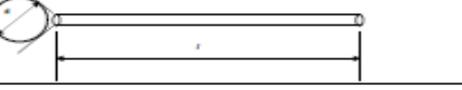
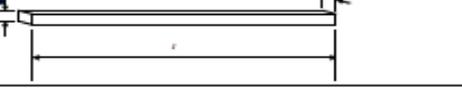
- Tipo A: fibra de aço com ancoragem nas extremidades;
- Tipo B: fibra de aço corrugada;
- Tipo C: fibra de aço reta.

Além de classificar quanto a sua geometria, a norma também estabelece três classes quanto ao tipo de aço utilizado na fabricação das fibras, sendo:

- Classe I: fibra oriunda de arame trefilado a frio;
- Classe II: fibra oriunda de chapa laminada cortada a frio;
- Classe III: fibra oriunda de arame trefilado e escarificado.

A relação entre essas classificações pode ser observada conforme a Figura 5.

Figura 5: Classificação da geometria e das classes de fibras de aço (Fonte: Figueiredo – 2008)

Tipo	Classe da fibra	Geometria
A	I	
	II	
C	I	
	II	
	III	
R	I	
	II	

Quando foi elaborada a classificação pela norma, foram utilizados os tipos de fibras mais usuais no mercado e não todas disponíveis, o que possibilitou determinar os requisitos mínimos para atingir o comportamento desejado entre matriz e fibras (Figueiredo, 2008).

As fibras de aço melhoram o desempenho e o comportamento do concreto, podendo ser utilizadas como armadura secundária e reforço da armadura principal. De acordo com ACI 544 .3R (1998), o aumento da tenacidade proporciona maior resistência contra, impactos, fadiga, retração, variação de temperatura e explosão. Essas propriedades estão relacionadas de acordo com o tipo de fibra e quantidade utilizada, por isso é primordial que sejam realizados ensaios com corpos de prova previamente a execução *in loco* a fim de comprovar se a relação entre os agregados e as fibras irão proporcionar as propriedades estabelecidas no projeto.

Segundo Figueiredo (1997), a tenacidade está relacionada com a capacidade de resistência a tração do aço e com o fator de forma da fibra, quanto maior for o fator de forma, maior será a tenacidade medida. De acordo com a norma o fator de forma é medido pela relação entre o comprimento e o diâmetro equivalente (área da seção transversal) da fibra, que, por esse motivo, acaba estabelecendo limites para essas características.

A fim de manter o comportamento mínimo a norma ABNT NBR 15530/07 estabeleceu relações entre os tipos de fibras, fator de forma e limites de resistência a tração conforme Quadro 1.

Quadro 1: Relação estabelecida pela ABNT NBR 15530/07 para tipos de fibras, fator de forma mínimo e resistência mínima a tração do aço.

FIBRA	FATOR DE FORMA MINIMO λ	LIMITE DE RESISTENCIA A TRAÇÃO DO AÇO Mpa (*)
A I	40	1000
A II	30	500
C I	40	800
C II	30	500
C III	30	800
R I	40	1000
R II	30	500

* esses valores devem ser obtidos imediatamente após o corte

2.3. CONCRETO COM RCD (RESÍDUO DA CONTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO)

De acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil de 2014 da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe), foram gerados cerca de 78,6 milhões de toneladas de resíduos sólidos, onde 29,6 milhões de toneladas foram despejados em lixões a céu aberto e aterros controlados, locais inadequados, que provocam risco a saúde e ao meio ambiente. Segundo a Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição – Abrecon (2014), cerca de 60% do resíduo sólido gerado vêm da construção e 70% desse total de material poderia ser reutilizado. A indústria da construção possui certo receio quanto à qualidade do material a ser reaproveitada, entretanto, a Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS implementada vêm interferindo positivamente quanto à segurança e qualidade na reutilização dos resíduos através de diretrizes aplicáveis aos resíduos sólidos.

A Resolução do Conselho Ambiental do Meio Ambiente (CONAMA, 2002), nº 307, determina a classificação, os critérios e procedimentos para a gestão dos RCDs, enquadrando os resíduos do bloco cerâmico desta pesquisa na Classe A que são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, como de construção, demolição, reformas e reparos de edificações, entre eles componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento, etc.), argamassa e concreto.

De acordo com Mehta e Aitcin (1990), a adição de RCD de pozolânicas, no concreto podem aumentar diversas vantagens técnicas no traço do concreto e que todo concreto deveria possuir essas adições a manes que seja comprovado a ineficácia por razões especiais.

A presença de partículas finas das adições minerais, principalmente as pozolânicas, resulta em melhorias nas propriedades do concreto fresco, como a coesão e estabilidade; as 28 partículas das adições minerais são geralmente capazes de reduzir a exudação e a segregação, que vêm a ser as primeiras causas da heterogeneidade nos concretos, especialmente na zona de interface pasta/agregado, elas permitem um maior grau de controle sobre o abatimento, pois geralmente as adições aumentam o tempo de pega e reduzem a taxa de perda de abatimento no concreto fresco. (Mehta e Aitcin, 1990).

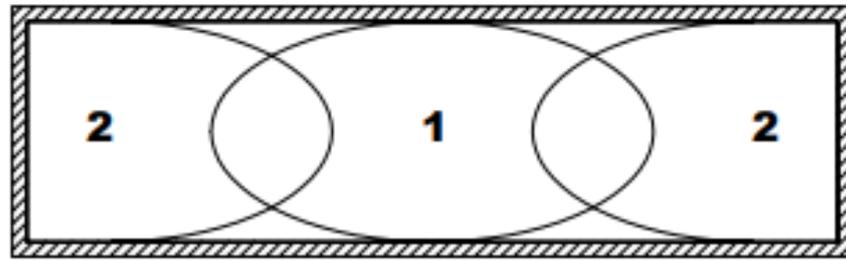
Para VIEIRA (2004), os resíduos quando utilizados de maneira controlada e previamente ensaiadas em laboratórios, podem não só reduzir o custo do concreto, como, também não afetam a resistência e durabilidade em relação à corrosão da armadura. A utilização do resíduo de pozolânica pode melhorar as propriedades mecânicas do concreto, uma vez que a porosidade desses RCD é maior que a do agregado natural, influenciando diretamente na massa específica e na capacidade de absorção de água. De acordo com os resultados obtidos por MINERVA (2007), o concreto produzido com RCD possui uma resistência inferior ao produzido com agregados naturais. Quando substituídos nos agregados grão e miúdo acaba provocando um decréscimo na resistência a compressão, exceto para os resíduos de cerâmica vermelha, que quando substituídos no agregado miúdo age de maneira positiva sobre a resistência a compressão.

2.4. ENSAIO DE FLEXÃO POR COMPRESSÃO PELA METODOLOGIA DO RILEM

O ensaio pelo método de RILEM (International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures), caracteriza o comportamento de Betão Reforçado com Fibras de Aço (BRFA) submetidos a flexão, em que por meio da relação força-flecha obtida pode-se avaliar o limite de proporcionalidade (LOP); ou seja, o momento em que a relação força flecha deixa de ser linear de forma a possibilitar a determinação do comportamento do material, traça a relação entre abertura de fenda (CMOD – Crack Mouth Opening Displacement) e a flecha, assim como a relação entre tensão e abertura de fenda (Barros, 2000. Barros, 2001).

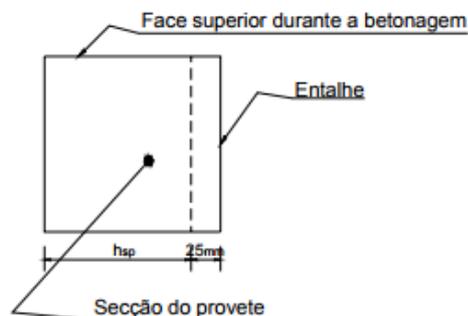
Essa metodologia orienta a utilização de corpos de prova com dimensões de 500 mm de comprimento, 150 mm de altura e 150 mm de profundidade e que o comprimento das fibras de aço para essas dimensões de provete não deve ultrapassar 60 mm e a dimensão máxima dos inertes não podem ser inferior a 32 mm. O preenchimento do provete com concreto deve seguir a sequência conforme a Figura 6, de forma que a região um seja o dobro da região dois e deve ser seguida de compactação por vibração externa para melhor disposição das fibras.

Figura 6: Sequência de betonagem. (RILEM, 2000)



Os provetes devem ser desmoldados no intervalo de 24 a 48 horas após a moldagem e mantidos a $+20^{\circ}\text{C}$ e hidratação $\text{H.R.} \geq 95\%$ até a preparação do ensaio. Antes de realizar os testes deve-se a meio vão da viga em uma de suas faces laterais, realizar um entalhe com 2 a 3 mm de largura e 25 mm de profundidade através de um disco de corte apropriado para que as fissuras se concentrem no meio do corpo de prova (Figura 7).

Figura 7: Entalhe do provete. (RILEM, 2000)



Para a execução do teste, o provete deve estar sobre uma base com dois apoios com 3 graus de liberdade e no centro sobre a face superior do provete, deve ser colocada uma barra que transferirá a carga pontual aplicada (Figura 8). Para melhor leitura do transdutor, pode-se colocar um “clip gauge” no entalhe, a fim de estimar a abertura da fenda e garantir melhor confiabilidade da leitura (Figura 9).

Figura 8: Esquema de suporte e aplicação de carga. (RILEM, 2000)

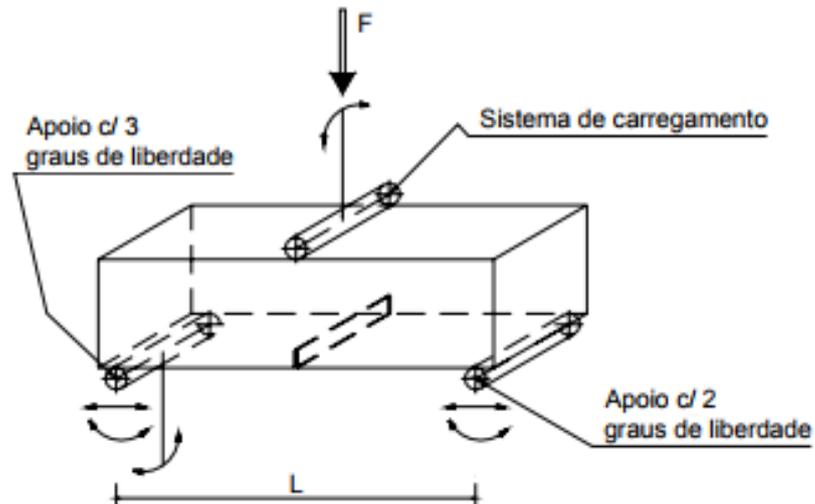
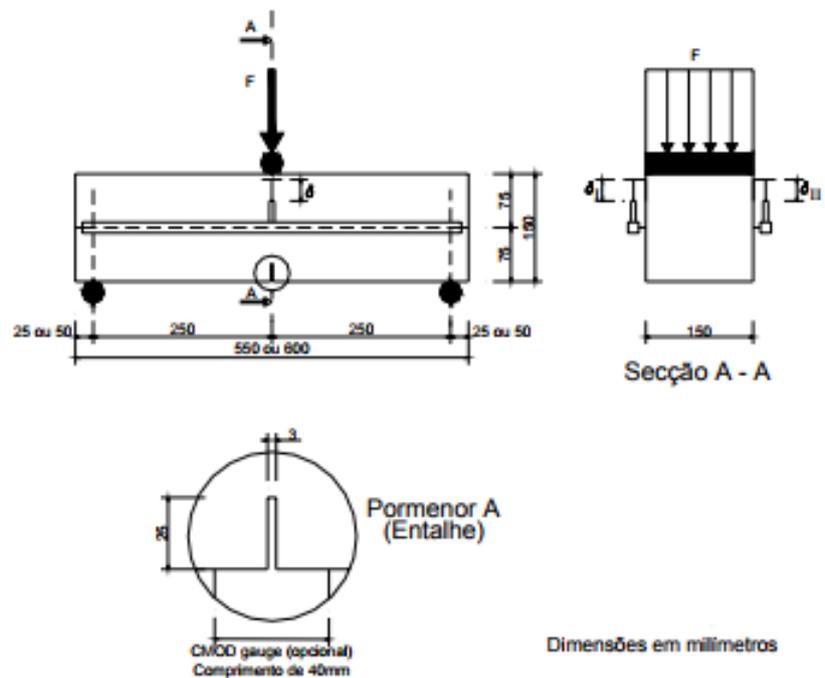


Figura 9: Aplicação do “clip gauge” no entalhe. (RILEM, 2000)



O ensaio de flexão deve ser realizado em no mínimo 03 provetes e com uma velocidade de deformação de 0,2 mm/min em que a deformação é a média dos dois transdutores posicionados em cada face paralela.

3. METODOLOGIA

Com base na necessidade em preservar o meio ambiente e as fontes não renováveis, é importante o descobrimento de novos destinos para os resíduos da construção e demolição, que são responsáveis por grande parte das toneladas geradas anualmente. Por esse motivo, foi testado qual o comportamento na flexão do concreto composto por resíduos de cerâmica vermelha e reforçados com fibras de aço.

O ensaio de flexão foi realizado no Laboratório de Engenharia e Arquitetura do Centro Universitário de Brasília – CEUB e foi baseado na metodologia de RILEM para concreto reforçado com fibras de aço (BRFA).

Para realização do ensaio de flexão foi utilizada a máquina de compressão da EMIC modelo PCE100C com base composta por dois apoios com 2 graus de liberdade, para transferência da energia da carga aplicada colocou-se uma barra de aço CA50 de 8 mm de diâmetro no centro do provete (Figura 10) e para que houvesse a concentração das fissuras no centro do corpo de prova, foi realizado um entalhe com uma serra de disco para concreto (Figura 12).

A leitura da abertura das fissuras foi realizada através de um extensômetro modelo Digimess 121-301 fixado por uma base magnética da ZAAS Precision com 600N de força de atração, o que assegurou a qualidade da leitura do relógio posicionado sobre um “clip gauge” de chapa metálica a 90° na direção do entalhe do provete (Figura 11).

Figura 10: Provete posicionado na máquina de compressão.



Figura 11: Extensômetro posicionado no “clip gauge”.



Figura 12: Entalhe realizado com a serra de disco para concreto.



Os provetes foram moldados em formas de MDF (Figura 13) em dimensões de 500 mm de comprimento, 135 mm de altura e 135 mm de profundidade, foi respeitada a sequência de concretagem e vibração proposta por RILEM.

Figura 13: Montagem das formas em MDF.



O RCD pozolânico foi coletado em uma caçamba (Figura 14) e triturado três vezes no britador de mandíbula pequeno cedido pela empresa Areia Belo Vista localizada em Sobradinho, Brasília/ DF (Figura 15). O material triturado foi ensaiado conforme a ABNT NBR 7217/87 – Determinação da composição granulométrica (Gráfico 1, Tabela 2) assim como a areia media lavada (Gráfico 2, Tabela 3) e a brita nº1 (Gráfico 3, Tabela 4) e concluiu-se que a curva granulométrica do RCD estava mais próxima da areia do que da brita, por esse motivo as porcentagens de resíduos inseridos no concreto foram subtraídas da quantidade de areia, utilizada no traço padrão (cimento, areia, brita, fibra de aço e água).

Figura 14: RCD pozolânico coletado.



Figura 15: RCD pozolânico sendo triturado.



Conforme orientações da ABNT NBR 15116/04 – Agregados Reciclados de Resíduos Sólidos da Construção Civil, a utilização de RCD no concreto influencia no fator água cimento, pois a massa específica do RCD é menor que a do agregado natural, por esse motivo, foi utilizada uma dosagem de 0,65% de superplastificante Glenium 51 (Figura 16) que melhora a trabalhabilidade do concreto para baixos fatores água-cimento.

Figura 16: Superplastificante Glenium 51.



A fibra de aço adotada é da MACAFERRI modelo Wirand (Quadro 2), que são produzidas a partir de fios de aço de baixo teor de carbono, que ao serem adicionadas no concreto atuam como uma armadura tridimensional, restringindo a propagação de fissuras e aumenta a resistência pós-fissuração do concreto (Figura 17). A Wirand FF4 foi escolhida, pois possui o maior fator de forma o que consequentemente melhora a tenacidade do concreto (Figueiredo, 2000).

Quadro 2: Características da fibra de aço Wirand FF4.

FIBRAS DE AÇO WIRAND FF4 DA MACAFERRI	
PROPRIEDADES FÍSICAS	
Relação L/d (comprimento/ diâmetro) fator de forma	80
Tolerância do valor individual da relação L/ d	15%
Tolerância do valor médio da relação L/ d	7,50%
Diâmetro	0,75 mm
Tolerância do valor individual do diâmetro	10%
Tolerância do valor médio do diâmetro	5%
Comprimento	60 mm
Tolerância do valor individual do comprimento	5%
Tolerância do valor médio do comprimento	5%
PROPRIEDADES MECÂNICAS	
Resistência à tração do aço	> 1100 MPa
Deformação na ruptura	< 4%
Módulo elástico	210000 Mpa



Figura 17: Atuação das fibras Wirand. (Fonte: MACAFERRI do Brasil Ltda – 2008)



Para realização dos testes foram realizado 5 tipos de traço de concreto todos com o mesmo fator água cimento de 0,4 e porcentagem de fibras de aço. Para os traços com RCD, o resíduo adicionado foi subtraído da quantidade de areia e para melhorar a trabalhabilidade sem alterar o fator água cimento foi adicionado superplastificante. Foi gerado três provetes para todos os tipos de traço, sendo eles:

- Cimento + areia+ 0% RCD + brita + água + fibra de aço (Figura 18);
- Cimento + areia+ 5% RCD + brita + água + 1% fibra de aço + 0,65% superplastificante (Figura 19);
- Cimento + areia+ 10% RCD + brita + água + 1% fibra de aço + 0,65% superplastificante (Figura 20);
- Cimento + areia+ 25% RCD + brita + água + 1% fibra de aço+ 0,65% superplastificante (Figura 21);
- Cimento + areia+ 50% RCD + brita + água + 1% fibra de aço+ 0,65% superplastificante (Figura 22).

Durante o processo de betonagem e moldagem dos corpos de prova, foi possível observar a diferença na trabalhabilidade e na homogeneidade dos traços. Ao manter a mesma quantidade de superplastificante, foi possível obter algumas conclusões sobre a influência das porcentagens de RCD no concreto, os traços com 5% e 10% obtiveram uma trabalhabilidade e homogeneidade muito boa (Figura 19 e Figura 20), já o traço de 25% obteve uma trabalhabilidade e homogeneidade parecida com a do traço de 0% sem adição de superplastificante (Figura 18 e Figura 21) e o traço de 50% mesmo com o aditivo não foi possível obter boa trabalhabilidade e homogeneidade no concreto (Figura 22), dificultando a betonagem e a moldagem do corpo de prova.

Figura 18: Concreto convencional com fibra de aço moldado.



Figura 19: Concreto com 5% de RCD e fibra de aço moldado.



Figura 20: Concreto com 10% de RCD e fibra de aço moldado.



Figura 21: Concreto com 25% de RCD e fibra de aço moldado.



Figura 22: Concreto com 50% de RCD e fibra de aço moldado.



Para a realização da betonagem, foram respeitadas as instruções dos fabricantes, o superplastificante foi diluído na água e as fibras de aço foram misturadas em duas fases para que fosse mantida a melhor distribuição no concreto, a primeira junto com o agregado miúdo e a segunda junto ao agregado graúdo e a água com o superplastificante foi adicionada aos poucos após a mistura de todos os agregados (Figura 23).

Figura 23: Mistura das fibras de aço no processo de betonagem.



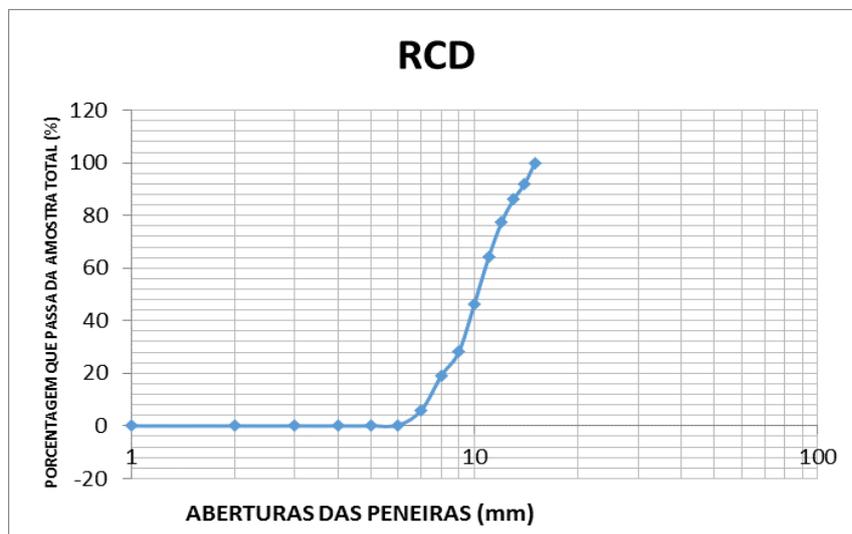
3.1.RESULTADOS

Foi realizado o ensaio granulométrico conforme ABNT NBR 7181/84 para todos os agregados, o que determinou a substituição do RCD em parte do agregado miúdo, pois a granulometria ficou bem parecida (Gráfico 1, Gráfico 2 e Gráfico 3). Para atingir essa granulometria do RCD o material foi triturado três vezes pelo britador de mandíbula pequeno.

Quadro 3: Peneiramento do RCD conforme NBR 7181/84.

RCD		MASSA TOTAL DA AMOSTRA (g):			499,06
PENEIRAS		MASSA	RETIDO	ACUMULADO	
Nº	mm	g	%	%	
2"	50	0	0	0	
1.1/2"	38	0	0	0	
1.1/4"	32	0	0	0	
1"	25	0	0	0	
3/4"	19	0	0	0	
1/2"	12,5	3,1	0,31	0,31	
3/8"	9,5	56,2	5,63	5,94	
1/4"	6,3	130,5	13,07	19,01	
4	4,8	90,4	9,05	28,06	
8	2,4	183,1	18,34	46,4	
16	1,2	177	17,73	64,13	
30	0,6	133,60	13,38	77,51	
50	0,3	85,20	8,55	86,06	
100	0,15	60,20	6,05	92,11	
FUNDO	FUNDO	78,70	7,89	100	
MODULO DE FINURA (%):		DIMENSÃO MÁXIMA (mm):			
4,00		12,5			

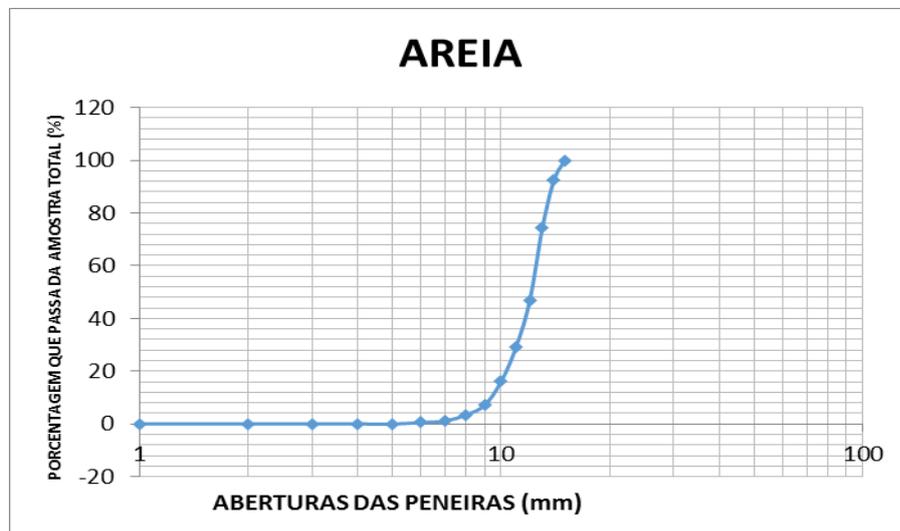
Gráfico 1: Curva granulométrica do RCD conforme NBR 7181/84.



Quadro 4: Peneiramento da areia conforme NBR 7181/84.

AREIA	MASSA TOTAL DA AMOSTRA (g):			499,06
PENEIRAS		MASSA	RETIDO	ACUMULADO
Nº	mm	g	%	%
2"	50	0	0	0
1.1/2"	38	0	0	0
1.1/4"	32	0	0	0
1"	25	0	0	0
3/4"	19	0	0	0
1/2"	12,5	2,78	0,55	0,55
3/8"	9,5	2,86	0,57	1,12
1/4"	6,3	11,59	2,32	3,44
4	4,8	18,38	3,68	7,12
8	2,4	44,77	8,97	16,09
16	1,2	65,64	13,15	29,24
30	0,6	88,34	17,70	46,94
50	0,3	137,33	27,51	74,45
100	0,15	90,27	18,08	92,53
FUNDO	FUNDO	37,10	7,47	100,00
MODULO DE FINURA (%):		DIMENSÃO MÁXIMA (mm):		
2,87		6,3		

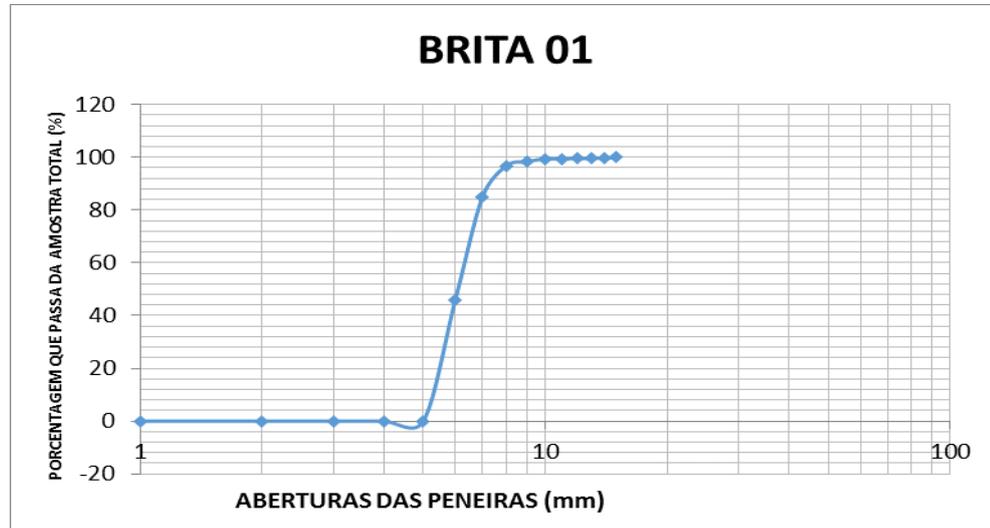
Gráfico 2: Curva granulométrica da areia conforme NBR 7181/84.



Quadro 5: Peneiramento da brita conforme NBR 7181/84.

BRITA 01		MASSA TOTAL DA AMOSTRA (g):			2993,94
PENEIRAS		MASSA	RETIDO	ACUMULADO	
Nº	mm	g	%	%	
2"	50	0	0	0	
1.1/2"	38	0	0	0	
1.1/4"	32	0	0	0	
1"	25	0	0	0	
3/4"	19	0	0	0	
1/2"	12,5	1377,84	46,06	46,06	
3/8"	9,5	1166,05	38,94	85,00	
1/4"	6,3	350,65	11,71	96,71	
4	4,8	49,41	1,65	98,36	
8	2,4	30,48	1,01	99,37	
16	1,2	2,60	0,08	99,45	
30	0,6	0,96	0,03	99,48	
50	0,3	1,64	0,05	99,53	
100	0,15	6,16	0,20	99,73	
FUNDO	FUNDO	8,15	0,27	100,00	
MODULO DE FINURA (%):		DIMENSÃO MÁXIMA (mm):			
6,80		19			

Gráfico 3: Curva granulométrica da brita conforme NBR 7181/84.



Para a realização dos testes, foram registrados a partir de 2kN e com acréscimo de 2kN as aberturas da fissuras conforme aplicação da força e com esses dados foi possível gerar os gráficos com a relação Força x CMOD (crack mouth opening displacement) para cada traço (Gráfico 4, Gráfico 5, Gráfico 6, Gráfico 7 e Gráfico 8).

Gráfico 4: (a) Energia de faturamento para o concreto sem RCD, (b) imagem da fratura.

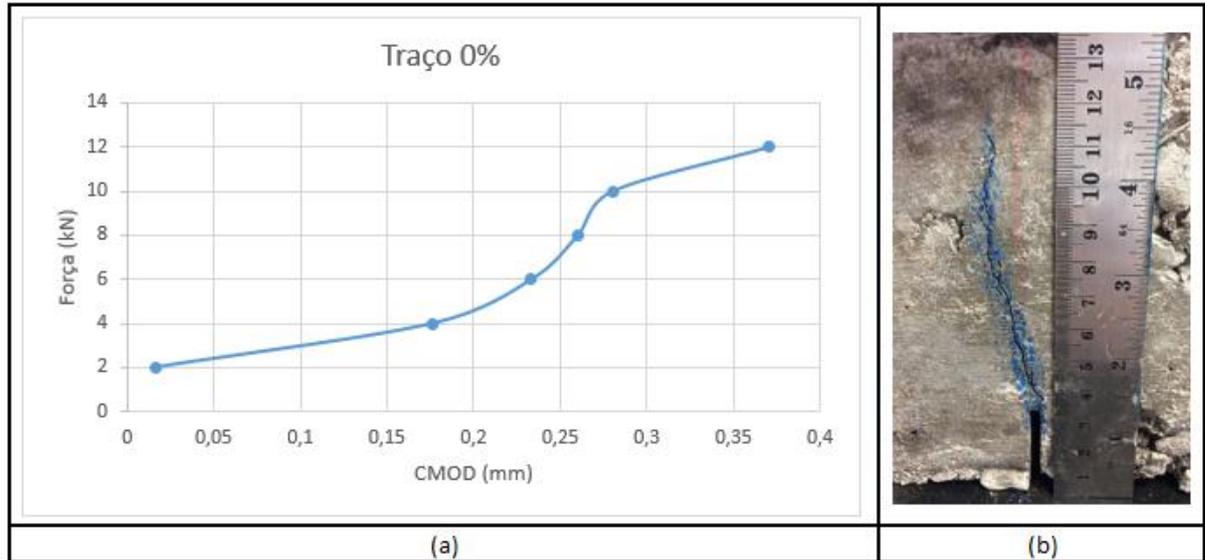


Gráfico 5: (a) Energia de faturamento para o concreto com 5% de RCD, (b) imagem da fratura.

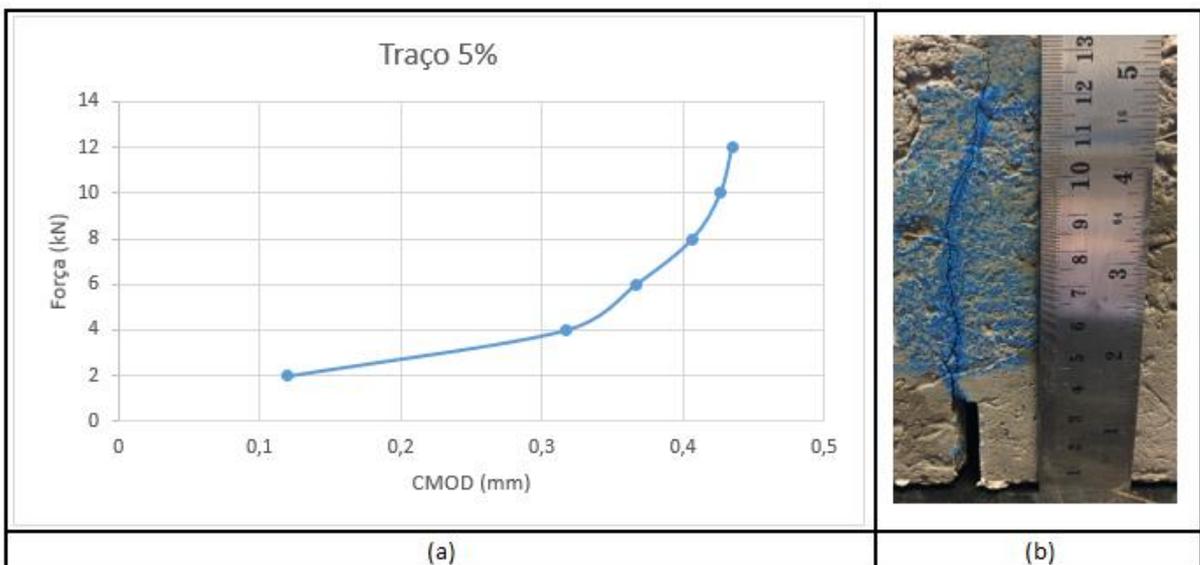


Gráfico 6: (a) Energia de faturamento para o concreto com 10% de RCD, (b) imagem da fratura.

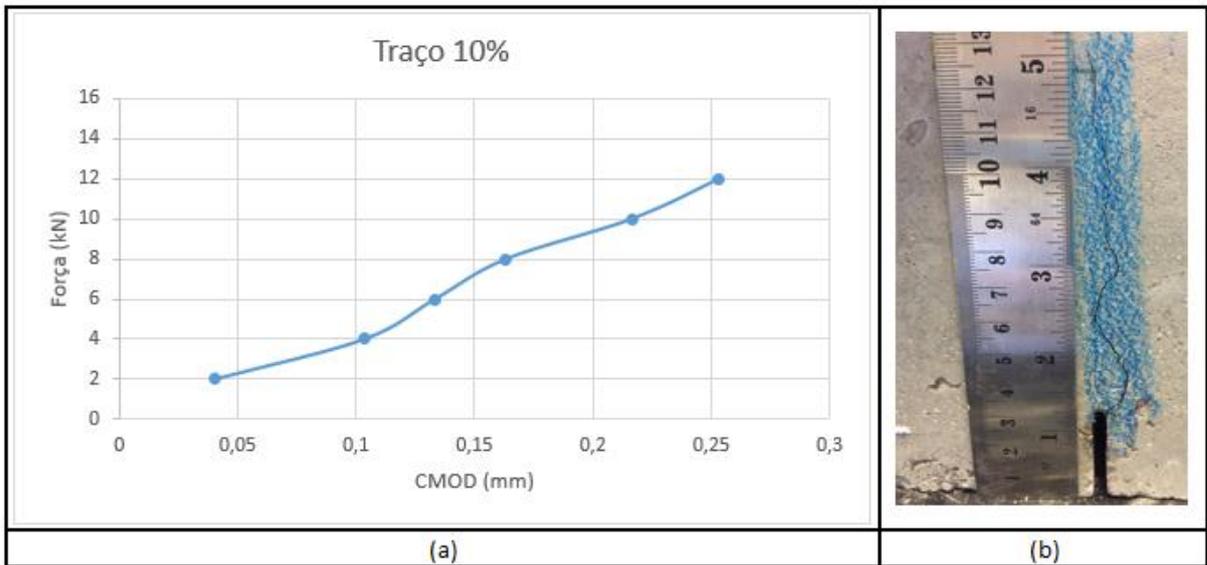


Gráfico 7: (a) Energia de faturamento para o concreto com 25% de RCD, (b) imagem da fratura.

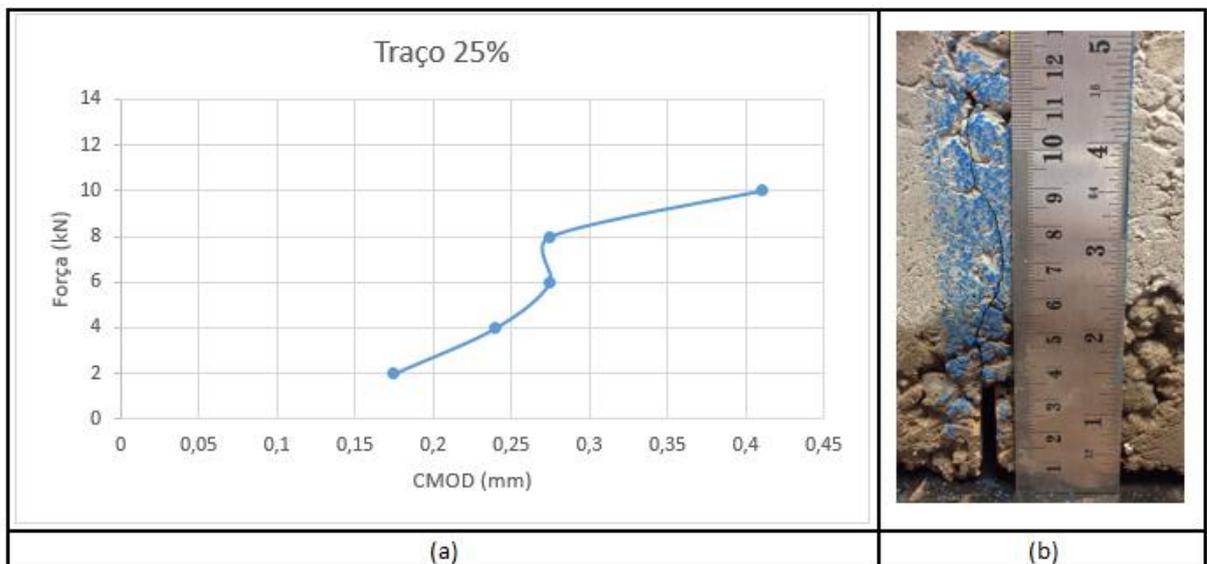
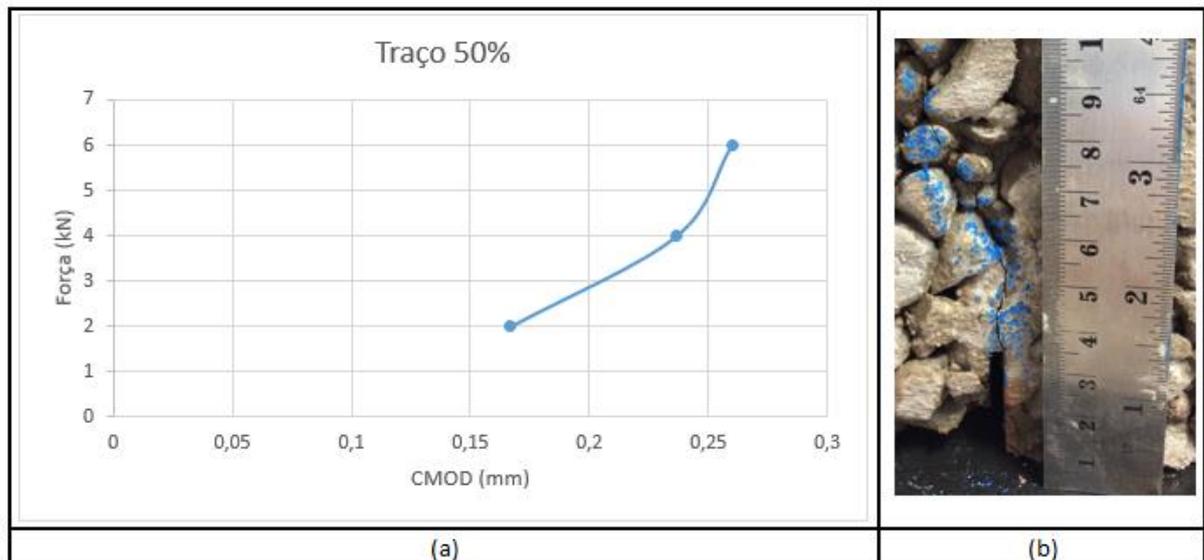


Gráfico 8: (a) Energia de faturamento para o concreto com 50% de RCD, (b) imagem da fratura.



Ao analisar o gráfico, percebe-se que o registro das aberturas não partem do ponto zero, uma vez que os registros iniciaram com a aplicação da força de 2kN, outro ponto relevante é que a abertura das fissuras e a carga máxima suportada até o rompimento do corpo de prova, foram muito parecidos para os traços de 0%, 5%, 10% e 25%. O traço de 50% rompeu com uma carga 50% menor que as dos demais traços e com uma abertura de fissura muito parecida.

As variações de energia de fraturamento, ocorre devido à disposição das fibras de aço em cada traço, uma vez que não é possível manter a mesma segregação em todos os traços.

4. CONCLUSÃO

A mecânica das fraturas é de grande importância para uma caracterização comportamental das estruturas de concreto, sendo um processo fundamental para o dimensionamento das estruturas. Ao comparar os gráficos é possível perceber que a adição do RCD como parte do agregado miúdo não influenciou na relação força x CMOD, o que comprova que a ação do *tension stiffening* (capacidade do concreto armado pelas fibras de aço de suportar as tensões de tração), ajudou a controlar a rigidez e a deformação gerada pelas fissuras, uma vez que todos os corpos de prova

fissuraram, mas não partiram ao meio, (FIELDS e BISCHOFF, 2004). Por esse motivo é possível ter uma conclusão parcial de que a variação do CMOD deu-se pela homogeneidade e disposição aleatória das fibras no traço. O resultado satisfatório para o uso do RCD limitou-se em até 25%, limite onde ocorreu uma trabalhabilidade e homogeneidade do concreto. Ficando para pesquisas futuras, testes com a modificação do fator água cimento, que provavelmente reduzirá o f_{ck} do traço, entretanto, de acordo com as pesquisas já realizadas irá melhorar a trabalhabilidade do traço com maior porcentagem de RCD, outra alternativa obtida de acordo com os parâmetros dos testes realizados é o aumento da quantidade de superplastificante, que dependendo do caso poderá acabar onerando o valor do concreto.

5. BIBLIOGRAFIA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR15530**: Fibras de aço para concreto – Especificação. Brasil, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR7217**: Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, Brasil, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR15116**: Agregados Reciclados de Resíduos Sólidos da Construção Civil. Rio de Janeiro, Brasil, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR5738**: Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 2003. Emenda 1:2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR11758**: Cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP: **Guia básico de utilização do cimento portland. 7 ed.** São Paulo, 2002.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Manual of concrete practice: part. 5.** ACI. State-of-the-art report on fiber reinforced concrete. (ACI 544.2R-96). ACI Committee 544. Detroit, USA, 2002.

ABRELPE: Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais: **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil.** 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil.** São Paulo, 2014.

AGUADO, A.; LARANJEIRA, F., 2007, “Presentación del Anejo de Hormigón con Fibras de la EHE y Ecuación Constitutiva del Hormigón con Fibras”. In: **Jornada sobre Aplicaciones Estructurales de Hormigón con Fibras**, pp. 1-32, Barcelona, Espanha.

BARROS, J.A.O. **Pavimentos industriais – materiais, dimensionamento e processos construtivos**, Relatório 00-DEC/E-5, P.118. Junho 2000.

BARROS et al. **Betão reforçado com fibras de aço – recentes desenvolvimentos nas áreas da caracterização experimental, cálculo e aplicação. Dimensionamento e execução de pavimentos**, Dep. Eng^a Civil, Escola de Eng^a dá UM, p.100, LNEC, Junho 2001.

BARROS, J.A.O.; SENA CRUZ, J. **Fracture energy of steel fibre reinforced concrete.** Journal of Mechanics of Composite Materials and Structures, Vol. 8, No. 1 p.29-45, Janeiro, 2001.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre reinforced compositious composites.** United Kingdom. Elsevier, 1990.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA nº 307.** CONAMA, jul, 2002.

CABRAL, A. E. B.; MOLIN, D. C. C. D.; RIBEIRO, J. L. D.; SCHALCH, V. **Modelagem da Resistência à Compressão de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados de RCD**. Minerva, São Carlos, v. 4, n. 1, p. 75 – 84. 2007.

FIELDS, K.; BISCHOFF, P. H. **Tension Stiffening and Cracking of high Strength Reinforced Concrete Tension Members**, ACI Structural Journal, V 101, nº 4, p. 447 – 456. Julho – Agosto, 2004.

FIGUEIREDO, A.D. **Concreto Reforçado com Fibras**. São Paulo, 2011. Dissertação (Livre Docência) – Universidade de São Paulo. 2011, 256p.

FIGUEIREDO, A.D. **A Nova Especificação Brasileira das Fibras de Aço para Concreto**, In: 50º Congresso Brasileiro do Concreto, Salvador, 2008. Anais. Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON. São Paulo, 2008.

FIGUEIREDO, A.D. **Concreto com Fibras de Aço**, Boletim Técnico (BT/ PCC/ 260). São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Construção Civil, 2000.

FIGUEIREDO, A.D. **Parâmetros de Controle e Dosagem do concreto projetado com fibras de aço**. 1997. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

FILHO, F.C. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas Usuais de Concreto Armado**, 4ª Edição, 3ª Impressão, Eireli, 2017, 413p.

MESQUITA, C.L.; AZEVEDO, D.A.C.I.; CÂNDIDO, S.E.; CATHOLD, A.G. **Análise de Viabilidade Técnica de Utilização de Resíduos de Construção e Demolição na Fabricação de Blocos de Vedação**. Revista Eletrônica de Engenharia Civil, volume 10, Nº 3, 2015, p 30-40.

MUNIN, A. **A importância da impermeabilização para a sustentabilidade das edificações**, 2014. Disponível em:<<http://www.forumdaconstrucao.com.br/conteudo.php?a=20&Cod=1481>>. Acesso em 04 dez. 2017.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estruturas, propriedades e materiais**. São Paulo: IBRACON, 2008.

METHA, P. K.; AITICIN, P. C. **CEM. - Concrete Aggregates**. In: American Society for Testing Materials, J., Philadelphia, PA, 1990, v. 12, n.2, p. 70-78.

MACAFERRI, **Catálogo de fibras de aço – Wirand**. Março, 2011.

RANGEL, C.S. **Influência de Agregados Graúdos Reciclados nas Propriedades Estruturais de Concretos de Resistencia Normal e Alto Desempenho**. Rio de Janeiro, 2015. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2015, 236p.

RILEM TC 162. **TDF, Materials and Structures**, Vol. 33, p 3-5. Janeiro 2000a.

RILEM TC 162. **TDF, Materials and Structures**, Vol. 33, p 75-81. Março 2000b.

TONUS, A.C; MINOZZI, I.P. **Utilização de Agregados Reciclados de Alvenaria na Produção de Concreto para Contrapisos**. Pato Branco, 2013. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnologia Federal do Paraná, Pato Branco. 2013, 68p.

VIEIRA, G.V. **Estudo do Progresso de Corrosão Sob a Ação de Íons Cloreto em Concretos Obtidos a Partir de Agregados Reciclados de Construção e Demolição**. Porto Alegre, 2003. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003. 150p.

WADAHANNA, P. **Estudo da Incorporação de Resíduos de Cerâmica Vermelha na Composição de Concreto para Uso em Estacas Moldadas In Loco.** Ilha Solteira, 2010. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia UNESP. 2010, 109p.