

ANDRÉ MINORU ODA
MAURÍCIO AKIRA SANTANA
RICARDO CHAN
RICARDO LEITE DE CASTRO PANIGUEL

**CONCRETO COM AGREGADO GRAÚDO RECICLADO REFORÇADO
COM FIBRAS DE AÇO: APLICAÇÃO EM PAVIMENTOS**

Projeto de Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo, no
âmbito do Curso de Engenharia Civil.

São Paulo

2014

ANDRÉ MINORU ODA
MAURÍCIO AKIRA SANTANA
RICARDO CHAN
RICARDO LEITE DE CASTRO PANIGUEL

**CONCRETO COM AGREGADO GRAÚDO RECICLADO REFORÇADO
COM FIBRAS DE AÇO: APLICAÇÃO EM PAVIMENTOS**

Projeto de Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo, no
âmbito do Curso de Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Domingues de
Figueiredo.

São Paulo

2014

FICHA CATALOGRÁFICA

Oda, André Minoru

Pavimento de concreto com agregado graúdo reciclado reforçado com fibras de aço / A.M. Oda; M.A. Santana, R. Chan; R.L.C. Paniguel. -- São Paulo, 2014.

p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

1.Pavimentos rígidos 2.Pavimentação de concreto 3.Aço 4.Agregados (Reciclagem) 5.Concreto armado com fibras I.Santana, Maurício Akira 2.Chan, Ricardo III.Paniguel, Ricardo Leite de Castro IV.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil V.t.

AGRADECIMENTOS

À amizade, que uniu este grupo, e permitiu que os esforços se somassem para desenvolvimento deste trabalho. Às nossas famílias, base de todas as conquistas nestes anos de graduação, e que não mediram esforços para que chegássemos até esta etapa de nossas vidas.

Ao nosso orientador, Prof. Antonio Domingues Figueiredo, pelo suporte no tempo que lhe coube, suas correções e motivação durante este ano.

À Votorantim Cimentos, na pessoa de Luiz Britto, à Dramix, à Volkswagen, na pessoa de Marcelo Inaba, à Trima Consultoria, na pessoa de Marcos Ceccatto e à equipe do laboratório de materiais da POLI-USP, pelo estimado apoio no desenvolvimento deste projeto.

RESUMO

O emprego do concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) em pavimentos apresenta vantagens, tais como: melhor distribuição de tensões pela presença das fibras que ajudam a minimizar a propagação das fissuras e a absorver as deformações no compósito, prolongando a sua vida útil. Paralelamente, a demanda pela sustentabilidade vem levando ao desenvolvimento de alternativas para aplicação de resíduos da indústria da construção civil em componentes estruturais e não estruturais. Esses resíduos, especificamente os provenientes de centrais dosadoras de concreto, que são gerados em grande volume, apresentam grande potencial de reaproveitamento como agregados reciclados de boa confiabilidade. Pesquisas anteriores demonstraram que há a possibilidade de compensar a perda de resistência mecânica do concreto com agregados reciclados, principalmente à tração, através de seu reforço com fibras de aço. Cria-se, então, uma perspectiva para uso de resíduos de usinas de concreto na produção de pavimentos. Dessa forma, o objetivo desse trabalho foi analisar a viabilidade técnica e ambiental, da substituição integral do agregado natural pelo reciclado de concreto, em uma matriz de CRFA para pavimentos. Os resultados dos ensaios mostraram a influência das fibras no aumento da resistência à tração para o concreto com agregado reciclado. Outra conclusão obtida foi a proximidade dos valores de tensão residual entre os diferentes tipos de agregado, característica fundamental no processo de dimensionamento. Com os resultados de tração na flexão também foi possível obter os parâmetros para o dimensionamento a partir da adaptação do método de Nayar e Gettu (2012). Nas condições de estudo, os resultados mostraram que um teor razoável de fibras (sem grande interferência na trabalhabilidade) pode ser obtido para espessuras a partir de 17 cm. Além disso, foi constatado que o CRFA com ARC é muito mais sensível à redução da espessura do pavimento do que o concreto com agregado natural. Tal resultado mostrou sua influência na análise do impacto ambiental de modo que foi constatada uma espessura mínima. Esta espessura representa o valor no qual as tensões solicitantes no pavimento exigem um teor de fibras elevado o suficiente para suprimir a diminuição de emissão de CO₂ do concreto com agregado reciclado. Tais resultados abriram a possibilidade de se utilizar o CRFA com agregado reciclado para ser utilizado em pavimentos de concreto e podem estimular o estudo mais aprofundado.

Palavras-chave: Pavimentos rígidos. Pavimentação de concreto. Aço. Agregados (Reciclagem). Concreto armado com fibras.

ABSTRACT

The use of steel fiber reinforced concrete (SFRC) in pavements have advantages such as better distribution of stresses by the presence of the fibers which helps to minimize the spread of fissures and to absorb deformations of the composite, extending its service life. At the same time, the demand for sustainability has led to the development of alternative uses for residues of the construction industry in structural and non-structural components. Such residues, specifically those from concrete plants, which are generated in large volumes, have great potential for reuse as recycled aggregates with good reliability. Previous research has shown that there is the possibility of compensating the loss of mechanical strength of concrete, mainly tensile, with recycled aggregates through its reinforcement with steel fibers. It creates then a prospect for using concrete plants' residues in the production of pavements. Thus, the aim of this study was to analyze the technical and environmental viability of the complete replacement of the natural aggregate by recycled aggregate in a matrix SFRC for pavements. The test results have shown the influence of the fibers in increased tensile strength to the concrete with recycled aggregate. Another conclusion was obtained by the proximity of the residual stress values between the different types of aggregate a fundamental characteristic in the design process. With the flexural strength's results was also possible to obtain the parameters for the design from an adaptation of Nayar and Gettu's method (2012). In the study conditions, the results showed that a reasonable fiber content (with little interference in workability) can be achieved for thicknesses as of 17 cm. In addition, it was noted that the recycled concrete is far more sensitive to the reduction of thickness than the concrete pavement with natural aggregate. This result showed its influence on environmental impact analysis such as that a minimum thickness was found. This thickness represents the value at which the stress in the pavement require a fiber content high enough to suppress the reduction of CO₂ emissions of the concrete with recycled aggregate. Such outcomes opened up the possibility of employing the SFRC with recycled aggregate in concrete pavements and can stimulate further study.

Keywords: Rigid pavements. Concrete pavin. Steel. Agreggates (recycling). Fiber reinforced concrete.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Justificativas.....	1
1.2. Objetivos.....	2
2. CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO.....	4
2.1. As fibras de aço	4
2.2. A matriz de concreto	5
2.3. A interação fibra-matriz	5
2.4. Tenacidade.....	6
2.4.1. Efeito da resistência e da geometria das fibras.....	6
2.4.2. Efeito do teor de fibras	7
2.5. Trabalhabilidade	8
3. CONCRETO COM AGREGADO GRAÚDO RECICLADO	9
3.1. Resíduos de construção e sustentabilidade.....	9
3.2. Classificação do agregado reciclado	10
3.3. O agregado reciclado do concreto	11
3.4. O resíduo de concreto em centrais dosadoras	11
3.5. Principais características do agregado reciclado	12
3.5.1. Distribuição granulométrica	12
3.5.2. Forma e textura das partículas	12
3.5.3. Massa específica	13
3.6. Trabalhabilidade de concretos com agregado reciclado	15
3.7. Propriedades mecânicas do concreto com agregado reciclado	16
3.7.1. Resistência à compressão	16
3.7.2. Resistência à tração.....	17
3.7.3. Módulo de elasticidade	18
3.8. Efeito da adição de fibras de aço	18

3.8.1. Influência na resistência à compressão	18
3.8.2. Influência na resistência à tração na flexão	19
3.8.3. Influência na tenacidade.....	20
3.8.4. Influência no módulo de elasticidade	20
4. PAVIMENTO DE CONCRETO COM AGREGADO GRAÚDO RECICLADO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO.....	22
4.1. Estrutura de um pavimento.....	22
4.2. Tipos de pavimento	23
4.3. Características do revestimento do pavimento	24
4.3.1. Resistência à tração na flexão.....	24
4.3.2. Impermeabilidade	24
4.3.3. Resistência às variações de temperatura	25
4.4. Pavimento de concreto com agregado graúdo reciclado reforçado com fibras de aço	25
4.5. Método de dimensionamento	26
4.5.1. Evolução dos métodos	26
4.5.2. Método de Nayar e Gettu	27
5. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TEOR DE FIBRAS NO CRFA	30
5.1. Materiais utilizados.....	30
5.1.1. Materiais para a matriz de concreto	30
5.1.2. Fibras de aço.....	32
5.2. Estudo de dosagem.....	33
5.2.1. Dosagem da matriz de concreto.....	33
5.2.2. Dosagem das fibras de aço	34
5.3. Moldagem e cura dos corpos de prova	35
5.4. Metodologia dos ensaios.....	37
5.4.1. Resistência à compressão axial.....	37
5.4.2. Resistência à tração na flexão.....	37
5.4.3. Módulo de elasticidade	40
5.4.1. Absorção de água por imersão.....	41

5.5. Resultados dos ensaios	42
5.5.1. Resistência à compressão	42
5.5.2. Resistência à tração na flexão.....	44
5.5.3. Módulo de elasticidade	49
5.5.4. Absorção de água por imersão.....	50
6. PAVIMENTO-PROTÓTIPO	52
6.1. Cálculo das tensões solicitantes	52
6.1.1. Características do veículo.....	52
6.1.2. Cargas atuantes	54
6.1.3. Camadas do pavimento	56
6.1.4. Resultados	58
6.2. Determinação do teor de fibras	61
6.2.1. Metodologia.....	61
6.2.2. Resultados	62
7. ANÁLISE DE IMPACTO AMBIENTAL.....	65
7.1. Metodologia de análise.....	65
7.1.1. Proposta de Cáceres, John e Figueiredo (2014)	65
7.1.2. Metodologia utilizada	65
7.1.3. Emissões potenciais unitárias	66
7.2. Resultados de emissões totais.....	67
8. CONCLUSÕES	74
9. PERSPECTIVAS DO ESTUDO	76
10. REFERÊNCIAS.....	77
APÊNDICE A. RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS DE AÇO...	83
APÊNDICE B. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À	
COMPRESSÃO AXIAL DO CRFA COM AGREGADO NATURAL	85

APÊNDICE C. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DO CRFA COM AGREGADO RECICLADO	87
APÊNDICE D. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DO CRFA COM AGREGADO NATURAL	89
APÊNDICE E. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DO CRFA COM AGREGADO RECICLADO	92
APÊNDICE F. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CRFA COM AGREGADO NATURAL	95
APÊNDICE G. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CRFA COM AGREGADO RECICLADO	96
APÊNDICE H. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO	97

1. INTRODUÇÃO

1.1. Justificativas

Na tentativa de reduzir o impacto causado pela ação do homem no meio-ambiente, busca-se cada vez mais o desenvolvimento de tecnologias de produção menos agressivas à natureza e que, ainda assim, mantenham um desempenho adequado. Assim, pode-se dizer que esta situação cria um vetor de inovação da tecnologia dos materiais usados na engenharia civil.

O atual modelo de desenvolvimento do setor da construção civil tem levado a um impacto negativo crescente no meio-ambiente devido à geração de resíduos e à exploração massiva dos recursos naturais, esta última provocando a escassez de matérias-primas. O Brasil, por exemplo, é o sexto país em termos de emissão de CO₂ provenientes da construção civil, com um total de 308 milhões de toneladas (FREITAS, 2007). Essa atividade antrópica, no entanto, é inevitável para o desenvolvimento da sociedade em direção à urbanização. Assim, cabe balizar esse progresso sob uma ótica sustentável no contexto da construção civil.

Desse modo, realizou-se uma revisão bibliográfica sobre o tema de concretos com agregados reciclados reforçados com fibras de aço, seja em estudos nacionais como também internacionais, buscando entender como esse material pode ser um elemento desta mudança de paradigma tecnológico.

Os resíduos da construção civil representam, por exemplo, mais de 50% de todo o descarte sólido no meio urbano brasileiro (SINDUSCON-SP, 2005). O descarte na construção civil se dá, principalmente, pela demolição e construção de edifícios ou mesmo em usinas dosadoras de concreto. E a origem deste resíduo é de conhecimento fundamental para determinar o grau de variabilidade de características do material reciclado. Sabe-se, ainda, que o resíduo de concreto é mais confiável do ponto de vista da homogeneidade de características (ÂNGULO, 2000). Dessa forma, há possibilidade de amplo uso do resíduo de usinas, que é gerado em grande volume, como agregado reciclado para produção de concreto.

Neste cenário, o uso de resíduos de concreto constitui parte significativa desta cadeia sustentável. No entanto, mesmo bem caracterizado, aspectos deste material levam a um desempenho inferior quando comparado ao concreto com agregado natural (ÂNGULO, 2000). Fatores como porosidade, absorção de água e forma dos grãos exigem a inserção de elementos adicionais ao concreto (METHA; MONTEIRO, 1994), de forma a otimizar a possibilidade de utilização do resíduo.

Há diversos elementos passíveis de realizarem essa melhora, um deles é o aço, sob a forma de fibras, que melhoram o desempenho do concreto com agregados reciclados (PIETRA, 2005) quando solicitado à tração, e o trazem, comprovadamente, para um uso muito mais confiável.

Ao passo que agregados reciclados diminuem a resistência à tração do concreto, em contrapartida, as fibras de aço conseguem distribuir melhor estes esforços para a matriz, diminuindo a carga que seria suportada pelos agregados. Por exemplo, em estudo realizado por Pietra (2005), com um teor de fibras de 40 kg/m³, o concreto com agregado reciclado apresentou resistência à tração e consumo de cimento próximo ao do concreto com agregado natural reforçado com o mesmo teor de fibras. (FIGUEIREDO, 2011).

No Brasil, o concreto reforçado com fibras de aço (CRFA) é utilizado, principalmente, na produção de pavimentos industriais, que representou 63% de todo o uso desta tecnologia, em 2009 (FIGUEIREDO, 2011). Este amplo uso do CRFA em pavimentos se dá pela redução do comportamento frágil, característico do concreto, e da dependência na resistência à tração dos pavimentos de concreto, além de a fibra de aço facilitar a execução da estrutura, uma vez que elimina a etapa de posicionamento da armadura convencional (FIGUEIREDO, 1997).

Assim, o presente trabalho será focado no estudo da possibilidade da produção do pavimento de CRFA com agregado reciclado de concreto (ARC) quando aplicado em pavimento industrial, tanto de áreas internas quanto de acessos.

1.2. Objetivos

Este trabalho tem por objetivo estudar a viabilidade da aplicação, em pavimentos, do CRFA com substituição total do agregado natural por ARC proveniente de usina dosadora de concreto.

Conhecendo a influência do agregado reciclado e das fibras de aço nas respostas mecânicas do concreto, deve-se estudar e quantificar o ganho de resistência conferido pelo uso da fibra de aço, frente à redução dela pelo reciclado. Logo, através de uma metodologia de dosagem, serão ajustados o traço da matriz de concreto e o teor de fibras, de modo a obter resultados que atendam às exigências quanto a trabalhabilidade, resistência à compressão, resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade e tenacidade.

Assim, para se atingir o objetivo deste trabalho, baseado numa adaptação do método proposto por Nayar e Gettu (2012), será realizado o dimensionamento do pavimento-protótipo, para algumas espessuras, para verificar a resposta mecânica do concreto com agregado graúdo reciclado reforçado com fibras nesta aplicação. E, ao mesmo tempo, espera-se determinar os efeitos ambientais associados, pela avaliação dos impactos decorrentes do uso deste concreto frente ao concreto armado. O principal parâmetro de quantificação é a emissão de gases CO₂ nos componentes do concreto, estimadas por indicadores encontrados na revisão bibliográfica.

Portanto, buscando demonstrar a viabilidade técnica e ambiental desta tecnologia, este trabalho pretende garantir a competitividade desta alternativa frente ao CRFA convencional.

2. CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO








O CRFA, assim como o concreto armado convencional, é um compósito formado por duas fases principais: a matriz de concreto e o reforço com aço. Atualmente, o CRFA surge como uma tecnologia alternativa ao concreto armado convencional na produção de estruturas contínuas, tais como pavimentos, revestimento de túneis e peças pré-moldadas (FIGUEIREDO, 2011).

Assim, o uso do reforço com aço decorre pelo fato deste possuir a função de melhorar a capacidade de redistribuição de esforços após o início da fissuração da matriz de concreto, pois funciona como uma ponte de transferência de tensões de tração, reduzindo a velocidade de propagação das fissuras. Entretanto, segundo Figueiredo (2011), esta função é mais bem desempenhada pelas fibras de aço, por estarem distribuídas em toda matriz de concreto, provendo um comportamento pseudo-dúctil ao compósito.

2.1. As fibras de aço

Segundo a norma ABNT NBR 15530 (2007), as fibras de aço podem ser classificadas conforme a geometria da seção longitudinal (tipos A, B ou C), que definirá a forma de ancoragem das fibras à matriz de concreto, e quanto à geometria da seção transversal (classes I, II ou III), que dependerá do aço de origem das fibras, como mostra o Quadro 2.1.1.

Quadro 2.1.1. Classificação e geometria das fibras de aço para reforço de concreto.

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

Extraído de: ABNT NBR 15530, 2007.

2.2. A matriz de concreto

O concreto é um compósito formado por agregados miúdos e graúdos, pasta de cimento e poros, caracterizando-se, principalmente, pelo seu comportamento frágil na ruptura (devido ao surgimento e propagação de fissuras) e pela sua grande resistência à compressão e baixa resistência à tração. A resistência à tração do concreto equivale de 7% a 11% da sua resistência à compressão (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A baixa resistência à tração somada ao seu comportamento frágil na ruptura implica em baixa capacidade de deformação quando é solicitado à tração (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Dessa forma, as estruturas solicitadas por este tipo de esforço, como os pavimentos, exigem grandes volumes de concreto, a fim de reduzir o surgimento e a propagação de fissuras, ao reduzir o nível de tensões na estrutura (BALBO, 2009).

Contudo, o maior consumo de materiais não é desejável, nem do ponto de vista econômico e nem ambiental. Assim, uma alternativa para a aplicação do concreto em pavimentos, de modo a reduzir este problema, é reforçá-lo com materiais que tenham boa capacidade de resistência à tração, como as fibras de aço (REPORT ACI 544.1R-96, 2002). Nesse caso, o reforço estaria atuando diretamente na resistência à tração, melhorando a capacidade estrutural do compósito ao reduzir a sua fissuração.

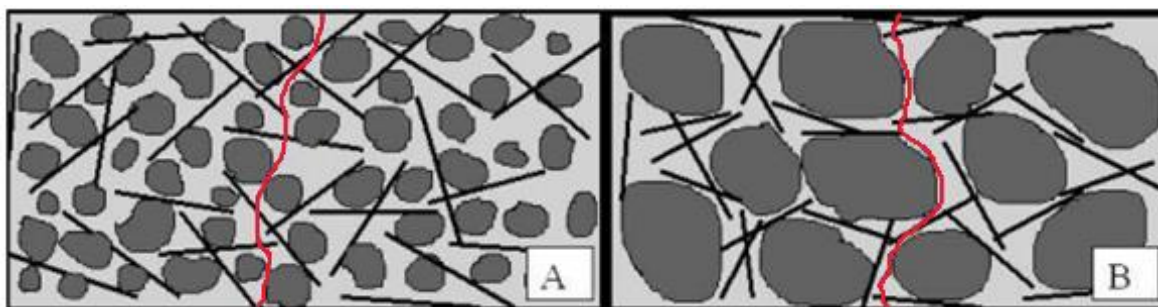
2.3. A interação fibra-matriz

O CRFA solicitado à tração faz com que as fibras ajam como reforço da matriz de concreto após o início de sua fissuração, definindo a resistência residual. Quando isto ocorre, as fibras recebem todo o carregamento do compósito, uma vez que a matriz deixa de apresentar capacidade para resistir aos esforços de tração (FIGUEIREDO, 2011). A partir de determinado momento, as fibras transferem as tensões adicionais para a matriz através das tensões de aderência interfacial fibra-matriz, que começa a sofrer fissurações adicionais. Estas fissuras continuam a se propagar até que haja o escorregamento ou arrancamento das fibras devido à perda de aderência local acumulada, isto é, quando a tensão de aderência ultrapassa a resistência de aderência entre a interface fibra-matriz (BENTUR; MINDNESS, 1990). Deve-se destacar, também, que a aderência ocorre entre a pasta de cimento e as fibras. “Assim, essa aderência depende da porosidade da pasta e não da porosidade global da matriz, ou seja, não depende da porosidade dos agregados” (PIETRA, 2005, p. 34).

Entretanto, para que as fibras consigam atuar como reforço do concreto, é necessário que haja compatibilidade dimensional entre elas e o agregado graúdo, de tal forma que possam interceptar as fissuras com maior frequência, como mostra a Figura 2.3.1. Isso se deve ao fato das fissuras se propagarem preferencialmente na região de interface entre o agregado graúdo e a pasta de cimento, nos concretos de baixa e moderada resistência.

Assim, para que ocorra essa compatibilização, pode-se reduzir a dimensão do agregado ou aumentar o comprimento da fibra, desde que seja alcançada uma relação entre esses dois parâmetros superior a 0,5 (FIGUEIREDO, 2011).

Figura 2.3.1. CRFA com compatibilidade dimensional entre fibras e agregado graúdo (A) e sem compatibilidade (B).



Adaptado de: FIGUEIREDO, 2000.

2.4. Tenacidade

A capacidade de redistribuição de esforços após a fissuração da matriz de concreto pode ser traduzida pela resistência residual medida em ensaios de tração na flexão. Outro resultado que pode ser obtido através destes ensaios é a energia absorvida pelo compósito quando carregado até certo deslocamento pré-definido em normas, traduzida pela grandeza denominada tenacidade. A tenacidade do CRFA está ligada diretamente à resistência, à geometria e ao teor de fibras.

2.4.1. Efeito da resistência e da geometria das fibras

A resistência das fibras afeta na capacidade resistente pós-fissuração do CRFA, pois no momento em que a matriz de concreto fissa as tensões são transferidas para as fibras cuja

resistência é acionada. Assim, quanto maior a resistência da fibra, maior será a capacidade resistente residual, portanto, maior será a tenacidade (FIGUEIREDO, 2011).

Como visto no item 2.3, a resistência residual está relacionada à resistência de aderência entre a matriz de concreto e as fibras. Desta forma, o formato, comprimento e diâmetro das fibras também afetam a aderência, pois influenciam na área superficial que entra em contato com a matriz de concreto e, quanto maior a área superficial, maior a resistência de aderência e, portanto, maiores serão os valores de resistência residual pós-fissuração e de tenacidade (FIGUEIREDO, 2011).

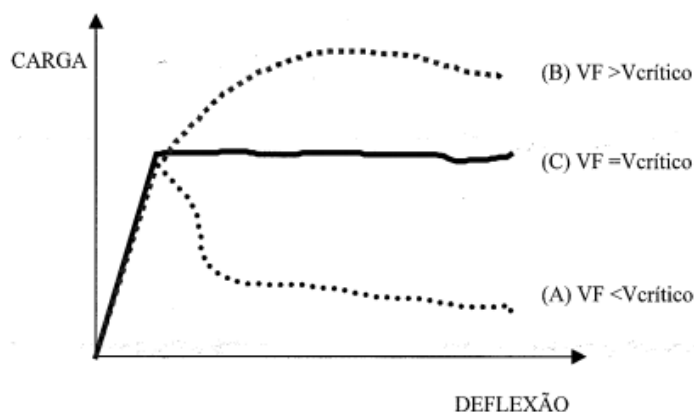
Para auxiliar na análise da influência do comprimento e diâmetro das fibras, foi criado um parâmetro adimensional chamado fator de forma ($\lambda = L/d_e$, sendo L o comprimento e d_e o diâmetro equivalente da fibra). Assim, para um mesmo teor de fibra, quanto maior o fator de forma, maior será a capacidade resistente pós-fissuração do concreto (FIGUEIREDO, 2011).

2.4.2. Efeito do teor de fibras

É razoável afirmar que quanto maior teor de fibras, isto é, a quantidade de fibras num dado volume de concreto, maior será a tenacidade, pois as tensões serão mais bem distribuídas em cada uma das fibras. Além disso, o aumento do teor de fibras provoca uma mudança de comportamento do compósito, que está ligado ao conceito chamado de volume crítico de fibras que, segundo Figueiredo (2011), corresponde ao teor de fibras que mantém a mesma capacidade resistente do compósito a partir da ruptura da matriz.

Assim, em teores baixos, isto é, abaixo do volume crítico, o CRFA perde capacidade resistente progressivamente após a fissuração da matriz, apresentando um comportamento denominado *strain-softening* (comportamento A da Figura 2.4.1), enquanto que, em teores elevados, ou seja, acima do volume crítico, há um ganho de capacidade resistente após a fissuração da matriz, sendo este comportamento chamado de *strain-hardening* (comportamento B da Figura 2.4.1).

Figura 2.4.1. Comportamento de compósitos reforçados com volume de fibras (VF) abaixo (A), acima (B) e igual (C) ao volume crítico de fibras, durante o ensaio de tração na flexão.



Extraído de: FIGUEIREDO, 2000.

2.5. Trabalhabilidade

A adição de fibras de aço no concreto altera a consistência e a mobilidade do compósito, refletindo na trabalhabilidade. Isto ocorre porque a presença das fibras na mistura do concreto produz uma restrição de mobilidade relativa das partículas, principalmente com relação ao agregado graúdo, reduzindo a fluidez. Além disso, a área superficial específica (área superficial dividida pela área da seção transversal) das fibras aumenta a necessidade de água de molhagem, implicando em maior coesão e perda de mobilidade do compósito no estado fresco. Assim, por exemplo, para um mesmo teor e comprimento das fibras, quanto maior o fator de forma (isto é, menor diâmetro), maior a área superficial específica e, portanto, menor a fluidez do compósito (FIGUEIREDO, 2011).

No entanto, segundo Ceccato (1998), a trabalhabilidade da mistura é pouco influenciada quando os teores de fibra são inferiores a 60 kg/m^3 , sempre que o fator de forma for menor ou igual a 80; e assim, pode ser mensurada indiretamente pelo ensaio de abatimento de tronco de cone (ABNT NBR NM 67, 1998), que é o caso deste trabalho.

3. CONCRETO COM AGREGADO GRAÚDO RECICLADO

A similaridade existente entre curvas características de agregado graúdo reciclado e natural demonstra que o material reciclado, bem caracterizado e dentro de parâmetros típicos, apresenta-se como alternativa tecnicamente viável do ponto de vista da previsibilidade de suas propriedades físicas (ÂNGULO, 2000).

No entanto, pelo fato de apresentarem maior heterogeneidade, porosidade e, portanto, menor resistência mecânica em comparação com agregados naturais, sua aplicação é ainda pouco difundida, restringindo-se, atualmente, na composição das camadas de base e sub-base de pavimentos, produção de blocos de concreto, drenagem, entre outros.

Assim, de modo a aumentar o campo de aplicação do agregado reciclado e torná-lo uma alternativa mais competitiva e atraente ao mercado, procurou-se a possibilidade de promover o uso de um agregado reciclado com menor heterogeneidade, que é o caso do agregado derivado de resíduo de concreto, que poderia minimizar os seus efeitos negativos no concreto produzido com ele (ÂNGULO, 2005).

3.1. Resíduos de construção e sustentabilidade

O impacto ambiental envolvido nas atividades de construção e demolição configura motivo de grande preocupação em organismos governamentais, ambientais e técnicos. Essa preocupação se ratifica em meio a diversos dados, um deles indicando que mais de 50% dos resíduos sólidos urbanos, em massa, gerados no estado de São Paulo são oriundos da construção civil (SINDUSCON-SP, 2005).

Uma das formas de agir sobre essa questão é na proposição de legislações mais impactantes no controle da geração e descarte de resíduos. No Brasil, desde a implantação da Resolução CONAMA nº 307 (2002), legislação que atua sobre os resíduos, tem-se exigido de construtores, empreiteiros e demais *stakeholders* do setor uma atenção especial a respeito do tema. Na cidade de São Paulo, o Decreto nº 48.075 (2006) institui que “as obras e serviços de pavimentação das vias públicas do Município de São Paulo deverão ser executados com a utilização de agregados reciclados oriundos de resíduos sólidos da construção civil”.

3.2. Classificação do agregado reciclado

Os resíduos de construção e demolição (RCD) são compostos de diversos materiais, sejam eles madeira, plásticos, metálicos ou outros inorgânicos não metálicos. E todos estes resíduos são passíveis de atividades de reuso ou reciclagem que os mantenham ativos no ambiente - e não apenas descartados (ÂNGULO et al, 2013). No entanto, apenas no último grupo apresentado – inorgânicos não metálicos - encontram-se aqueles cuja reciclagem pode viabilizar sua aplicação como agregado graúdo num compósito de concreto (ÂNGULO, 2005). Este grupo, formado por resíduos de cerâmica e cimentícios, originam agregados reciclados que podem ser classificados em três grupos, como define o RILEM TC 121 – DRG (1994):

- Agregados originados predominantemente de resíduos de cerâmica vermelha;
- Agregados originados predominantemente de resíduos de concreto; e
- Agregados originados da mistura de agregados reciclados e naturais (mistos).

Os agregados originados de RCD, de um modo geral, têm como característica mais marcante a alta variabilidade quanto à composição e origem (ÂNGULO, 2000). Para sua utilização cabe, dessa forma, executar uma separação rigorosa de seus componentes, de modo a minimizar esta variabilidade, que reflete na dispersão de massa específica e porosidade - influenciando diretamente no comportamento atrelado ao concreto, pela variação de valores de resistência dos compósitos e outras propriedades mecânicas; fato este que desanima, consequentemente, seu uso mais efetivo no mercado (ÂNGULO, 2000).

Assim, como dentro de cada classe RILEM existe variabilidade de características, outra classificação se faz necessária: pela segregação por faixas de massa específica, a qual permite análise mais profunda entre elementos de mesma classe. Isso porque, desta caracterização, consegue-se avaliar, com maior segurança, as propriedades microestruturais e promover uma homogeneidade de características entre os agregados de mesma faixa (PIETRA, 2005).

Portanto, o controle da origem e das características dos agregados reciclados é fundamental para que se possa garantir a qualidade do concreto (METHA; MONTEIRO, 1994).

3.3. O agregado reciclado do concreto

Considerando a classificação pelo critério de massa específica, os estudos de Pietra (2005) e Carrijo (2005) mostram que agregados reciclados mistos de RCD, com massa específica superior a $2,2 \text{ g/cm}^3$, possuem teores de rocha (agregado natural) e cimentícios significativamente maior do que de cerâmica vermelha – e essa faixa de trabalho leva a resultados de comportamento mecânico mais próximo ao do agregado natural que, para efeito de comparação, apresenta faixa de massa específica entre $2,6$ a $2,8 \text{ g/cm}^3$ (ÂNGULO, 2005).

Logo, infere-se que a minimização da variabilidade da origem do agregado reciclado (vinda predominantemente de resíduos de concreto) associada à definição de faixas mínimas de massa específica para os agregados (superiores a $2,2 \text{ g/cm}^3$) podem levar à crescente segurança no seu uso. Ou seja, que a utilização de uma matriz composta apenas por resíduo de concreto deve proporcionar um controle mais efetivo sobre o material, pela obtenção de agregados reciclados de comportamento mais homogêneo e de melhor desempenho mecânico.

3.4. O resíduo de concreto em centrais dosadoras

Segundo Vieira (2010), uma grande central dosadora de concreto aponta para perdas médias de 144 m^3 mensais do material dosado na usina, frente a uma produção mensal de 9000 m^3 , representando em torno de 1,6% do total produzido – deste volume, 98% são resíduos provenientes do descarte de lastro (material que sobra no interior da betoneira após o seu descarregamento) e sobras (concreto devolvido, por não ter sido utilizado). Este rejeito acarreta não só prejuízos ambientais, mas também custos adicionais de produção às centrais, que chega a ser em torno de R\$ 4,70 por metro cúbico de concreto produzido (VIEIRA, 2010).

Por conta destes números, centrais dosadoras de concreto estão instalando equipamentos de reciclagem do concreto residual para produção de agregados, visando atender políticas, não apenas de ordem ambiental, mas de otimização de custos de produção e rejeitos. Desse modo, a perspectiva de uso do resíduo como agregado reciclado aumenta, dependendo da cooperação entre as usinas centrais e os destinos de absorção de agregado reciclado do concreto.

3.5. Principais características do agregado reciclado

A viabilidade técnica do agregado reciclado do concreto deve ser analisada através de diversos parâmetros físicos, que exercem importante influência na trabalhabilidade e no comportamento mecânico do concreto quando adicionado a ele, tais como: resistência à compressão, à tração na flexão e módulo de elasticidade. A caracterização física, segundo Mehta e Monteiro (1994), deve abordar:

- A distribuição granulométrica;
- A forma e a textura das partículas; e
- A massa específica.

3.5.1. Distribuição granulométrica

A distribuição granulométrica dos agregados tem efeito sobre a demanda de água no concreto, assim, influenciando todas as propriedades relacionadas à quantidade de água (trabalhabilidade, densidade, segregação e acabamento). Em geral, é a área superficial do agregado que determina a quantidade de água necessária para molhar e lubrificar a mistura (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

3.5.2. Forma e textura das partículas

A forma e a textura das partículas dos agregados influenciam mais diretamente nas propriedades do concreto no estado fresco do que no estado endurecido. As partículas de textura áspera, angulosas e alongadas, por exemplo, requerem mais pasta de cimento para produzir misturas trabalháveis e, portanto, aumentam o custo do concreto. Ainda, há evidências de que, pelo menos nas primeiras idades, a resistência à tração na flexão do concreto, pode ser afetada pela textura do agregado; uma textura áspera parece favorecer a formação de uma aderência mecânica forte entre a pasta de cimento e o agregado (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

3.5.3. Massa específica

Dentre os parâmetros de caracterização física, a massa específica é, de certo, a mais importante no estudo do agregado. A classificação do agregado reciclado, consagrada na bibliografia internacional, é feita em quatro faixas de massa específica (g/cm^3):

- $\mu < 1,9$;
- $1,9 < \mu < 2,2$;
- $2,2 < \mu < 2,5$; e
- $\mu > 2,5$.

A partir dessa caracterização, podem-se obter respostas sobre os parâmetros necessários à análise técnica do material, como absorção de água, porosidade, resistência à compressão, módulo de elasticidade, entre outros.

Concretos produzidos com agregado reciclado de massa específica inferior a $2,2 \text{ g/cm}^3$ apresentam menor resistência e módulo de elasticidade, à medida que há uma maior absorção de água (CARRIJO, 2005). Em estudo similar, sobre concreto com agregado reciclado de RCD reforçado com fibras, demonstra-se que o desempenho mínimo do material se faz com o agregado de pelo menos $2,2 \text{ g/cm}^3$ de massa específica, com os resultados de resistência à compressão se aproximando do CRFA com agregado natural (PIETRA, 2005). Portanto, é confiável se partir do pressuposto que este valor de massa específica ($2,2 \text{ g/cm}^3$) seja uma referência consistente para a caracterização e escolha do agregado.

a) Porosidade e permeabilidade

Uma das respostas extraídas dessa classificação é a caracterização da influência da porosidade média no agregado reciclado, através de sua massa específica, que é determinante para justificar sua aplicação, refletindo diretamente na permeabilidade do compósito.

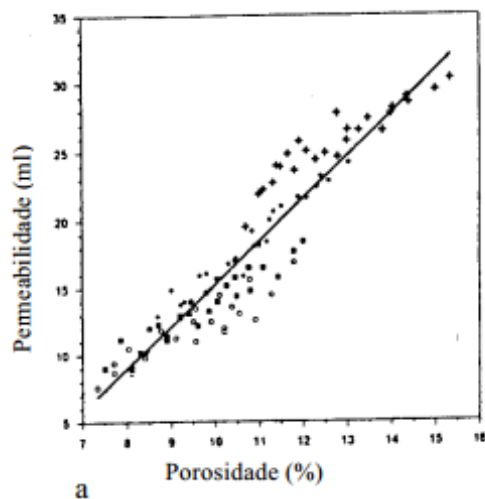
A permeabilidade, por si, é definida como a facilidade com que um fluido consegue escoar através de um sólido, determinada pelo tamanho e a continuidade dos poros na estrutura deste (METHA, 1994).

Quanto menor a massa específica, maior o volume teórico de vazios permeáveis na estrutura – característica determinada pelo tamanho dos poros, ou seja, porosidade relativa (volume de poros/volume de concreto).

No entanto, a permeabilidade é afetada principalmente pela porosidade efetiva, que é atribuída à continuidade dos poros no sistema (SAMAH; HOVER, 1992), presentes na pasta de cimento e nos agregados, bem como na interface entre eles, que permite a criação de um elo frágil na estrutura.

Como agregados reciclados de concreto possuem uma camada de argamassa aderida, confere-se naturalmente maior porosidade ao material reciclado, devido à pasta e a microfissuras na região de transição entre o agregado natural e a pasta. A quantidade de argamassa aderida a esse sistema, junto à idade e à relação água/cimento (a/c) são parâmetros da medida desses poros (JUAN; GUTIERREZ, 2004), os quais influenciam negativamente as propriedades do agregado reciclado, como pode ser visto na Figura 3.5.1, extraída de Larrard (1999); o aumento de poros é proporcional ao aumento da permeabilidade do material, afetando, conforme já dito, suas respostas mecânicas.

Figura 3.5.1. Relação entre porosidade e permeabilidade do concreto.



Extraído de: LARRARD, 1999.

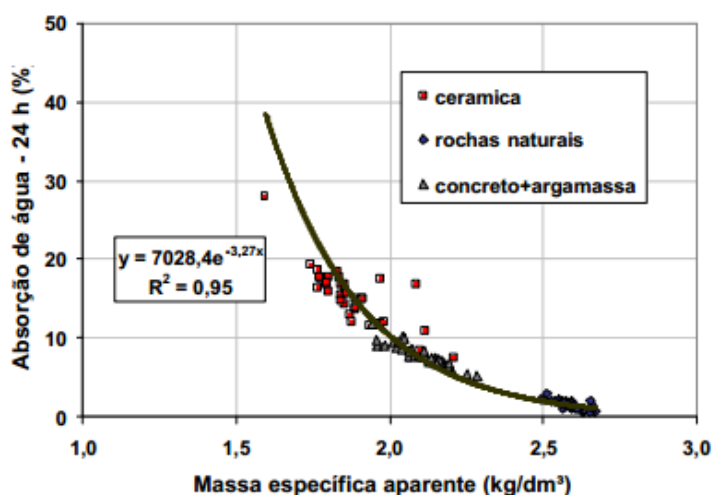
b) Porosidade e absorção de água

Ainda considerando que quanto maior a quantidade de argamassa aderida, menor a densidade do agregado, indica-se um limite máximo de 44% de argamassa aderida ao agregado

natural, para garantir massa específica superior a $2,16 \text{ g/cm}^3$ (JUAN; GUTIERREZ, 2004) - valor próximo do mínimo proposto por Pietra (2005) e Carrijo (2005) e adotado por esta pesquisa.

Como a principal diferença entre as partículas desta, pasta presentes no agregado, é física, influi-se nas propriedades de absorção de água e massa específica (ÂNGULO, 2000), conforme se pode inferir no gráfico da Figura 3.5.2, em que se variando a porosidade do agregado, ocorre sensível variação do grau de absorção de água.

Figura 3.5.2. Correlação entre massa específica e absorção de água.



Extraído de: ÂNGULO, 2000.

3.6. Trabalhabilidade de concretos com agregado reciclado

Segundo Barra e Vasquez (1997), há necessidade de se utilizar uma dosagem que permita evidenciar a influência das propriedades do agregado reciclado nas propriedades do compósito. Isso se dá pelo fato das propriedades do concreto, especialmente reológicas, serem diretamente afetadas pela absorção de água do agregado quando usado na condição seca (LARRARD, 1999) exige atenção a essa análise na dosagem.

Agregados reciclados, que apresentam menor densidade e logo maior volume de vazios comparados ao agregado natural, podem ter seus poros encerrados dentro do sólido ou mesmo superficiais, bem como dispersão do tamanho destes poros. Assim, se o agregado for utilizado na condição seca, este irá absorver parte da água de amassamento e afetar a trabalhabilidade (LEITE, 2001). Com isso, a moldagem é prejudicada pelo menor abatimento do concreto produzido em relação ao concreto convencional na mesma condição de consistência.

Como quem governa a trabalhabilidade do concreto é o volume de água fora dos poros e das possíveis trocas de umidade com o ar, deve-se compensar a água absorvida pelos agregados reciclados através do incremento do fator a/c, evitando que haja uma redução significativa na consistência do compósito (CARRIJO, 2005). Outra possibilidade é propor uma análise mais atenta à condição inicial de umidade; ou seja, que os agregados reciclados utilizados na produção do concreto sejam pré-umedecidos.

3.7. Propriedades mecânicas do concreto com agregado reciclado

Diversos estudos indicam que concretos com agregados reciclados apresentam uma redução da resistência à compressão. Porém, isso depende muito de fatores como: o teor de substituição, o tipo de agregado e a resistência da pasta (BAZUCO, 2009).

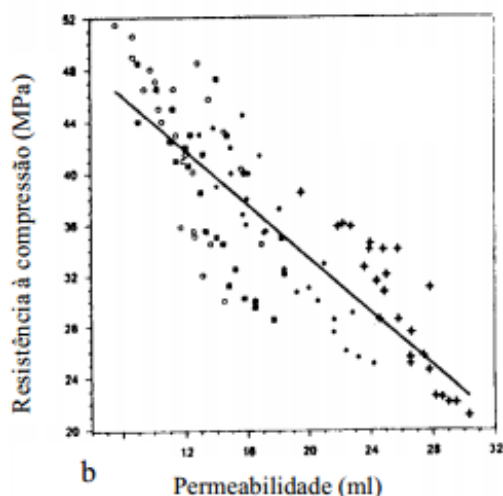
Como já dito, agregados reciclados apresentam uma menor resistência mecânica por conta de sua porosidade e heterogeneidade. Tais características acabam refletindo no comportamento do concreto.

3.7.1. Resistência à compressão

Segundo mostrado no item 3.5.3, os agregados reciclados possuem uma maior permeabilidade por conta da pasta de argamassa aderida em sua superfície. Por consequência, podemos ver na Figura 3.7.1.1 que isso afeta negativamente a resistência à compressão da pasta de cimento.

Isso fica claro no estudo de Pietra (2005), no qual ela compara a resistência à compressão de concretos com diferentes tipos de agregado. Nos resultados de ensaios, o uso de agregados reciclados com massa específica abaixo $1,9 \text{ g/cm}^3$ apresentaram resistência inferior ao agregado natural.

Figura 3.7.1.1: Relação entre permeabilidade e resistência à compressão do concreto.



Extraído de: LARRARD, 1999.

Em outro estudo sobre o efeito do agregado reciclado, Carneiro et al (2013) ensaiou concretos numa mistura de agregados miúdos e graúdos com massa específica em torno de 2,44 kg/cm³. Os resultados mostraram que houve um acréscimo significativo da resistência à compressão. A explicação, segundo o autor, seria uma melhor interação da pasta com o agregado, devido a sua rugosidade superficial.

3.7.2. Resistência à tração

Por se tratar de um estudo para um pavimento, é fundamental analisar comportamento do concreto reciclado ao ser submetido aos esforços de tração na flexão. Tal como foi constatado para os ensaios de compressão, também há uma redução da resistência à tração, conforme os resultados obtidos por Pietra (2005). Isso é explicado pelo fato do agregado reciclado romper-se com maior facilidade, e assim, tornar-se o elemento frágil do conjunto pasta-agregado. Isso fica evidente em resultados de ensaios nos quais se vê que a superfície de ruptura é relativamente plana, “atravessando” os agregados (Figura 3.7.2.2), ao contrário do que ocorre no concreto convencional, que apresenta uma superfície de ruptura mais rugosa (Figura 3.7.2.3), já que ela se dá na pasta, mantendo os agregados naturais íntegros (PIETRA, 2005).

Figura 3.7.2.2: Superfície de ruptura de um corpo de prova de concreto com agregado reciclado (agregado reciclado rompido, em destaque).



Extraído de: PIETRA, 2005.

Figura 3.7.2.3: Superfície de ruptura de um corpo de prova de concreto com agregado natural (agregado natural íntegro, em destaque).



Extraído de: PIETRA, 2005.

3.7.3. Módulo de elasticidade

Outro efeito da substituição do agregado natural pelo reciclado, ocorre sobre o módulo de elasticidade do concreto. Segundo Xiao et al. (2004), para uma substituição total dos agregados naturais, foi constatada uma redução de até 45%.

3.8. Efeito da adição de fibras de aço

Em contrapartida, a adição de fibras de aço ao compósito poderia agir de forma a contrabalancear esta perda de resistência do concreto com agregado reciclado e, desse modo, fazer com que seu desempenho mecânico se aproxime de um CRFA com agregado natural.

3.8.1. Influência na resistência à compressão

No estudo já citado de Carneiro et al (2013), a adição de fibras de aço (fator de forma 65) levaram a uma melhora na resistência à compressão. Porém é importante notar que o volume

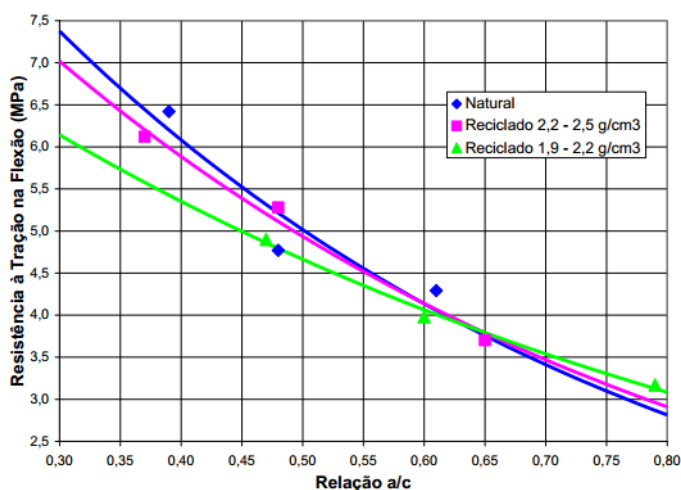
consumido de fibras foi de 60 kg/m^3 , o que já se aproxima de teores muito antieconômicos (FIGUEIREDO, 2011).

Já no estudo feito por Pietra (2005), não foi constatada alteração significativa, para teores de fibra de aço de até 40 kg/m^3 (tanto para o concreto com agregado natural quanto para o reciclado). Em ambos os casos foram utilizados agregados reciclados na mesma faixa de massa específica ($2,2$ a $2,5 \text{ g/cm}^3$), porém neste último caso foi feita a substituição total.

3.8.2. Influência na resistência à tração na flexão

A contribuição das fibras de aço para a resistência à tração é bastante relevante, já que elas trabalham justamente no momento em que se inicia a fissuração do concreto, dificultando a propagação das fissuras, como foi visto no item 2.3. Isto se confirma com o gráfico da Figura 3.8.2.1, que mostra a resistência à tração na flexão de concretos com diferentes tipos de agregados para um teor de fibras de 40 kg/m^3 , em que nota-se que o resultado do concreto com agregados reciclados com massa específica entre $2,2$ e $2,5 \text{ g/cm}^3$ foi bastante próximo do natural. Nos estudos de Carneiro et al (2013), para as mesmas condições citadas no tópico anterior, foi obtido um concreto com maior resistência à tração que o convencional.

Figura 3.8.2.1. Comparação entre as resistências à tração na flexão dos traços com diferentes agregados graúdos, com teor de fibras igual a 40 kg/m^3 , para diferentes relações a/c.



Extraído de: PIETRA, 2005.

Com a adição de fibras, as tensões são transferidas para a pasta de cimento (que apresenta maior resistência), aliviando as tensões às quais os agregados ficariam submetidos. A

partir daí, as características da pasta de cimento passam a influenciar no comportamento do concreto, de modo que, quanto mais rica é a pasta, maior é o ganho de resistência, já que a ruptura, neste caso, é limitada pela aderência entre ela e as fibras, conforme apresentado no item 2.3.

Observando a superfície de ruptura da Figura 3.8.2.2, é possível notar que esta é mais rugosa (inclusive com o agregado reciclado íntegro), semelhante àquela obtida com o concreto convencional, apresentada anteriormente, na Figura 3.7.2.3.

Figura 3.8.2.2: Superfície de ruptura de um corpo de prova de concreto com agregado reciclado e teor de fibras de 40 kg/m³ (agregado reciclado íntegro, em destaque).



Extraído de: PIETRA, 2005.

3.8.3. Influência na tenacidade

No caso de avaliação da tenacidade, o aumento do teor de fibras gera uma maior tenacidade do compósito, tal como ocorre com o concreto com agregado natural, justamente pela ação do reforço que as fibras exercem, contendo a propagação de fissuras. Porém, como os agregados reciclados tem maior porosidade, eles acabam por absorver mais água durante a preparação do concreto. Assim para que não ocorra uma perda de fluidez é preciso adicionar mais água do que seria necessário no caso convencional (PIETRA, 2005). Esse aumento da relação a/c provoca uma redução da aderência entre as fibras e a matriz de concreto, implicando em menor resistência residual pós-fissuração e, portanto, menor tenacidade do compósito.

3.8.4. Influência no módulo de elasticidade

Com relação à adição de fibras de aço ao concreto, Carneiro (2013) não notou influência significativa no módulo de elasticidade, mesmo utilizando um teor de fibras elevado (60 kg/m³).

Figueiredo (2011) também considerou que o módulo de elasticidade do compósito é pouco influenciado pelas fibras, em baixos teores.

De toda forma, é de grande importância haver estudos mais aprofundados sobre a influência da adição de fibras no módulo de elasticidade do compósito, pois esta é uma propriedade fundamental a ser considerada nos pavimentos de concreto, aplicação mais frequente do CRFA (PIETRA, 2005).

4. PAVIMENTO DE CONCRETO COM AGREGADO GRAÚDO RECICLADO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO

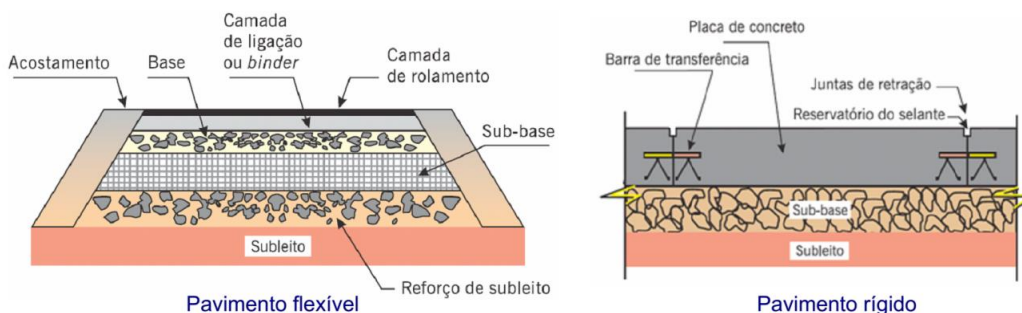
Pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança (BERNUCCI et al., 2008, p. 9).

Partindo desta definição sobre o que é um pavimento e das características esperadas do concreto estudado neste trabalho, será feita uma descrição geral sobre os diversos tipos de pavimentos e uma análise dos parâmetros mais importantes para o pavimento de concreto, mais especificamente. Além disso, o comportamento do concreto com agregado reciclado reforçado com fibras de aço será avaliado quando utilizado na produção de pavimentos industriais.

4.1. Estrutura de um pavimento

As camadas que podem estar presentes na estrutura de um pavimento são: subleito, reforço de subleito, sub-base, base e revestimento, como representado na Figura 4.1.1.

Figura 4.1.1. Esquema da estrutura do pavimento.



Extraído de: BIANCHI; BRITO; CASTRO, 2008.

A camada de subleito é composta normalmente pelo solo da própria região em que o pavimento está localizado, mas no caso deste ser de qualidade inferior à desejada pode-se misturar cimento ao solo ou, em casos mais extremos, efetuar a troca total do material em questão.

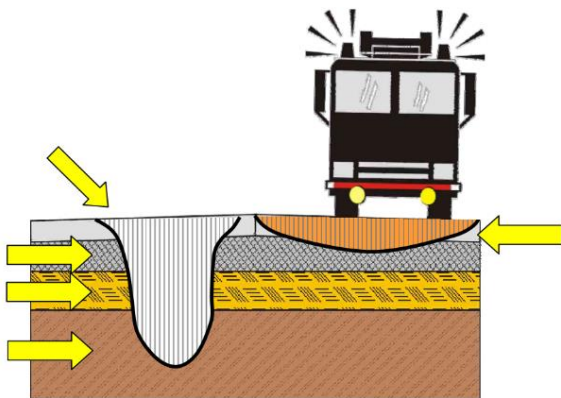
Logo acima do subleito está a camada de reforço de subleito, que também pode ser constituída pelo próprio solo, caso este atenda aos requisitos. É comum a adição de brita, ou cimento, ao solo para melhorar sua qualidade. O reforço de subleito pode, em diversos casos, ser excluído devido ao próprio subleito ser de boa qualidade.

A sub-base e base costumam ser de brita estabilizada com cimento ou mesmo de concreto, em muitos casos sendo do mesmo material e podendo ser unidas em uma camada única. A camada de revestimento é comumente composta de asfalto, concreto ou de ambos. Quando o revestimento é de concreto, é comum que este incorpore a base e, formando uma única camada.

4.2. Tipos de pavimento

Os pavimentos podem ser divididos em três tipos: flexível, semirrígido e rígido. Esta classificação é feita de acordo com a rigidez da estrutura e, conseqüentemente, a distribuição de carga ao longo de suas camadas, como mostra a Figura 4.2.1 (DER-SP, 2006).

Figura 4.2.1. Distribuição de carga no pavimento flexível (à esquerda) e rígido (à direita).



Extraído de: BIANCHI; BRITO; CASTRO, 2008.

O pavimento estudado, neste trabalho, é do tipo rígido de concreto, e é composto, principalmente, por uma camada de base de material estabilizado com cimento ou granular, com revestimento de placas de concreto. No caso em que a base é cimentada, pode-se ter uma camada granular adicional abaixo dela.

Devido à alta rigidez das placas de concreto, grande parte dos esforços provenientes do tráfego é absorvida por elas, resultando em baixos esforços nas camadas inferiores e boa distribuição das tensões verticais (DER-SP, 2006).

4.3. Características do revestimento do pavimento

Devido à grande variabilidade de esforços pelos quais o revestimento do pavimento é exposto, devem ser avaliadas diversas características. No caso do pavimento estudado neste trabalho, as principais características a serem consideradas são: resistência à fadiga por flexão, resistência à tração na flexão, impermeabilidade e resistência às variações de temperatura (BALBO, 2009; CHODOUNSKY et al, 2007).

4.3.1. Resistência à tração na flexão

Nos pavimentos industriais há a presença de cargas estáticas, sejam elas distribuídas como no caso de estoques em pallets ou concentradas como no caso de empilhadeiras. Isso resulta em esforços de tração nas placas de grandes dimensões do pavimento, ou seja, momentos fletores de grande intensidade (CHODOUNSKY et al, 2007).

De acordo com Chodounsky et al. (2007) os momentos dependem tanto da distribuição quanto da intensidade das cargas, as cargas distribuídas geram momentos negativos de maior intensidade nas áreas não carregadas, ou seja, nas áreas de circulação entre os estoques. Enquanto que as cargas concentradas geram momentos positivos em seu ponto de aplicação.

4.3.2. Impermeabilidade

Devido à não impermeabilidade total do revestimento, é comum que uma parcela da água e, em alguns casos outros líquidos mais nocivos, que escorrem sobre o pavimento, infiltrem no mesmo. A infiltração destas substâncias pode causar o carreamento de finos (ou lixiviação) das camadas superiores para as camadas inferiores e, portanto, aumentando o índice de vazios da mesma (BALBO, 2009).

Além disso, caso a água chegue às camadas mais inferiores, há o risco de expansão ou compactação das mesmas, que pode resultar em esforços que podem causar mais trincas no pavimento, agravando o problema de infiltração (BALBO, 2009). Em casos específicos,

também é possível que haja contaminação do solo abaixo do pavimento ou mesmo contaminação de lençóis freáticos (DER-SP, 2006; DNIT, 2005).

4.3.3. Resistência às variações de temperatura

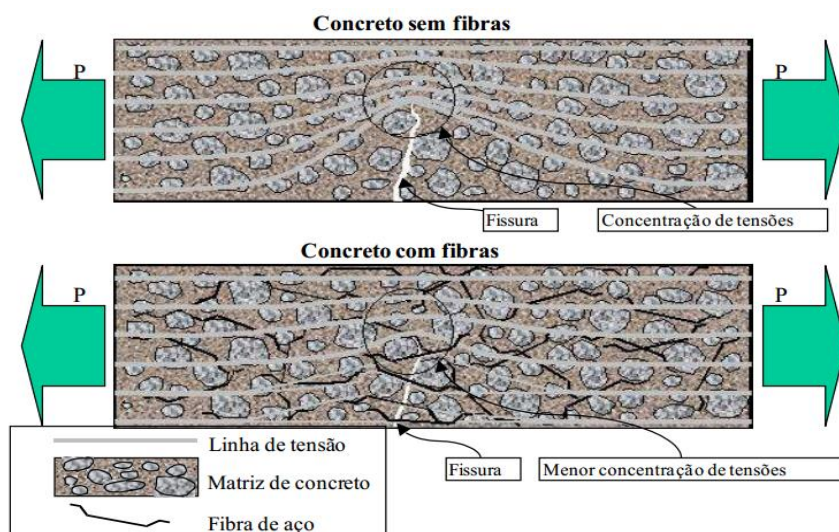
As grandes variações de temperatura às quais o revestimento do pavimento está sujeito fazem com que este se deforme de forma diferente entre as faces superiores e inferiores, resultando em mais esforços de tração e compressão que podem causar trincas. Um menor coeficiente de dilatação térmica diminui estas deformações e, portanto, seus esforços resultantes (BALBO, 2009).

4.4. Pavimento de concreto com agregado graúdo reciclado reforçado com fibras de aço

O uso do agregado reciclado no concreto para pavimentos apresenta duas contribuições importantes: a redução do módulo de elasticidade e do impacto ambiental, como foi abordado nos itens 3.7.3 e 3.1, respectivamente. A redução do módulo de elasticidade beneficia o pavimento, uma vez que torna o concreto mais elástico, melhorando a sua resposta aos carregamentos cíclicos. A redução do impacto ambiental se dá pela reciclagem dos resíduos de concreto das centrais dosadoras, evitando o desmonte de montanhas para produção de agregado natural, a poluição gerada pelo transporte desse agregado novo até o local a ser utilizado, e também pelo transporte do resíduo de concreto para descarte, dentre outros problemas.

As fibras de aço permitem um melhor desempenho do pavimento de concreto com agregado reciclado ao prover uma resistência residual pós-fissuração e compensar a perda de resistência à tração provocada pelo uso do agregado reciclado, como foi visto no item 3.8.2. O ganho de resistência residual pós-fissuração permite reduzir a propagação das fissuras do pavimento de concreto, provocadas pelos diversos esforços típicos para esse tipo de estrutura, ao redistribuir as tensões, como mostra a Figura 4.3.3.1.

Figura 4.3.3.1. Esquema de concentração de tensões para um concreto sem fibras e outro com fibras.



Extraído de: FIGUEIREDO, 2000.

Como demonstrado por Bastos (1999) e Carnio (2009), o CRFA obtém resultados muito mais vantajosos sobre o concreto sem fibras em relação à abertura máxima, número e tempo para a abertura das primeiras fissuras e resistência à fadiga, além de apresentar maior tenacidade; resultando, assim, em um pavimento com vida útil muito maior.

Além disso, como as fibras são incorporadas no processo de mistura do concreto, apresentando-se de forma aleatória em todo o seu volume, o pavimento apresenta melhor desempenho com relação aos esforços gerados pelas variações de temperatura, apresentados no item 4.3.3. Também se ganha na produtividade, já que a etapa de armação e posicionamento da armadura (que existe na produção do concreto armado convencional) é eliminada, reduzindo o tempo, a quantidade de mão de obra, e espaço no canteiro de obras necessário para a atividade de produção (FIGUEREIDO, 2011).

4.5. Método de dimensionamento

4.5.1. Evolução dos métodos

Existem diferentes metodologias para o dimensionamento de pavimentos de concreto, reforçados ou não. Os trabalhos de Westergaard (1926 apud NAYAR; GETTU, 2012) propunham um método de dimensionamento baseado no limite elástico, sendo assim consideravam o pavimento suportando carregamentos até o momento que se inicia fissuração,

que seria o ponto de limite elástico. Porém tal metodologia pode resultar em espessuras excessivas e projetos antieconômicos (NAYAR; GETTU, 2012).

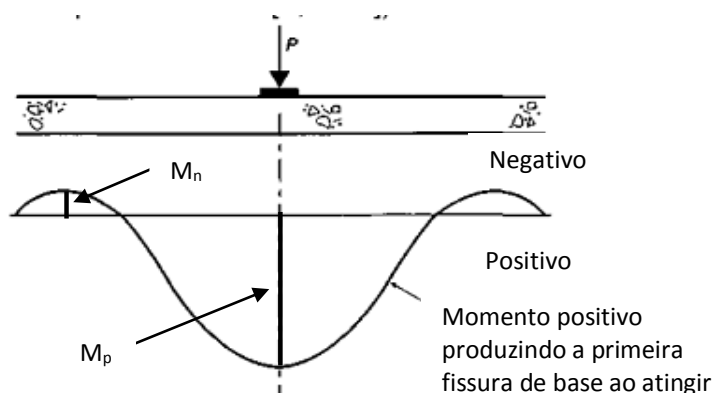
Posteriormente, Meyerhof (1962 apud NAYAR; GETTU, 2012) propôs um dimensionamento baseado na teoria da elasticidade e Lösberg (1961 apud NAYAR; GETTU, 2012) desenvolveu uma metodologia baseada no modelo das linhas de ruptura (*yield line theory*). Tais estudos preveem que o pavimento trabalhe no limite do regime plástico, considerando uma redistribuição das tensões após o aparecimento de fissuras (RODRIGUES, 2006). Tal método é bastante condizente para o caso do concreto reforçado com fibras de aço, já que após a fissuração o concreto continua a suportar carregamentos, graças à ação das fibras.

4.5.2. Método de Nayar e Gettu

Nayar e Gettu (2012), baseados nestes estudos mais recentes, desenvolveram uma metodologia para o dimensionamento de pavimentos de concreto reforçados com fibras. Tal procedimento foi desenvolvido pensando justamente em atender países em desenvolvimento, uma vez que utiliza os resultados de ensaios de tração na flexão tecnicamente mais simples, como o JSCE-SF4 (1984), utilizado nesse trabalho.

Como já citado no item 4.3.1 e mencionado no item 4.3.3, o pavimento está submetido a cargas estáticas e variações de temperatura. Tais ações geram esforços de flexão, implicando numa distribuição de momentos, como se observa na Figura 4.5.2.1.

Figura 4.5.2.1. Distribuição de momentos em um pavimento de concreto com início de fissuração.



Adaptado de: THE CONCRETE SOCIETY, 2003.

No caso da Figura 4.5.2.1, temos uma placa com uma carga P aplicada no meio dela. Quando a carga P atinge um valor limite, tal que o momento solicitante positivo (M_p) atinge o momento de plastificação do CRFA, a tensão solicitante chegará ao valor da resistência à tração do concreto, levando ao início da fissuração na face inferior.

A partir desse momento, o comportamento do concreto passa a ser regulado pelo regime plástico. Ocorre, então, uma redistribuição de esforços e a resistência à tração na região fissurada agora é limitada pela resistência das fibras aderidas ao concreto ($f_{sfk,fl}$). Como a face superior se mantém intacta no momento de início da fissuração da face inferior, esta ainda se encontra no regime elástico e, assim, a tensão resistente será dada pela própria resistência do concreto ($f_{ctk,fl}$), que resiste ao momento solicitante negativo (M_n).

A capacidade residual pós-fissuração de resistir ao momento positivo (M_p), dado pela Equação 4.5.2.1, passa a depender da resistência à tração equivalente do CRFA ($f_{sfk,fl}$), que é o valor da resistência à tração equivalente para a deformação de $L/150$. Já o trecho submetido ao momento negativo (M_n) não sofre fissuração, logo sua capacidade de resistir ao momento se mantém a mesma, sendo limitada pela resistência à tração na flexão, e é dada pela Equação 4.5.2.2. O momento a ser resistido (M_o) representa a variação entre o momento máximo negativo e positivo e é definido pela soma de M_p e M_n , como mostra a Equação 4.5.2.3, sendo que dela é possível obter o valor necessário de $f_{sfk,fl}$ pela Equação 4.5.2.4.

$$\text{Equação 4.5.2.1} \quad M_p = \frac{f_{sfk,fl}}{\gamma_c} \cdot \frac{h^2}{6}$$

$$\text{Equação 4.5.2.2} \quad M_n = \frac{f_{ctk,fl}}{\gamma_c} \cdot \frac{h^2}{6}$$

$$\text{Equação 4.5.2.3} \quad M_o = M_p + M_n = \left(\frac{f_{ctk,fl}}{\gamma_c} + \frac{f_{sfk,fl}}{\gamma_{sf}} \right) \cdot \frac{h^2}{6}$$

$$\text{Equação 4.5.2.4} \quad f_{sfk,fl} = \left(\frac{6 \cdot M_o}{h^2} - \frac{f_{ctk,fl}}{\gamma_c} \right) \cdot \gamma_{sf}$$

Onde:

- M_p , M_n e M_o : momentos positivo, negativo e limite para um metro de pavimento, respectivamente (N.m/m);
- $f_{ctk,fl}$: resistência à tração do concreto (MPa);
- $f_{sfk,fl}$: resistência à tração equivalente do CRFA, para a deformação de $L/150$ (MPa);

- γ_c : coeficiente de segurança de $f_{ctk,fl}$;
- γ_{sf} : coeficiente de segurança de $f_{sfk,fl}$; e
- h : espessura do pavimento (mm).

Assim, a partir do carregamento e da espessura de projeto, define-se uma dosagem adequada para o concreto com agregado graúdo reciclado reforçado com fibras de aço para obter o valor de $f_{e,3}$, através de um ensaio de tração na flexão em 4 pontos, que seja maior ou igual ao valor requerido para $f_{sfk,fl}$, calculado com a Equação 4.5.2.4. O valor de $f_{e,3}$ é referente a tensão equivalente aplicada em um corpo de prova para a deformação limite de $L/150 = 3$ mm, onde L é o vão de ensaio.

5. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO TEOR DE FIBRAS NO CRFA

A seguir, será apresentado o estudo realizado para avaliar a influência do teor de fibras no comportamento do CRFA com agregado natural e reciclado, de modo a obter resultados que possibilitaram a comparação entre os pavimentos dimensionados.

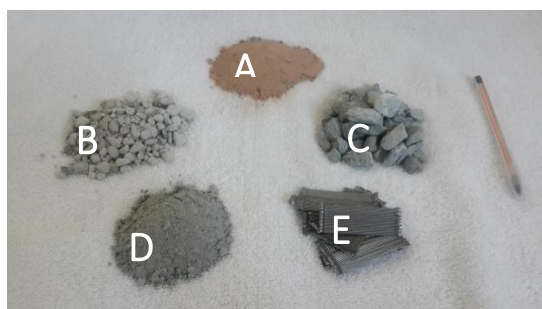
5.1. Materiais utilizados

5.1.1. Materiais para a matriz de concreto

Para a produção da matriz de concreto foram utilizados os seguintes materiais (Figura 5.1.1.1): cimento CP II-E-40, areias de quartzo e artificial, como agregados miúdos, brita 1 e ARC como agregados graúdos e aditivo polifuncional MasterGlenium 310®, composto por policarboxilato modificado com ação redutora de água.

Os materiais foram fornecidos e caracterizados pela Votorantim Cimentos. No Quadro 5.1.1.1 estão apresentadas as descrições e características principais dos agregados utilizados, enquanto a Figura 5.1.1.2 e a Figura 5.1.1.3 apresentam as composições granulométricas deles.

Figura 5.1.1.1. Materiais utilizados nos concretos: A - areia de quartzo, B - agregado reciclado de concreto, C - brita 1, D - areia artificial e E - fibras de aço.



Quadro 5.1.1.1. Características dos materiais utilizados na matriz de concreto.

Propriedades	Areia de quartzo	Areia artificial	Brita 1	ARC
Módulo de finura	1,21	3,49	6,96	5,31
Diâmetro máximo (mm)	0,60	6,30	25,00	9,50
Massa específica (g/cm³)	2,66	2,67	2,65	2,36
Absorção de água (%)	-	-	0,17	5,82
Material passante na peneira 75 mm (%)	1,41	11,78	0,44	1,45

Figura 5.1.1.2. Composição granulométrica dos agregados graúdos.

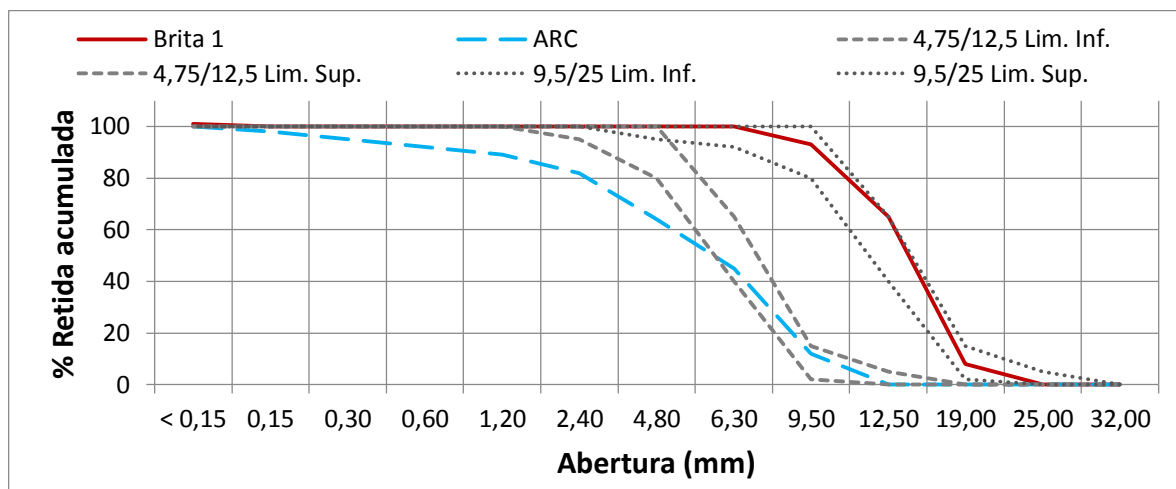
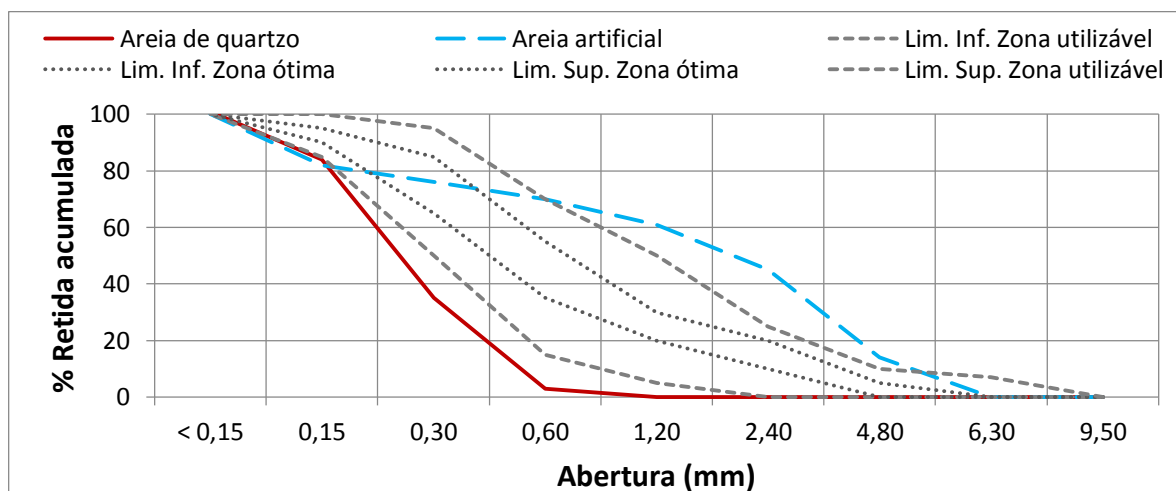


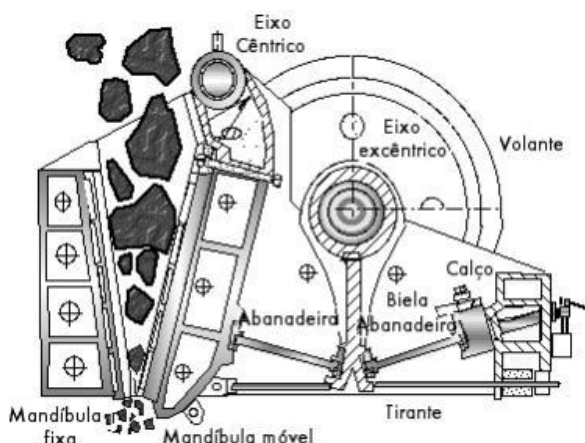
Figura 5.1.1.3. Composição granulométrica dos agregados miúdos.



O agregado reciclado de concreto disponibilizado tem sua origem ligada a resíduos gerados na própria produção do concreto na central dosadora, assim como as sobras dos caminhões-betoneiras estão ligadas a concreto retornados por clientes.

Para o tratamento do resíduo e consequente produção deste agregado, a planta da usina apresenta um britador de mandíbula. Este britador é composto por duas mandíbulas, uma fixa e uma oscilante, ligado a um eixo excêntrico. O material é fragmentado por compressão, pelo movimento da mandíbula oscilante contra a fixa – como se vê na Figura 5.1.1.4 – e vai ficando continuamente menor à medida que desce ao fundo da máquina.

Figura 5.1.1.4. Ilustração de um britador de mandíbula



Extraído de: NEVES, 2005.

O britador de mandíbula apresenta a vantagem da alta eficiência mecânica, pois quase a totalidade da potência é dirigida para a trituração, uma vez também que o movimento de oscilação é único. Segundo Jadovski (2006), além deste benefício, o volume de resíduos que consegue receber possibilita alta capacidade de trabalho para geração do agregado – atendendo a demanda local. Como maior desvantagem, está o alto desgaste à abrasão no contato com o agregado, que leva a manutenções constantes no equipamento e influência nos custos indiretos ligados à produção.

5.1.2. Fibras de aço

As fibras utilizadas foram as fibras de aço Dramix® do tipo AI com fator de forma 80, 60 mm de comprimento e resistência mínima à tração de 1100 MPa (Figura 5.1.2.5). A caracterização foi realizada com uma amostra de 60 fibras, seguindo-se os critérios da norma ABNT NBR 15530 (2007), que define as exigências quanto ao diâmetro e comprimento (Figura 5.1.2.6), defeitos (oxidação superficial, ausência de ancoragem, etc.) e resistência ao dobramento (Figura 5.1.2.7).

Os resultados da caracterização das fibras de aço, apresentados no APÊNDICE A, indicaram haver uma não conformidade com relação aos dois valores de diâmetro medidos em posições perpendiculares entre si. Apesar disso, todos os outros parâmetros estão dentro das tolerâncias normativas.

Figura 5.1.2.5. Fibra de aço utilizada no trabalho.



Figura 5.1.2.6. Verificação geométrica da fibra de aço.



Figura 5.1.2.7. Ensaio de dobramento da fibra de aço.



5.2. Estudo de dosagem

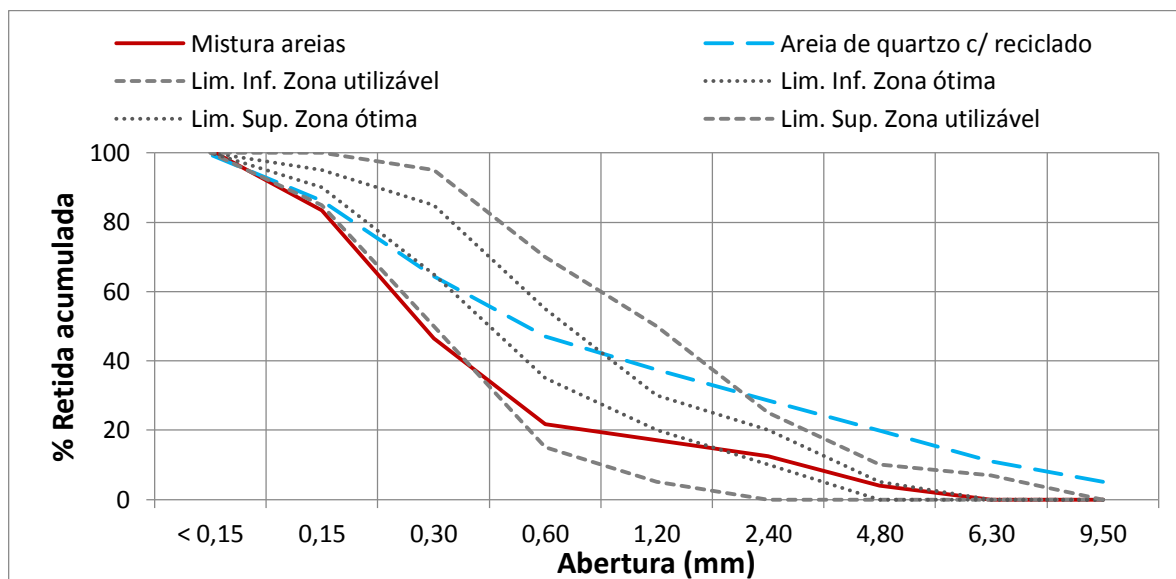
5.2.1. Dosagem da matriz de concreto

Para a moldagem dos corpos de prova de CRFA com o agregado natural, adotou-se o traço, fornecido pela Votorantim Cimentos, para obtenção de um concreto com f_{ck} de 35 MPa, e para a moldagem com o agregado reciclado, fez-se um estudo de dosagem, com base nesse traço e na composição granulométrica do agregado reciclado, de modo a substituir toda a brita 1, a areia artificial e parte da areia de quartzo também.

Para isso, verificou-se a porcentagem acumulada de ARC retida na peneira com abertura de 4,80 mm (cerca de 64%, em massa), e igualou-se esta quantidade de material mais grosso com a massa de brita 1 necessária para produzir 1 m³ de concreto. Em seguida, calculou-se a quantidade de ARC necessário para atender a este montante de agregado mais grosso e descontou-se o último para obter a massa de finos que estaria presente. Das quantidades de areia, primeiramente da artificial e depois da de quartzo, foi descontado este valor de finos, determinando-se a massa de areia de quartzo restante, necessária para completar a parcela de agregado miúdo do traço original.

Assim, as composições granulométricas do agregado miúdo, resultante das misturas das areias e do ARC estão apresentadas na Figura 5.2.1.1.

Figura 5.2.1.1. Composições granulométricas dos agregados miúdos resultantes.



Para compensar a absorção de água do ARC, foi adicionada uma quantidade de água suficiente para saturá-lo, sem que o fator a/c efetivo sofresse alterações. Assim, os traços, em massa, utilizados para a produção dos concretos foram os seguintes:

- Para o concreto com agregado natural: 1:1,55:0,60:2,80:0,48 (cimento, areia de quartzo, areia artificial, brita 1 e relação a/c), com 0,66% de aditivo plastificante redutor de água; e
- Para o concreto com agregado reciclado: 1:0,57:4,37:0,48 (cimento, areia de quartzo, agregado reciclado e relação a/c), com 0,66% de aditivo plastificante redutor de água.

5.2.2. Dosagem das fibras de aço

Segundo Pietra (2005), teores de fibras de 40 kg/m³ geram um ganho de desempenho no concreto com agregados graúdos reciclados de forma a se aproximar do convencional, como já foi explicado no item 3.8. Porém, como o fator de forma das fibras utilizadas neste trabalho será maior em relação ao utilizado no estudo de referência, foi necessário realizar um estudo de dosagem de fibras para determinação do teor ótimo.

Assim, foram moldados e ensaiados corpos de prova com teores de 20, 35 e 50 kg/m³ para cada traço apresentado no item 5.2.1, de forma a obter curvas de correlação entre a resistência residual e o teor de fibras, sobre as quais foram determinados os teores ótimos de fibra para cada pavimento-protótipo dimensionado, de acordo com seu nível de solicitação.

5.3. Moldagem e cura dos corpos de prova

Para os ensaios de resistência à compressão axial, módulo de elasticidade e absorção de água por imersão foram utilizados corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm. Para o ensaio de resistência à tração na flexão, utilizaram-se corpos de prova prismáticos de seção quadrada (15 cm x 15 cm) e comprimento de 50 cm. No total, foram moldados, para cada traço, 11 corpos de prova cilíndricos e 5 prismáticos.

A pesagem e separação dos materiais, o ensaio de abatimento de tronco de cone e a moldagem dos corpos de prova foram realizados em um dos laboratórios de uma das usinas de dosagem de concreto da Votorantim Cimentos, como pode ser observado nas fotos da Figura 5.2.2.1 à Figura 5.2.2.4.

A mistura dos materiais na betoneira seguiu o procedimento abaixo:

- 1º) Adição dos agregados graúdo e miúdo com metade da água;
- 2º) Adição do cimento com o restante da água e do aditivo;
- 3º) Adição das fibras de aço;
- 4º) Homogeneização por cerca de 5 minutos.

Figura 5.2.2.1. Materiais separados para as moldagens.



Figura 5.2.2.2. Adição das fibras de aço ao concreto.



Figura 5.2.2.3. Execução do ensaio de abatimento de tronco de cone.



Figura 5.2.2.4. Corpos de prova moldados e identificados.



Após a mistura dos materiais, o concreto foi deixado descansando por cerca de 30 minutos para a medição do abatimento, depois, misturado por mais 5 minutos e, então, foi realizada a moldagem dos corpos de prova.

Os abatimentos médios obtidos para os traços produzidos estão apresentados na Tabela 5.2.2.1. Nota-se que, em geral, houve uma perda no abatimento com o aumento do teor de fibras, que refletiu na perda de trabalhabilidade do concreto no estado fresco. Além disso, esperava-se uma perda no abatimento devido ao agregado reciclado, fato que não ocorreu, provavelmente porque houve uma compensação provocada pelo incremento de água para cobrir a absorção do reciclado.

Tabela 5.2.2.1. Abatimentos médios obtidos para cada traço.

Tipo de agregado graúdo	Teor de fibras (kg/m ³)	Abatimento médio (mm)
Natural	20	140,0
	35	95,0
	50	82,5
Reciclado	20	165,0
	35	90,0
	50	102,5

Os corpos de prova cilíndricos foram adensados de forma manual, com uso de haste metálica, e os prismáticos de forma vibratória, com uso de mesa vibratória. A mesa vibratória foi utilizada com os corpos de prova prismáticos para evitar que os resultados do ensaio de

tração na flexão sofressem com o direcionamento das fibras de aço que poderia ser provocado pelo adensamento manual, como constatado por Figueiredo, Mourad e Carvalho (2000).

A cura ocorreu em câmara úmida até a idade programada para cada ensaio.

5.4. Metodologia dos ensaios

5.4.1. Resistência à compressão axial

A determinação da resistência à compressão dos corpos de prova produzidos foi realizada segundo a norma ABNT NBR 5739 (1980), que determina que a velocidade de carregamento dos corpos de prova seja mantida constante no valor de $(0,45 \pm 0,15)$ MPa/s.

Tendo em mente a necessidade de liberação dos pavimentos, o mais cedo possível, para o tráfego de veículos, esse ensaio foi realizado nas idades de 3, 7, 14 e 28 dias. Foram ensaiados 2 corpos de prova de cada traço para cada idade, exceto na de 28 dias, devido à pequena variabilidade prevista para os resultados desse ensaio. Para a idade de 28 dias, foi ensaiado apenas 1 corpo de prova de cada traço, dado que a pequena variabilidade dos resultados se confirmou nos ensaios anteriores ($CV < 11\%$).

5.4.2. Resistência à tração na flexão

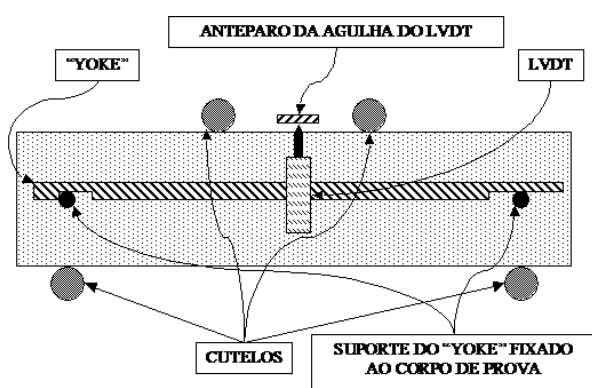
Os ensaios de tração na flexão fornecem as resistências residuais e a tenacidade do CRFA. Diversos métodos de ensaio foram desenvolvidos para medir estes valores, dentre eles o JSCE-SF4 (1984), proposto pela *Japan Society of Civil Engineers*, e o ASTM C1609 (2010), pela *American Society for Testing and Materials*.

Estes dois ensaios são muito semelhantes, sendo o método americano uma variante do método japonês. A diferença principal entre os métodos se dá pelo tipo de sistema de controle de velocidade de deslocamento, que no método ASTM C1609 (2010) é fechado (*closed-loop*) e minimiza a instabilidade pós-pico do ensaio, enquanto que no JSCE-SF4 (1984) o sistema é aberto (*open-loop*), e está sujeito à instabilidade pós-pico. Desta forma, como constatou Bernard (2009), os resultados obtidos pelo método americano tendem a ser mais confiáveis que os obtidos pelo método japonês, devido à eliminação da instabilidade pós-pico.

Entretanto, devido à falta de equipamento adequado para a realização do método americano e, de forma a obter os parâmetros necessários no método de dimensionamento de

pavimentos de CRFA, o método japonês para este ensaio. Nesse método, o prisma é carregado em 4 pontos com controle eletrônico de deformação, por meio de um transdutor do tipo LVDT que deve ser apoiado num suporte denominado *yoke*, como o da Figura 5.4.2.1.

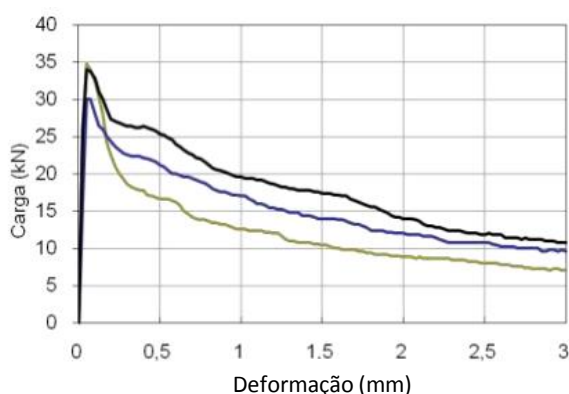
Figura 5.4.2.1. Esquema do ensaio de tração na flexão pela norma JSCE-SF4.



Extraído de: PIETRA, 2005.

O carregamento do prisma ocorre até se chegar a uma deformação de $L/150$, onde L é o comprimento do vão ensaiado. Para os corpos de prova ensaiados neste trabalho, $L = 450$ mm e, portanto, o ensaio será realizado até a deformação de 3 mm. Ao final do ensaio, obtém-se uma curva carga-deformação, semelhante ao da Figura 5.4.2.2, com a qual, determina-se a tenacidade do CRFA pela área abaixo dela.

Figura 5.4.2.2. Exemplo de curva carga-deformação obtida no ensaio de tração na flexão.



Extraído de: FIGUEIREDO; NUNES; TANESI, 2000 apud FIGUEIREDO, 2011.

Com os resultados das curvas de carga-deformação e através da Equação 5.4.2.1, apresentada no método ASTM C1609 (2010), foram calculados os valores das tensões no pico

e residuais para as deformações (δ) iguais a $L/600 = 0,75$ mm e $L/150 = 3$ mm que, segundo Salvador (2013), equivalem às deformações nos estados limites de serviço (ELS) e último (ELU). Com esses valores, foram traçadas as curvas que os correlacionam com os teores de fibra empregados.

Equação 5.4.2.1

$$f_{\delta} = \frac{P_{\delta} \cdot L}{B \cdot D^2}$$

Onde:

- f_{δ} : tensão no pico ou residual para uma deformação δ (MPa);
- P_{δ} : carga no pico ou para uma deformação δ (N);
- L : vão de ensaio (mm);
- B : largura do corpo de prova (mm); e
- D : altura do corpo de prova (mm).

Além disso, também foram calculadas as tensões equivalentes para a deformação limite (3 mm), pela Equação 5.4.2.2 e traçadas as curvas que os correlacionam com os respectivos teores de fibra empregados.

Equação 5.4.2.2

$$f_{e,\delta} = \frac{T_{\delta} \cdot L}{\delta \cdot B \cdot D^2}$$

Onde:

- $f_{e,\delta}$: tensão equivalente para uma deformação δ (MPa);
- T_{δ} : tenacidade do concreto para uma deformação δ (J);
- δ : deformação (mm);
- L : vão de ensaio (mm);
- B : largura do corpo de prova (mm); e
- D : altura do corpo de prova (mm).

Por conta da grande variabilidade nos resultados desse tipo de ensaio, foram ensaiados os 5 corpos de prova prismáticos, moldados para cada traço, na mesma idade. E, com o propósito de verificar a necessidade de uma possível moldagem adicional, esse ensaio foi realizado com 14 dias, idade suficiente para se ter uma boa avaliação do comportamento pós-fissuração do CRFA, uma vez que o maior ganho de resistência residual ocorre nas primeiras idades (até 10 dias), como mostrou o estudo de Lee et al (2013) e de Barros e Antunes (2003).

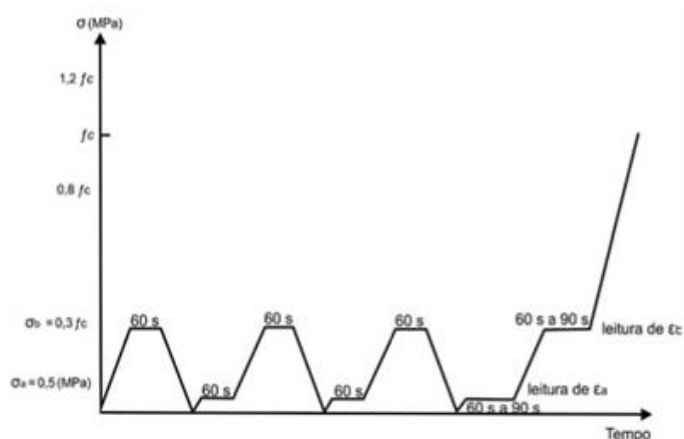
5.4.3. Módulo de elasticidade

O ensaio de módulo de elasticidade foi realizado conforme a norma ABNT NBR 8522 (2008), que define a determinação do módulo estático de elasticidade à compressão através da sequência de carregamentos representada na Figura 5.4.3.3. A velocidade de carregamento dos corpos de prova deve mantida constante no valor de $(0,45 \pm 0,15)$ MPa/s.

Nas últimas etapas de carregamento com as forças equivalentes às tensões de 0,5 MPa e de 30% da ruptura, foram feitas as leituras das deformações, obtidas com o uso de dois transdutores do tipo LVDT (*linear voltage diferencial transducer*), como pode ser observado na Figura 5.4.4.

Assim, foram ensaiados 2 corpos de prova de cada traço, para as idades de 7 e 28 dias.

Figura 5.4.3.3. Sequência de carregamento do ensaio de módulo de elasticidade.



Extraído de: ABNT NBR 8522, 2008.

Figura 5.4.4. Esquema do ensaio de módulo de elasticidade.



Os módulos de elasticidade dos CRFA foram calculados aplicando, na

Equação 5.4.3.1:

Equação 5.4.3.1

$$Ec = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \cdot 10^{-3}$$

Onde:

- Ec : módulo de elasticidade (GPa);
- σ_a e σ_b : tensões inferior e superior (MPa); e
- ε_a e ε_b : deformações específicas referentes às tensões σ_a e σ_b , respectivamente, calculadas pela Equação 5.4.3.2.

Equação 5.4.3.2

$$\varepsilon = \Delta L / L$$

Onde:

- ε : deformação específica;
- ΔL : deformação lida (mm); e
- L : altura do corpo de prova (mm).

5.4.1. Absorção de água por imersão

Para o cálculo da absorção de água por imersão do concreto, através da Equação 5.4.1.1, foram realizados os procedimentos descritos na norma ABNT NBR 9778 (2005), que define que sejam determinadas as massas dos corpos de prova após secagem em estufa e após saturação e fervura em água.

Este ensaio foi realizado com 2 corpos de prova cilíndricos para cada traço, na idade de 28 dias.

Equação 5.4.1.1

$$A = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \cdot 100\%$$

Onde:

- A : absorção de água por imersão (%);

- M_{sat} : massa da amostra saturada (imersa em água apenas ou seguida de fervura) com superfície seca (g); e
- M_s : massa da amostra seca em estufa (g).

5.5. Resultados dos ensaios

5.5.1. Resistência à compressão

Os valores medidos para cada corpo de prova estão apresentados no APÊNDICE B e no APÊNDICE C, e representados na Figura 5.5.1.1 a Figura 5.5.1.4.

Figura 5.5.1.1. Resistência à compressão na idade de 3 dias.

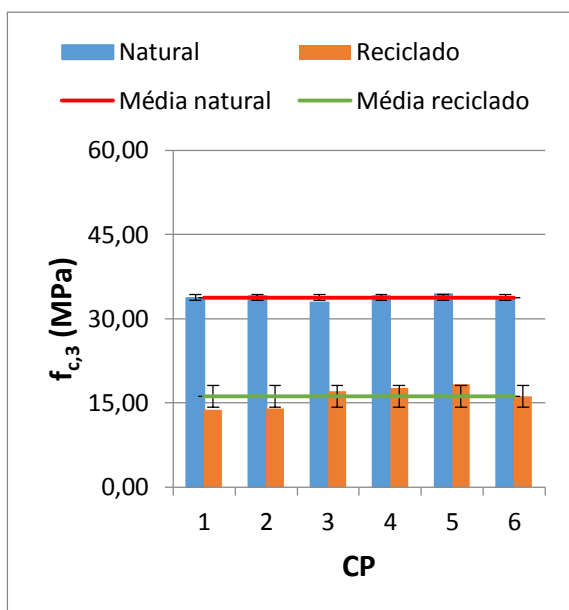


Figura 5.5.1.2. Resistência à compressão na idade de 7 dias.

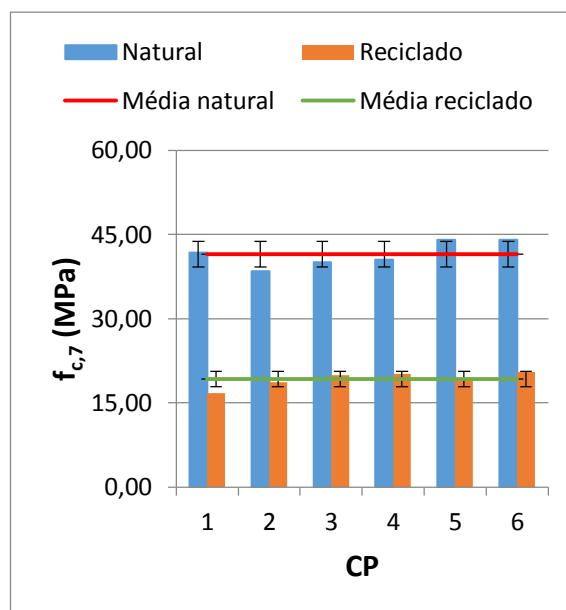


Figura 5.5.1.3. Resistência à compressão na idade de 14 dias.

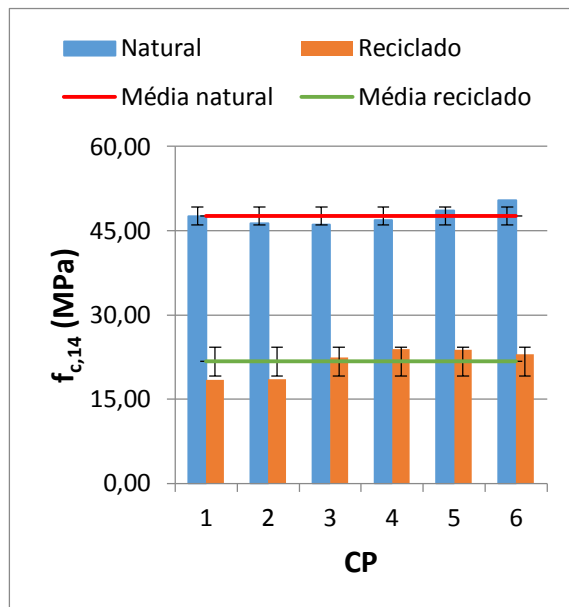
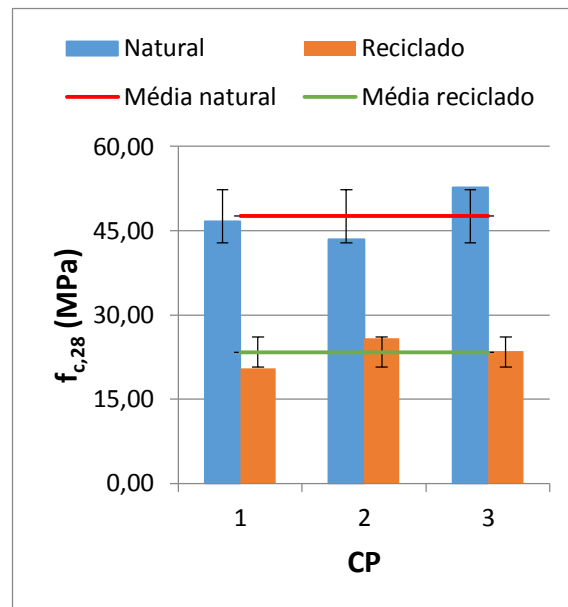


Figura 5.5.1.4. Resistência à compressão na idade de 28 dias.



Os resultados médios obtidos no ensaio de resistência à compressão estão apresentados na Tabela 5.5.1.1.

Tabela 5.5.1.1. Resumo dos resultados de resistência à compressão axial.

Idade (dias)	Agregado natural			Agregado reciclado			Relação Reciclado/Natural
	f_c (MPa)	CV	Δf_c (%)	f_c (MPa)	CV	Δf_c (%)	
3	33,76	1,36%	-	16,16	10,86%	-	47,86%
7	41,47	4,96%	22,85%	19,21	6,61%	18,87%	46,31%
14	47,65	3,11%	14,89%	21,68	10,64%	12,91%	45,51%
28	47,59	8,06%	-0,12%	23,34	9,38%	7,64%	49,04%

Pela análise dos valores de resistência à compressão e de coeficiente de variação (CV), pode-se afirmar que os resultados obtidos são bastante consistentes. Nota-se, também, que tanto para o CRFA com agregado natural, quanto para com o reciclado, houve uma redução do ganho de resistência com o avanço da idade, como era esperado. Além disso, é interessante observar que a relação entre a resistência do CRFA com agregado reciclado e a do natural é praticamente constante e próxima de 50%.

5.5.2. Resistência à tração na flexão

Os resultados obtidos para cada corpo de prova nos ensaios de tração na flexão estão apresentados no APÊNDICE D e APÊNDICE E, e representados na Figura 5.5.2.5 a Figura 5.5.2.16.

Figura 5.5.2.5. Resistência à tração para o teor de 20 kg/m³.

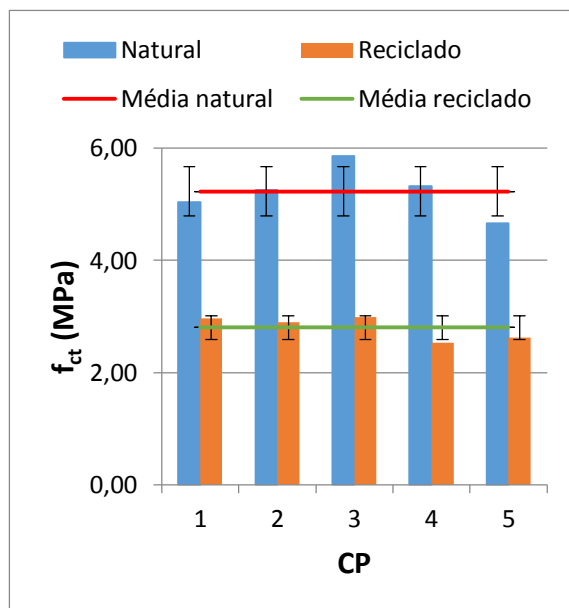


Figura 5.5.2.6. Resistência residual na deformação de 0,75 mm para o teor de 20 kg/m³.

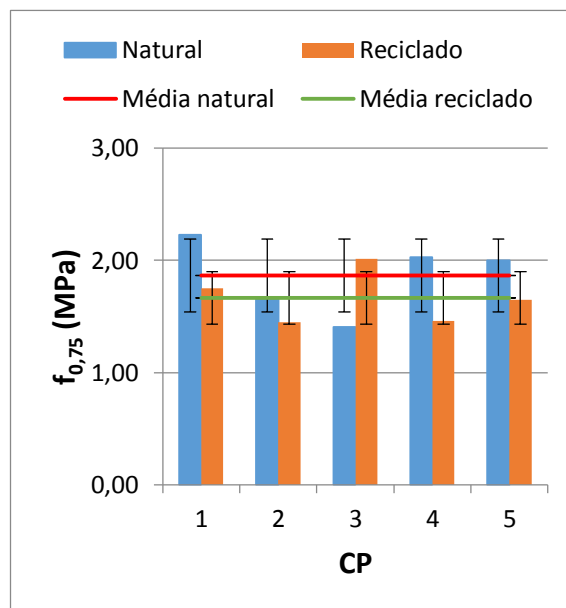


Figura 5.5.2.7. Resistência residual na deformação de 3,0 mm para o teor de 20 kg/m³.

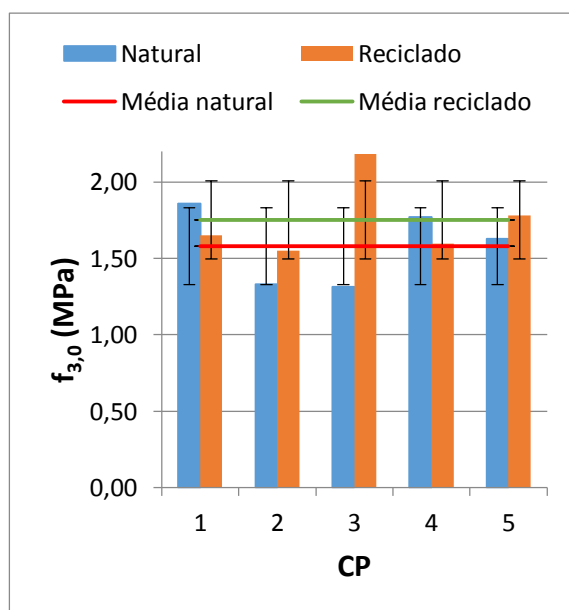


Figura 5.5.2.8. Resistência equivalente para o teor de 20 kg/m³.

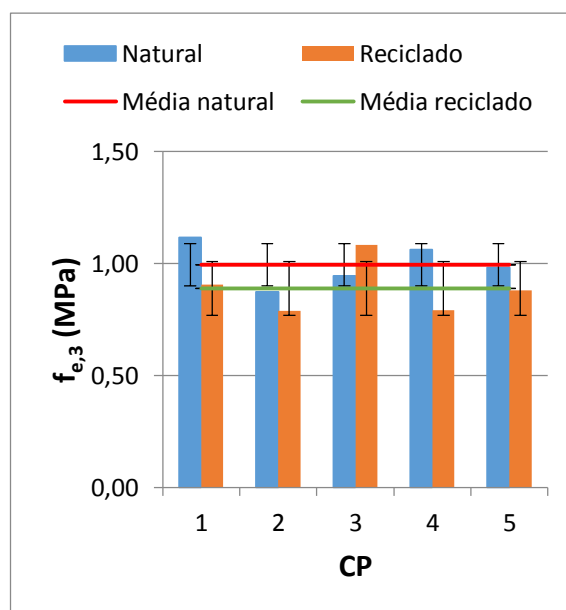


Figura 5.5.2.9. Resistência à tração para o teor de 35 kg/m³.

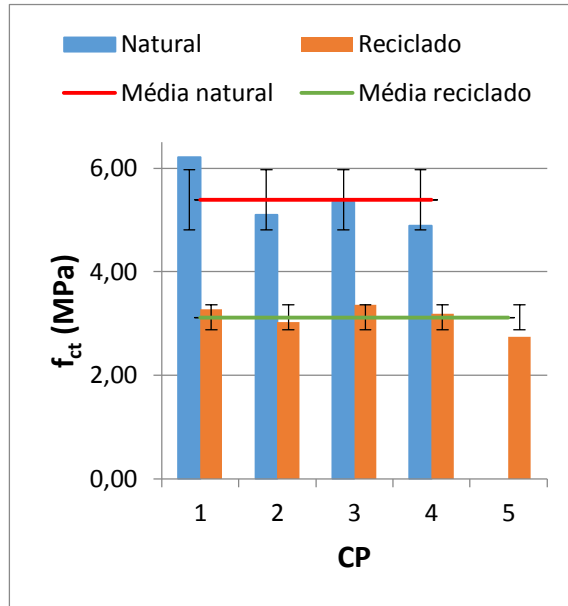


Figura 5.5.2.10. Resistência residual na deformação de 0,75 mm para o teor de 35 kg/m³.

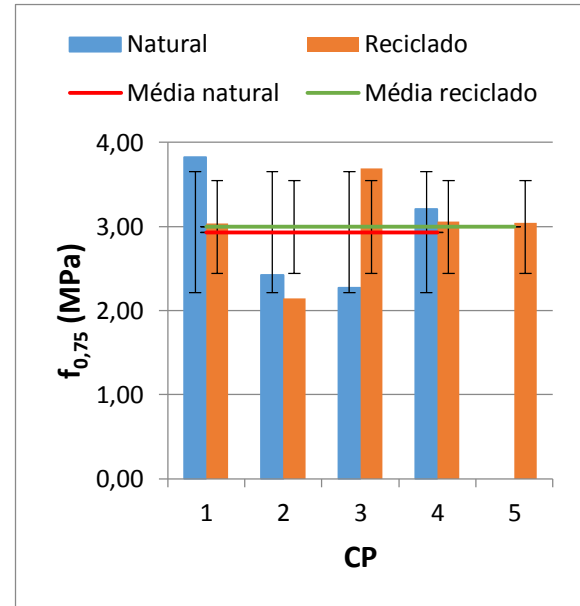


Figura 5.5.2.11. Resistência residual na deformação de 3,0 mm para o teor de 35 kg/m³.

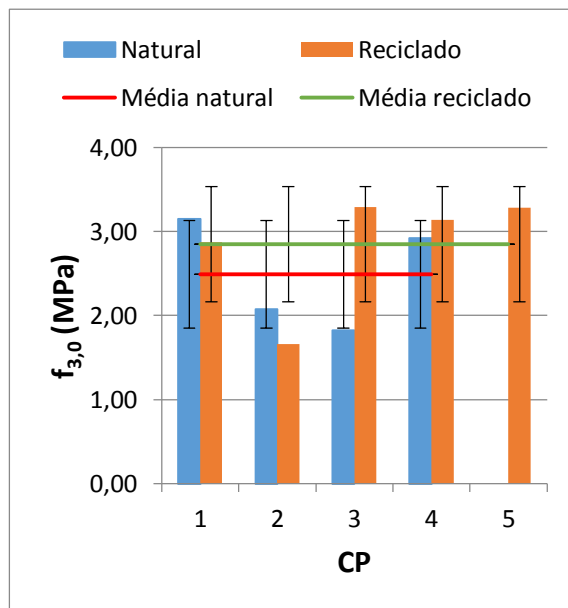


Figura 5.5.2.12. Resistência equivalente para o teor de 35 kg/m³.

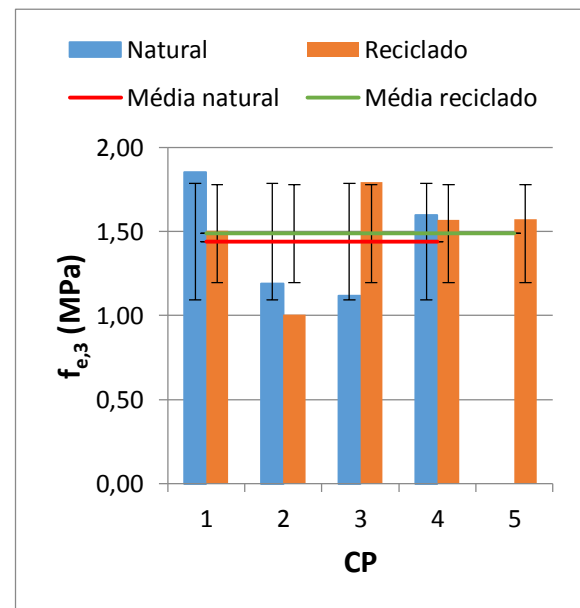


Figura 5.5.2.13. Resistência à tração para o teor de 50 kg/m³.

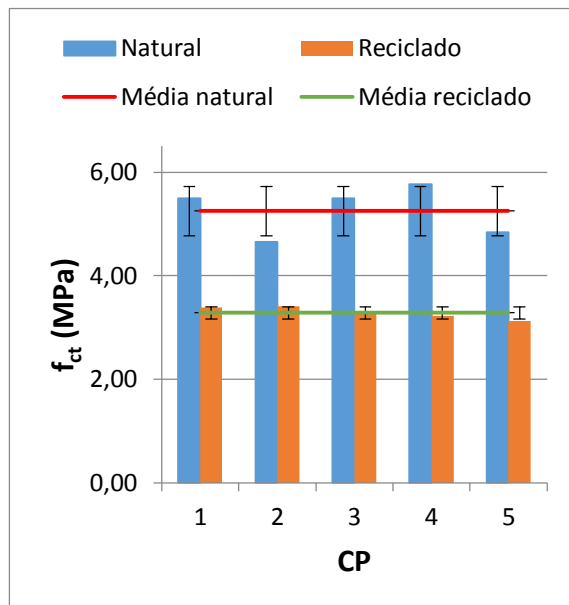


Figura 5.5.2.14. Resistência residual na deformação de 0,75 mm para o teor de 50 kg/m³.

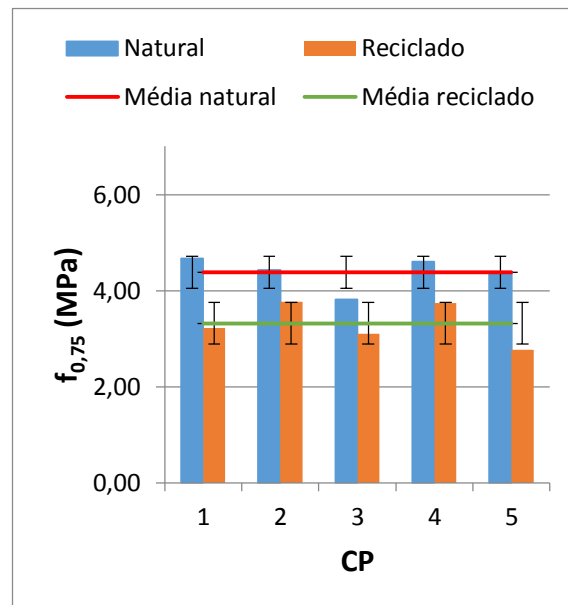


Figura 5.5.2.15. Resistência residual na deformação de 3,0 mm para o teor de 50 kg/m³.

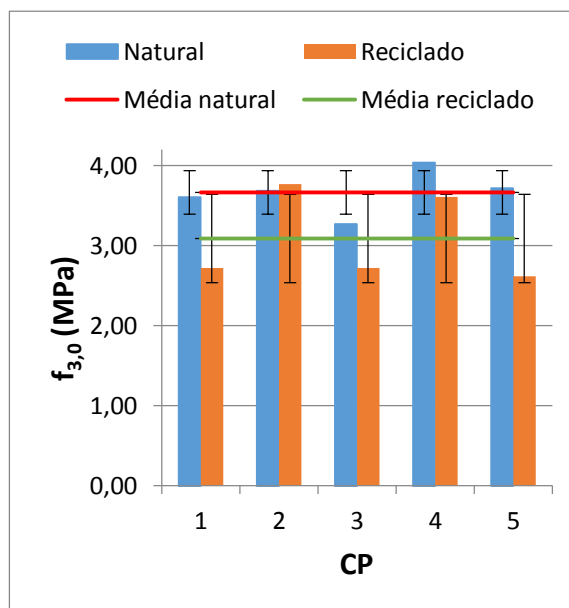
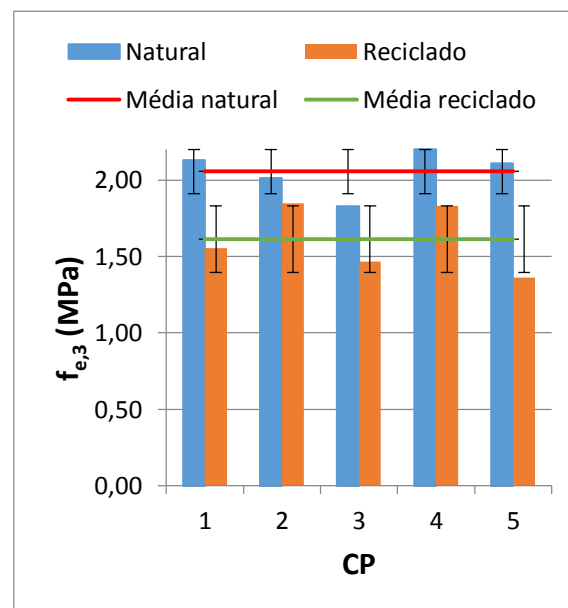


Figura 5.5.2.16. Resistência equivalente para o teor de 50 kg/m³.



Um resumo dos resultados obtidos das tensões para o CRFA com agregado natural está apresentado na Tabela 5.5.2.2 e, na Tabela 5.5.2.3, está apresentado o resumo para o CRFA com agregado reciclado. A comparação feita entre esses resultados está apresentada na Tabela 5.5.2.4. É importante destacar que foi eliminado o resultado obtido para o corpo de prova 35N-

4, pois apresentou resultados muito acima dos demais, sendo algo que prejudicaria a avaliação geral dos resultados.

Tabela 5.5.2.2. Resumo dos resultados tensões de pico, residual e equivalente para o CRFA com agregado natural.

Teor de fibras (kg/m³)	f_{ct} (MPa)	CV	$f_{0,75}$ (MPa)	CV	$f_{3,0}$ (MPa)	CV	$f_{e,3}$ (MPa)	CV
20	5,23	7,52%	1,87	15,73%	1,58	14,21%	0,99	8,57%
35	5,39	9,35%	2,93	21,34%	2,49	22,32%	1,44	20,80%
50	5,25	8,15%	4,38	6,80%	3,66	6,69%	2,06	6,24%

Tabela 5.5.2.3. Resumo dos resultados tensões de pico, residual e equivalente para o CRFA com agregado reciclado.

Teor de fibras (kg/m³)	f_{ct} (MPa)	CV	$f_{0,75}$ (MPa)	CV	$f_{3,0}$ (MPa)	CV	$f_{e,3}$ (MPa)	CV
20	2,80	6,76%	1,67	12,59%	1,75	13,07%	0,89	12,05%
35	3,12	6,96%	3,00	16,47%	2,85	21,49%	1,49	17,51%
50	3,28	3,19%	3,32	11,54%	3,09	16,05%	1,61	12,10%

Tabela 5.5.2.4. Comparação entre os resultados do CRFA com agregado reciclado e natural.

Teor de fibras (kg/m³)	f_{ct}	$f_{0,75}$	$f_{3,0}$	$f_{e,3}$
20	53,57%	89,25%	110,86%	89,39%
35	57,82%	102,11%	114,35%	103,43%
50	62,54%	75,84%	84,27%	78,41%

As curvas de correlação entre os resultados citados acima e seus respectivos teores de fibra estão apresentadas na Figura 5.5.2.17 a Figura 5.5.2.20.

Figura 5.5.2.17. Correlação entre f_{ct} e teor de fibras.

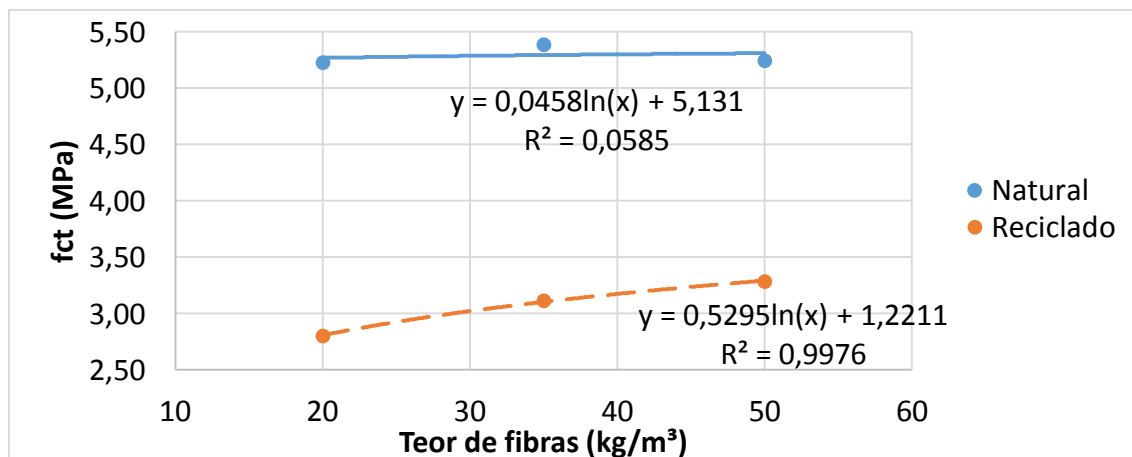


Figura 5.5.2.18. Correlação entre $f_{0,75}$ e teor de fibras.

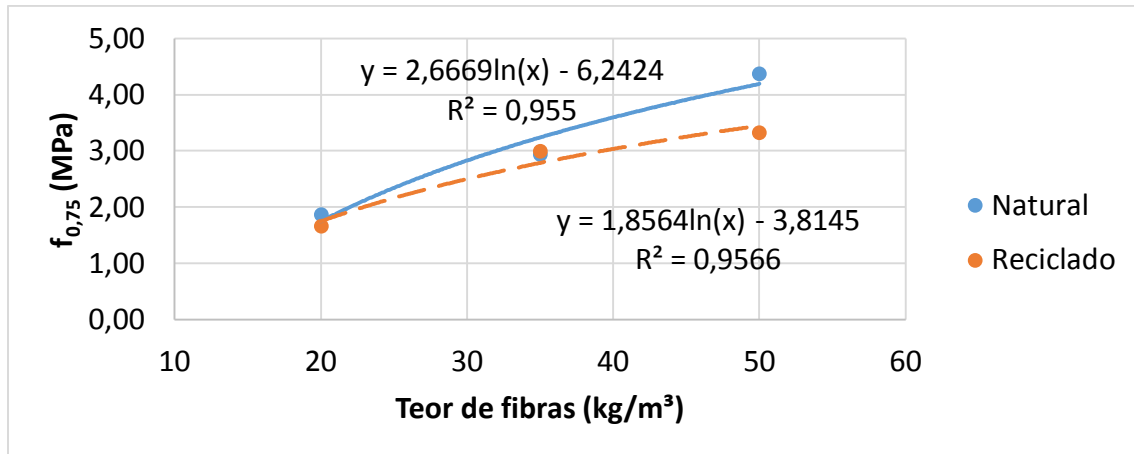


Figura 5.5.2.19. Correlação entre $f_{3,0}$ e teor de fibras.

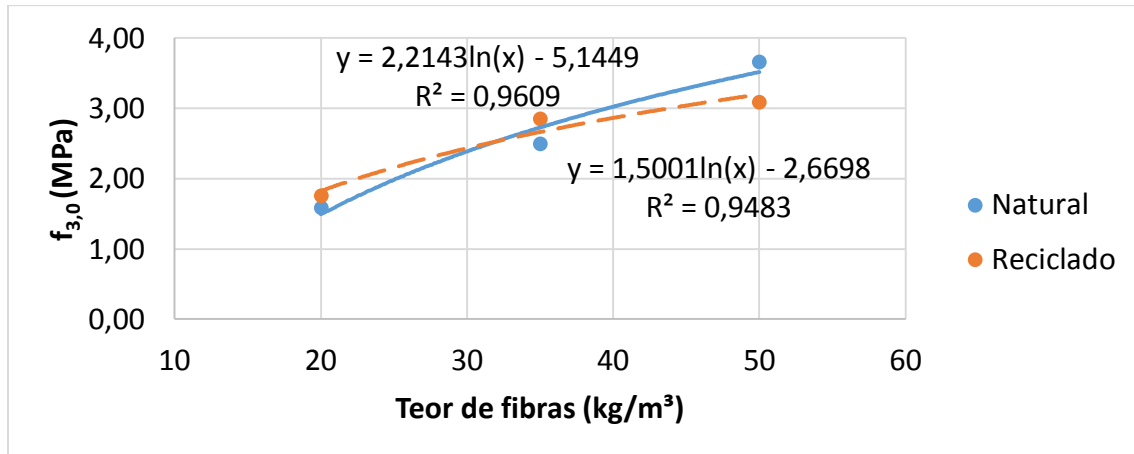
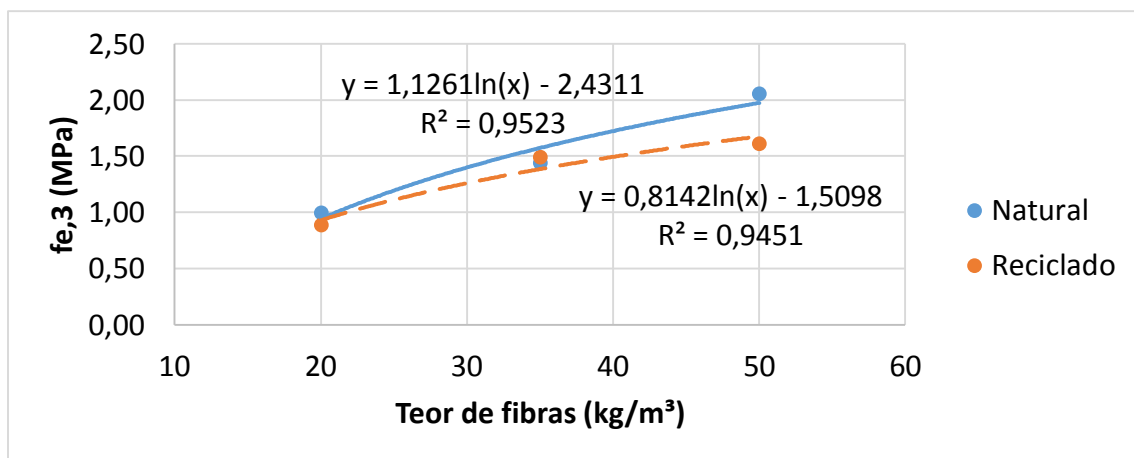


Figura 5.5.2.20. Correlação entre $f_{e,3}$ e teor de fibras.



Observa-se que os gráficos da Figura 5.5.2.17 a Figura 5.5.2.20 indicam um bom ajuste das curvas de correlação entre os resultados de tensões e seus teores de fibra, exceto para a curva de resistência à tração do CRFA com agregado natural.

Pela análise das resistências à tração dos CRFA (f_{ct}), percebe-se que, para aquele com agregado natural, as fibras não influenciam nos resultados, enquanto que, para o com agregado reciclado, quanto maior o teor de fibras, maior a resistência. Além disso, os valores de f_{ct} do CRFA com agregado reciclado corresponderam a mais de 50% daqueles obtidos com o concreto convencional.

Com relação aos valores das tensões residuais, o comportamento dos CRFA é mais próximo no ELU do que no ELS. Isso se deve, provavelmente, à maior influência das fibras com o aumento da fissuração da matriz de concreto.

Outro fato interessante, é a equivalência, apresentada na Tabela 5.5.2.4, entre os valores de $f_{0,75}$, $f_{3,0}$ e $f_{e,3}$ obtidos para os dois tipos de concreto, que foi superior a 76%. Assim, é possível determinar um mesmo teor ótimo de fibras para o valor de $f_{e,3}$ requerido no dimensionamento dos dois pavimentos-protótipo.

5.5.3. Módulo de elasticidade

Os resultados estão apresentados no APÊNDICE F e no APÊNDICE G, e representados na Figura 5.5.3.21 e Figura 5.5.3.22, e a Tabela 5.5.3.5 apresenta um resumo com os valores obtidos nesses cálculos.

Tabela 5.5.3.5. Resumo dos resultados de módulo de elasticidade.

Idade (dias)	Agregado natural			Agregado reciclado			Relação Reciclado/Natural
	E_c (GPa)	CV	ΔE_c (%)	E_c (GPa)	CV	ΔE_c (%)	
7	36,64	3,11%	-	19,18	9,88%	-	52,35%
28	37,47	4,47%	2,28%	20,54	6,97%	7,09%	54,81%

Figura 5.5.3.21. Módulo de elasticidade na idade de 7 dias.

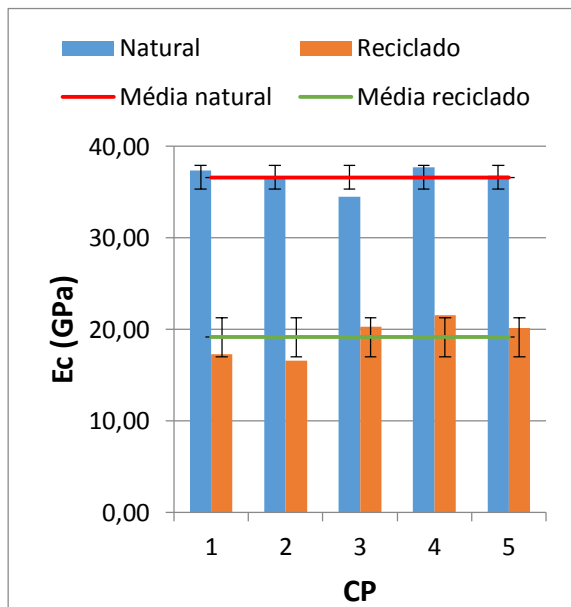
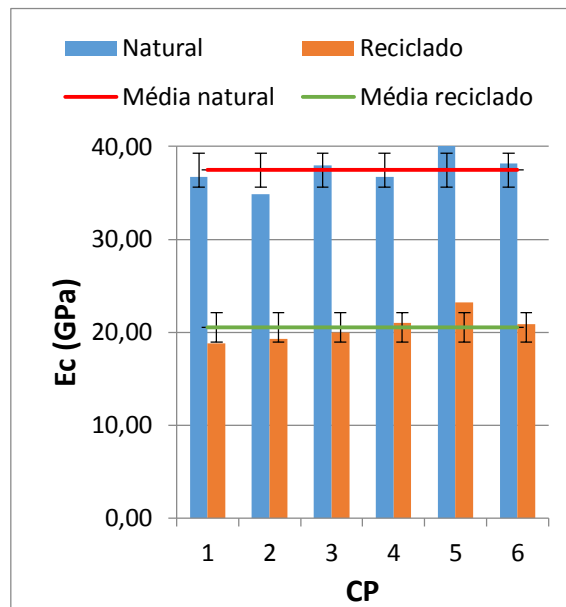


Figura 5.5.3.22. Módulo de elasticidade na idade de 28 dias.



Através da análise dos valores apresentados na Tabela 5.5.3.5, nota-se que, mais uma vez, houve redução de cerca de 50% do valor de módulo de elasticidade do CRFA com agregado natural para o com reciclado.

Além disso, pode-se afirmar, pelos valores de CV obtidos, que não há influência do teor de fibras na avaliação do módulo de elasticidade.

5.5.4. Absorção de água por imersão

Os resultados deste ensaio estão apresentados no APÊNDICE H, com um resumo na Tabela 5.5.4.6.

Tabela 5.5.4.6. Resumo dos resultados de absorção por imersão.

Tipo de agregado	A (%)	CV	ρ (kg/m ³)	CV
Natural	4,60	6,51%	2350,79	2,45%
Reciclado	13,10	9,58%	1968,29	3,33%

Pelos resultados obtidos, percebe-se que o CRFA com agregado reciclado apresenta uma absorção de água de cerca de três vezes àquela apresentada pelo CRFA com agregado natural e uma massa específica cerca de 20% menor. Essa elevada taxa de absorção e a reduzida massa

específica indicam um volume de vazios mais alto, isto é, elevada porosidade, que é um dos fatores que influenciam negativamente na resistência à compressão e à tração e no módulo de elasticidade (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Assim, pode-se dizer que, a porosidade do ARC refletiu na redução, em cerca de 50%, dos resultados mecânicos no concreto produzido com ele, como já era esperado.

6. PAVIMENTO-PROTÓTIPO

Os pavimentos-protótipo foram avaliados mecanicamente através dos esforços solicitantes obtidos com o uso do software de análise EverFE® versão 2.25. O EverFE® é um programa de análise 3D que utiliza elementos finitos para simular o comportamento de placas de concreto, calculando as tensões e deformações causadas por esforços externos ou variações térmicas.

A seguir, são apresentados os parâmetros de entrada do programa e os resultados de saída.

6.1. Cálculo das tensões solicitantes

6.1.1. Características do veículo

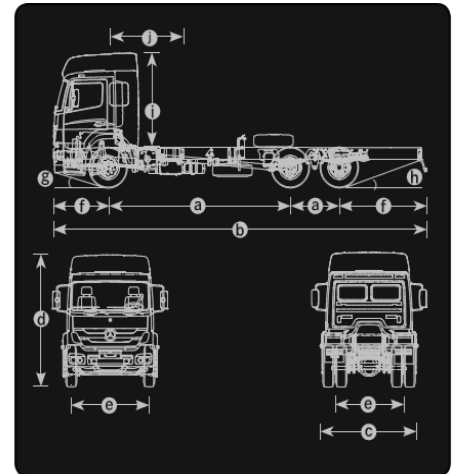
O veículo-tipo utilizado neste trabalho foi um caminhão modelo Mercedes-Benz® Atego 2426/36®. As dimensões do veículo-tipo (Figura 6.1.1.1) foram extraídas do catálogo fornecido no site da montadora e um resumo delas é apresentado na Figura 6.1.1.1.

Já a Figura 6.1.1.2 e Figura 6.1.1.3 mostram as informações de entrada para o programa com relação às dimensões do veículo. Além disso são apresentadas as coordenadas que definem o posicionamento do caminhão (a origem do sistema de coordenada é apresentada na placa de extremidade do lado esquerdo).

Figura 6.1.1.1. Principais características do veículo-tipo.

Dimensões [mm] [chassi com cabina, sem carroçaria]

	2426/36	2426/48	2426/54
[a] distância entre eixos	3.570+1.360	4.770+1.360	5.370+1.360
[b] comprimento total	7.465	9.665	10.665
[c] largura	2.486	2.486	2.486
[d] altura [teto baixo/alto] (descarregado)	2.747/3.173	2.747/3.173	2.747/3.173
[e] bitola (eixo dianteiro/eixo traseiro)	1.965/1.880	1.965/1.880	1.965/1.880
[f] balanço (dianteiro/traseiro)	1.440/1.065	1.440/2.065	1.440/2.465
[g] ângulo de entrada [com spoiler] (carregado)	15°09'	15°22'	15°26'
[g] ângulo de entrada [sem spoiler] (carregado)	19°38'	19°47'	19°51'
[h] ângulo de saída (carregado)	40°38'	21°06'	17°41'
[i] altura: teto da cabina (baixo/alto) chassi	1.730/2.156	1.730/2.156	1.730/2.156
[j] distância do centro do eixo dianteiro até o implemento (standard/estendida/leito)	420/490/890	420/490/890	420/490/890



Disponível em: < <https://www.mercedes-benz.com.br/> >. Acesso em: 20 ago. 2014.

Figura 6.1.1.2. Dados de entrada com relação às dimensões do veículo (eixo traseiro)

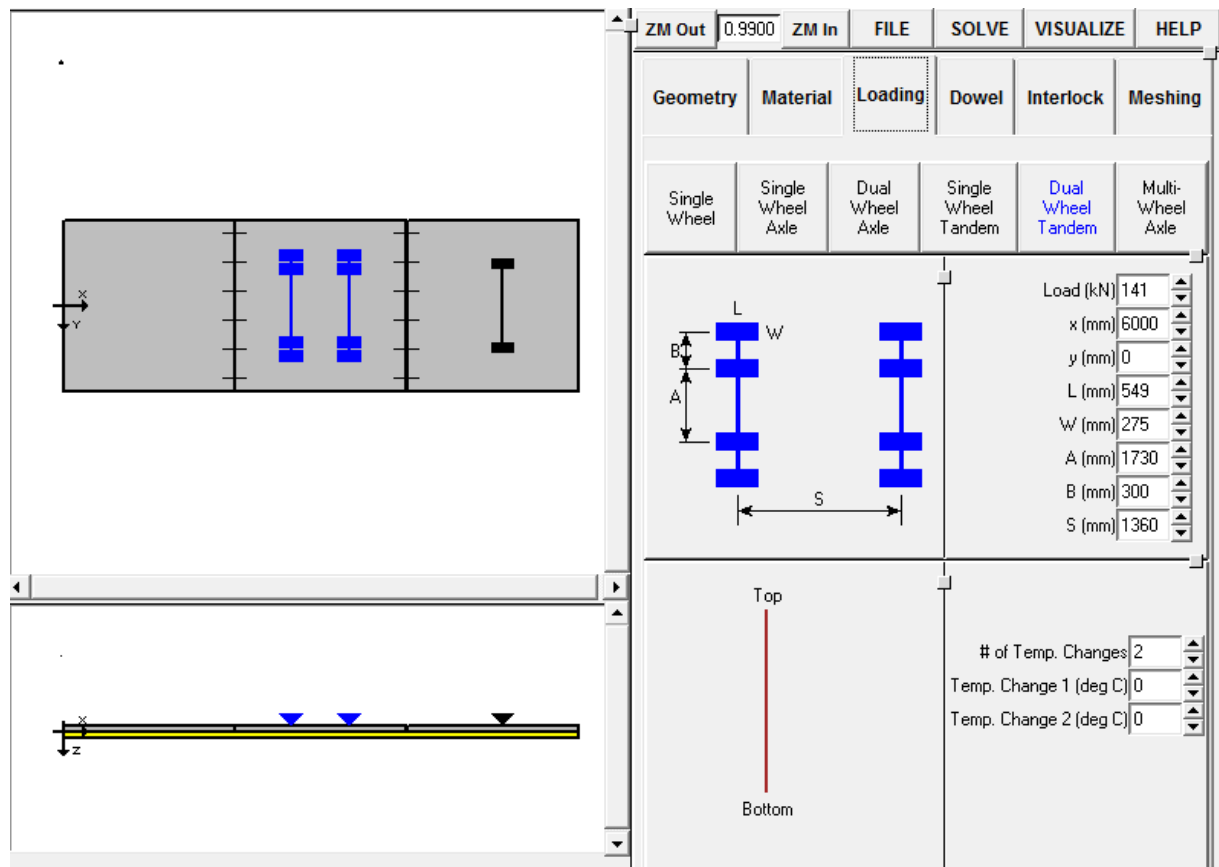
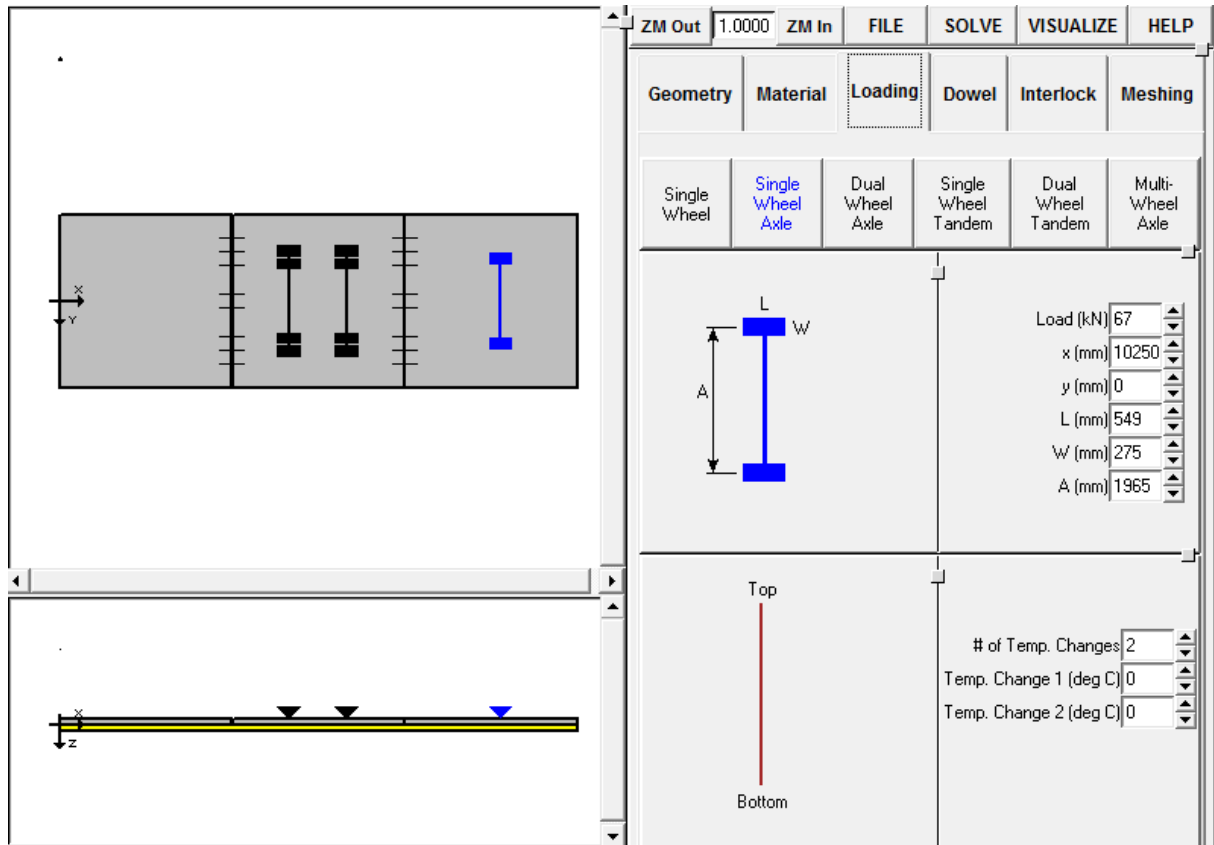


Figura 6.1.1.3. Dados de entrada com relação às dimensões do veículo (eixo dianteiro)

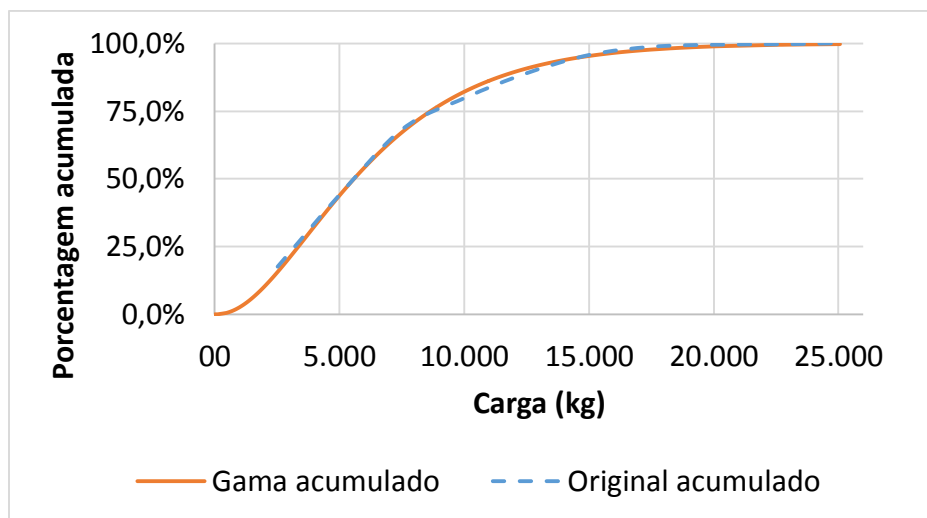


6.1.2. Cargas atuantes

Para obtenção dos esforços solicitantes, foram utilizados dados de pesagem de caminhões fornecidos pela Volkswagen®, que estavam carregados com diversos tipos de materiais.

Os dados de pesagem foram analisados estatisticamente através da curva de distribuição gama (Figura 6.1.2.4), que apresentou o melhor ajuste e é representada pela Equação 6.1.2.1. Assim, estabeleceu-se um nível de confiabilidade de 95%, obtendo-se uma carga de 14,64 toneladas que, somado com o peso próprio do caminhão, de 6,27 toneladas, resultou em um peso total de 20,91 toneladas.

Figura 6.1.2.4. Curva gama acumulada da carga sem o peso próprio do caminhão.



Equação 6.1.2.1

$$y = \frac{x^{2,312-1} e^{-\frac{x}{2804,612}}}{(2,312-1)! 2804,612^{2,312}}$$

A distribuição da carga, entre os eixos dianteiro e traseiro, foi feita através da simplificação da carroceria do caminhão em uma viga, considerando que os eixos do mesmo atuam como apoios simples. Os resultados desta distribuição foram obtidos por meio do software Ftool®. Já a distribuição do peso próprio do veículo-tipo, foi àquela informada no catálogo do veículo. Assim, o Quadro 6.1.2.1, apresenta os valores de carga para cada eixo do veículo-tipo.

Quadro 6.1.2.1. Carga por eixo do veículo-tipo.

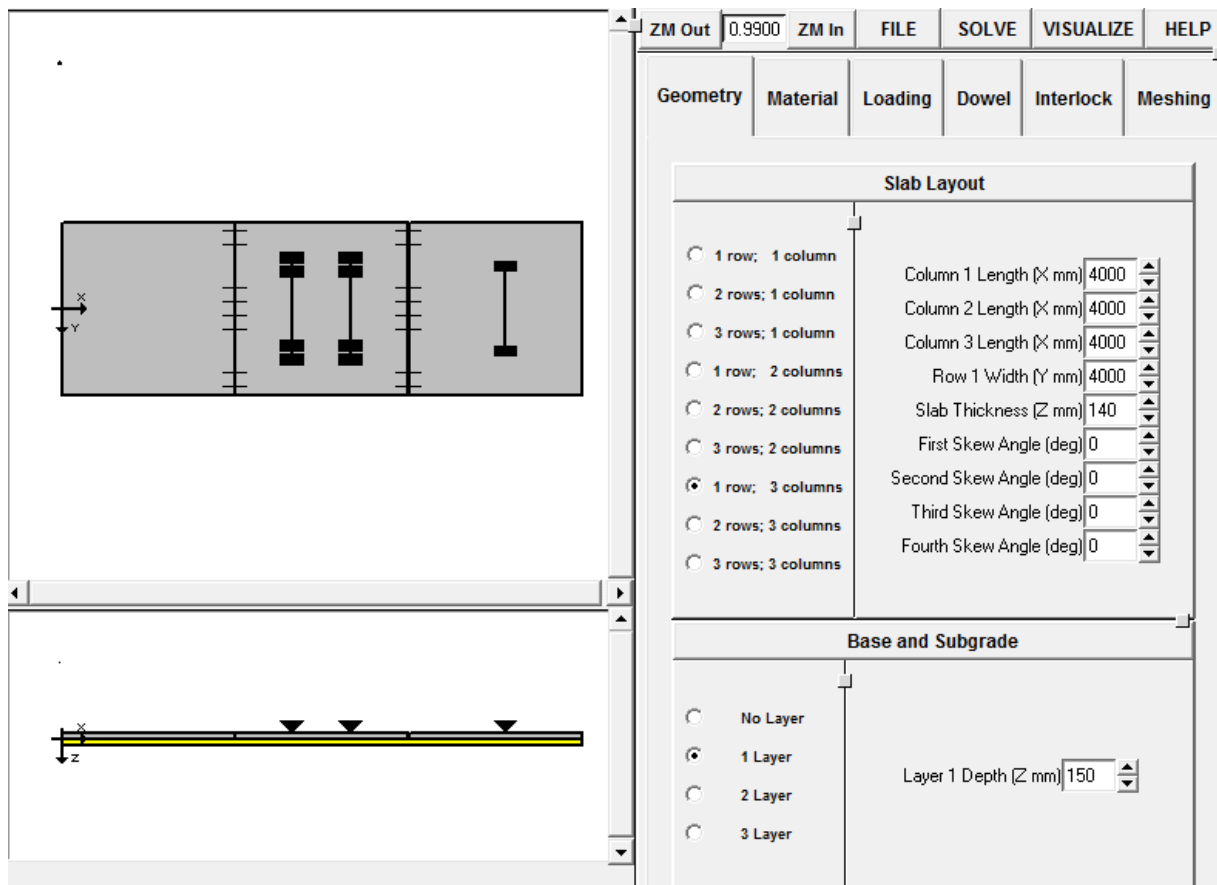
	Eixo dianteiro	Eixo traseiro
Peso da carga (kN)	35,5	110,9
Peso Próprio (kN)	32,2	30,5
Peso total (kN)	67,7	141,4

Como um dos objetivos deste trabalho é realizar o dimensionamento dos pavimentos-protótipos para a condição limite de trabalho, foram feitas simulações sem considerar majorações da carga ou minorações das resistências (cenário crítico). Com o intuito de se fazer uma comparação dos resultados, foi simulada uma condição mais favorável à segurança com majoração de 20% das cargas e redução das resistências em 40% (cenário conservador).

6.1.3. Camadas do pavimento

Foram gerados dois modelos de pavimento-protótipo: um de CRFA com agregado natural e outro com agregado reciclado, compostos por 3 placas quadradas de lado 4,00 m, sendo analisadas diferentes espessuras. O esquema é mostrado na Figura 6.1.3.5.

Figura 6.1.3.5. Dados de entrada com relação à geometria do pavimento-protótipo.



As placas foram simuladas como unidas por barras de ligação de aço CA-50 com 600 mm de comprimento e bitola 12,5 mm, espaçadas 300 mm umas das outras em uma única fileira e espaçadas 200 mm das bordas do pavimento, resultando em 12 barras por ligação. As dimensões e espaçamentos necessários, para as barras de ligação foram obtidos na instrução de projeto IP-07– Dimensionamento de pavimentos de concreto, da Secretaria Municipal de Infraestrutura Urbana e Obras da Prefeitura do Município de São Paulo (SIURB/PMSP, 2004a).

Para este trabalho, não foi possível realizar a coleta de amostras do solo do local onde seriam implementadas as placas de maneira a realizar ensaios para a determinação do CBR e do módulo de resiliência.

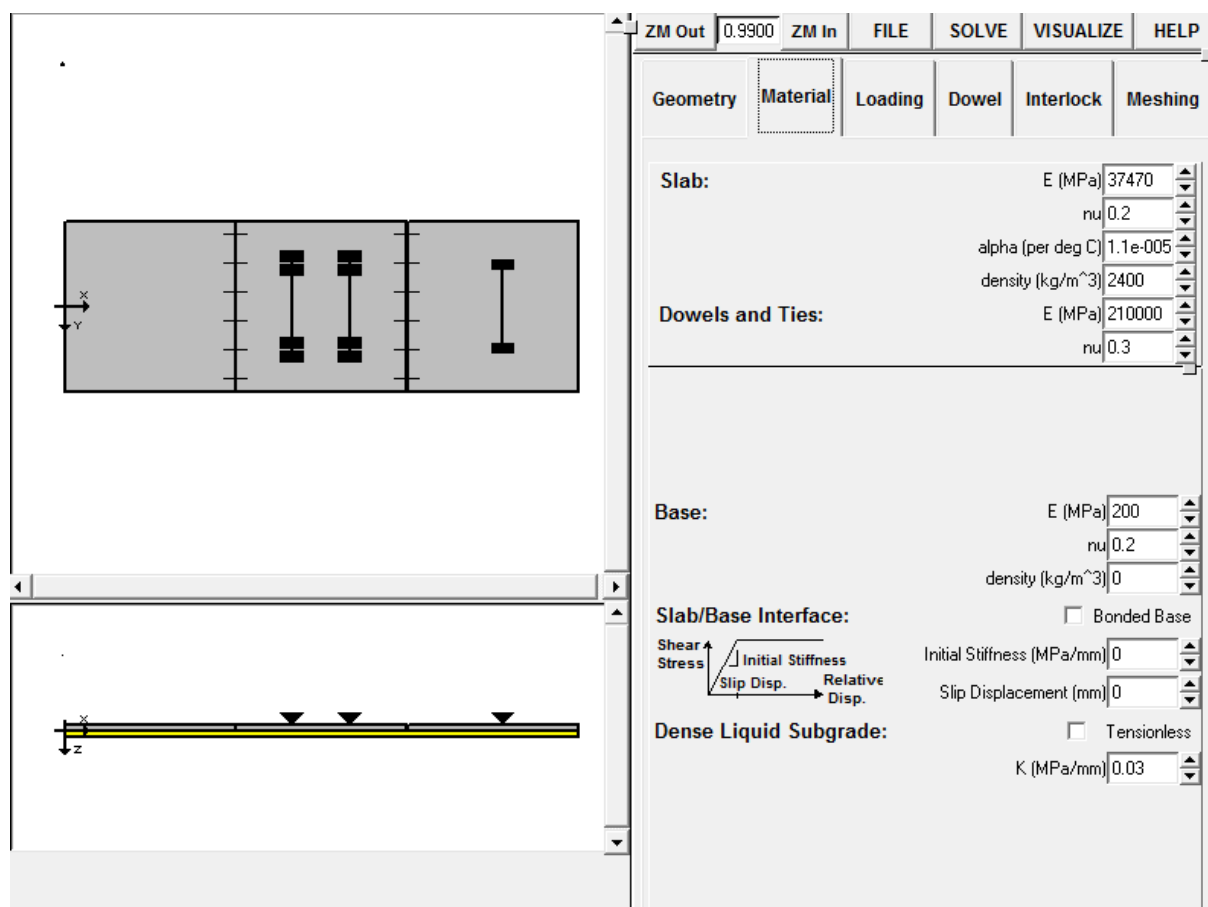
Por conta disso foi assumida uma camada de base de solo granular não aderida ao concreto, com espessura de 15 cm e CBR = 80%, com módulo de resiliência de 200 MPa. O valor do módulo de resiliência foi obtido por meio de correlações com valores extraídos na instrução de projeto IP-08 – Análise mecanicista à fadiga de estruturas de concreto (SIURB/PMSP, 2004b), e apresentados no Quadro 6.1.3.2.

Quadro 6.1.3.2. Módulo de resiliência para diferentes tipos de base.

Material da base	Módulo de resiliência
Granular	$100 \leq E_B \leq 500$
Betuminoso	$800 \leq E_B \leq 1000$
Cimentado (BGTC)	$5000 \leq E_B \leq 15000$

Extraído de: Análise Mecanicista à Fadiga de Estruturas de Pavimento, 2004b.

Figura 6.1.3.6. Dados de entrada das propriedades mecânicas do pavimento e base.



6.1.4. Resultados

Com as condições apresentadas anteriormente, foram simulados diferentes pavimentos variando-se apenas a sua espessura. Assim, foram obtidas as tensões máximas de tração nas faces superior e inferior, que estão apresentadas da Tabela 6.1.4.1 até a Tabela 6.1.4.4

Tabela 6.1.4.1. Tensões máximas de tração no pavimento com agregado natural (cenário conservador).

Espessura (m)	Face superior (MPa)	Face inferior (MPa)
0,14	0,52	2,16
0,16	0,35	1,78
0,18	0,24	1,50
0,20	0,17	1,32
0,22	0,13	1,19
0,24	0,11	1,07
0,26	0,11	0,96
0,28	0,11	0,87
0,30	0,11	0,78

Tabela 6.1.4.2. Tensões máximas de tração no pavimento com agregado reciclado (cenário conservador).

Espessura (m)	Face superior (MPa)	Face inferior (MPa)
0,14	0,59	1,90
0,16	0,42	1,58
0,18	0,30	1,34
0,20	0,22	1,15
0,22	0,16	1,00
0,24	0,12	0,90
0,26	0,09	0,82
0,28	0,07	0,75
0,30	0,07	0,69

Tabela 6.1.4.3: Tensões máximas de tração no pavimento com agregado natural (cenário crítico).

Espessura (m)	Face superior (MPa)	Face inferior (MPa)
0,14	0,16	1,80
0,16	0,12	1,49
0,18	0,09	1,27
0,20	0,09	1,12
0,22	0,09	1,01
0,24	0,09	0,91
0,26	0,09	0,82
0,28	0,09	0,74
0,30	0,09	0,66

Tabela 6.1.4.4: Tensões máximas de tração no pavimento com agregado reciclado (cenário crítico)

Espessura (m)	Face superior (MPa)	Face inferior (MPa)
0,14	0,19	1,60
0,16	0,13	1,34
0,18	0,09	1,14
0,20	0,07	0,98
0,22	0,06	0,85
0,24	0,06	0,77
0,26	0,06	0,70
0,28	0,06	0,64
0,30	0,06	0,59

Figura 6.1.4.7 – Relação entre tensões dos pavimentos com agregado reciclado e natural (cenário conservador)

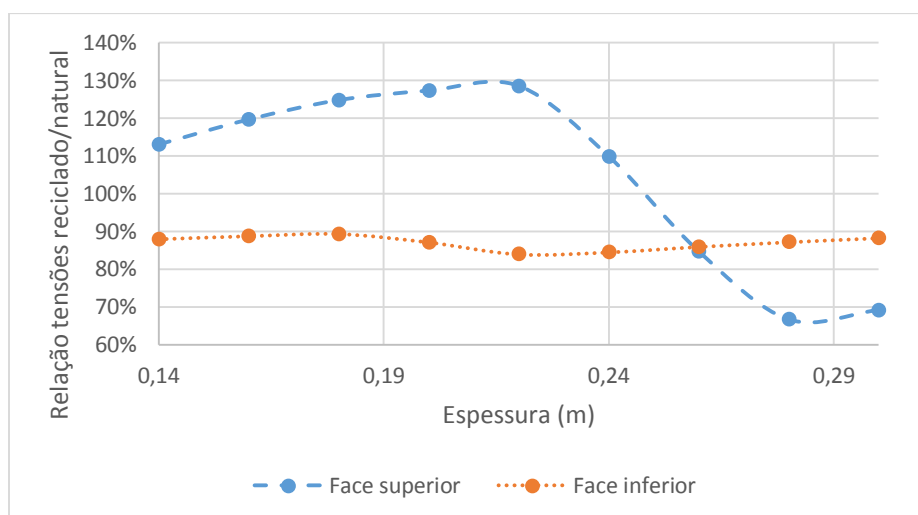
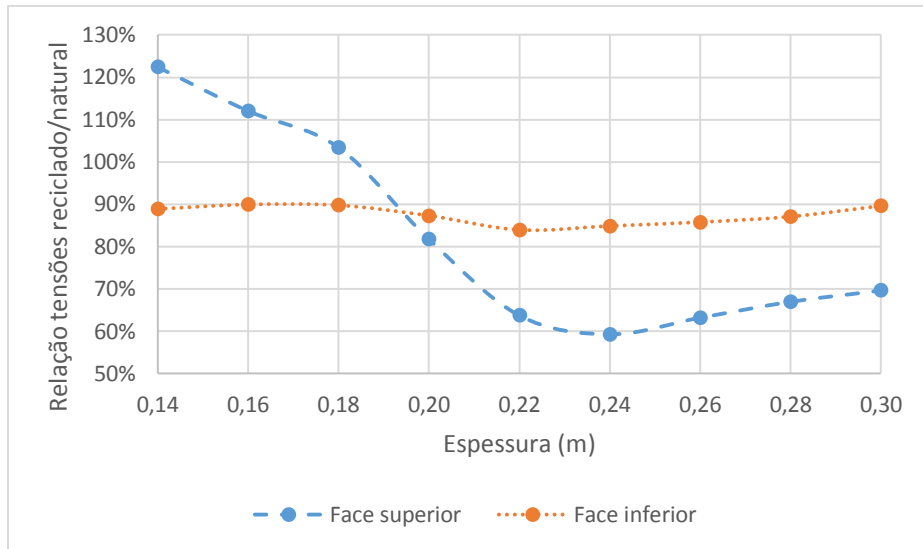


Figura 6.1.4.8 – Relação entre tensões dos pavimentos com agregado reciclado e natural (cenário crítico)



As Figura 6.1.4.9 e Figura 6.1.4.10, extraídas do software EverFe®, exemplificam a distribuição das tensões no topo e na base da placa de concreto com agregado natural, respectivamente, para uma espessura de 20 cm no cenário crítico.

Figura 6.1.4.9. Distribuição das tensões de tração e compressão no topo da placa de concreto

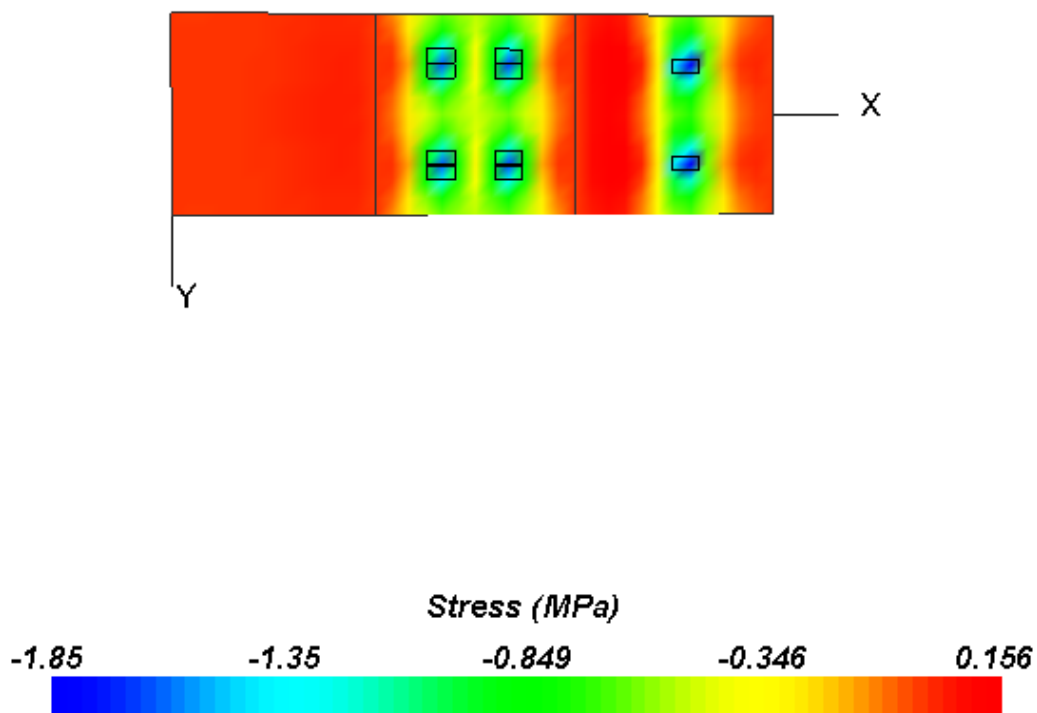
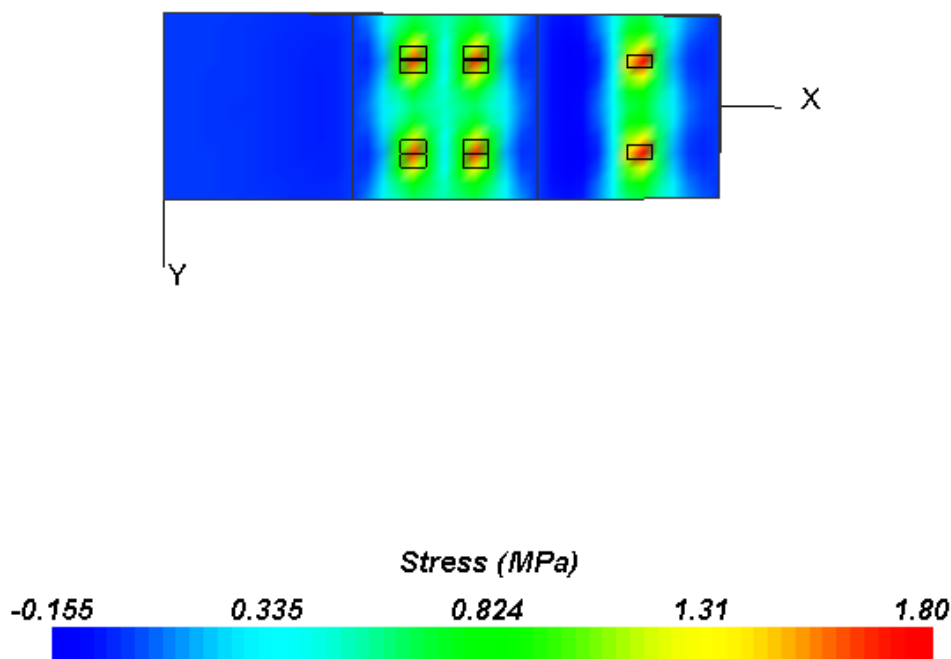


Figura 6.1.4.10. Distribuição das tensões de tração e compressão na base da placa de concreto



Nota-se que ao comparar os resultados obtidos entre o pavimento com agregado natural e o com agregado reciclado, que as tensões de tração para o agregado reciclado na face inferior se reduzem e que as na face superior se elevam para baixas espessuras, enquanto que para maiores espessuras as tensões em ambas as faces se reduzem em relação ao agregado natural. Esse comportamento é decorrente do afunilamento do bulbo de tensões, devido à redução do módulo de elasticidade do CRFA com agregado reciclado, que torna o pavimento mais flexível, fazendo com que parte das tensões da face inferior seja absorvida pela camada de base, e que haja maior concentração das tensões na face superior para baixas espessuras, enquanto que para maiores espessuras, a distribuição de tensões ao longo da espessura do pavimento faz com que as tensões na face superior diminuam. Conclui-se, assim, que o pavimento com agregado reciclado é mais sensível ao aumento de espessura que o pavimento com agregado natural devido ao baixo módulo de elasticidade (BIANCHI; BRITO; CASTRO, 2008).

6.2. Determinação do teor de fibras

6.2.1. Metodologia

Para este estudo, em específico, foi utilizada uma adaptação do método de Nayar e Gettu. Essa adaptação do método foi proposta, visto que as tensões máximas de tração na face

superior, para diversos pré-dimensionamentos, foram muito menores do que os valores de resistência à tração apresentados pelos CRFA. Assim, concluiu-se que, dimensionando o pavimento considerando apenas a ação das fibras resistindo às tensões de tração na face inferior, como dito anteriormente, obtém-se uma dosagem de fibras a favor da segurança, pois $f_{ctk} \geq f_{ctk,fl}$ resulta em um menor momento atuante para ser resistido pelas fibras.

Assim, o valor de $f_{sfk,fl}$ foi obtido diretamente dos resultados de tensão para a base da placa fornecido pelo EverFe®, seguindo a Equação 6.2.1.1. O valor de γ_{sf} foi adotado como sendo 1,0 para o cenário crítico e 1,4 para o conservador.

Equação 6.2.1.1

$$f_{sfk,fl} = \frac{\sigma_p}{\gamma_{sf}}$$

O valor de $f_{ctk,fl}$ foi apenas verificado para o estado limite último, ou seja, com o valor da tensão máxima de tração na face superior da placa, foi calculado o f_{ctk} mínimo para que não haja fissuras na face superior do pavimento.

De posse do valor de $f_{sfk,fl}$, foi calculada a resistência residual equivalente por meio da relação: $f_{e,3} \geq f_{sfk,fl}$. Finalmente os teores de fibra (TF) para os pavimentos de CRFA com agregado natural e reciclado foram calculados pela Equação 6.2.1.2 e Equação 6.2.1.3, respectivamente, obtidas nas curvas de correlação apresentadas na Figura 5.5.2.20.

Equação 6.2.1.2. (agregado natural)

$$TF = e^{\frac{f_{e,3} + 2,4949}{1,1722}}$$

Equação 6.2.1.3. (agregado reciclado)

$$TF = e^{\frac{f_{e,3} + 1,5098}{0,8142}}$$

6.2.2. Resultados

Os resultados do teor de fibras para diferentes espessuras estão apresentados na Figura 6.2.2.11 e Figura 6.2.2.12. Em ambos os casos, há uma proximidade dos teores de fibra para uma mesma espessura, o que condiz com os resultados apresentados para a resistência residual

Figura 6.2.2.11. Correlação entre o teor de fibra e a espessura dos pavimentos (cenário conservador)

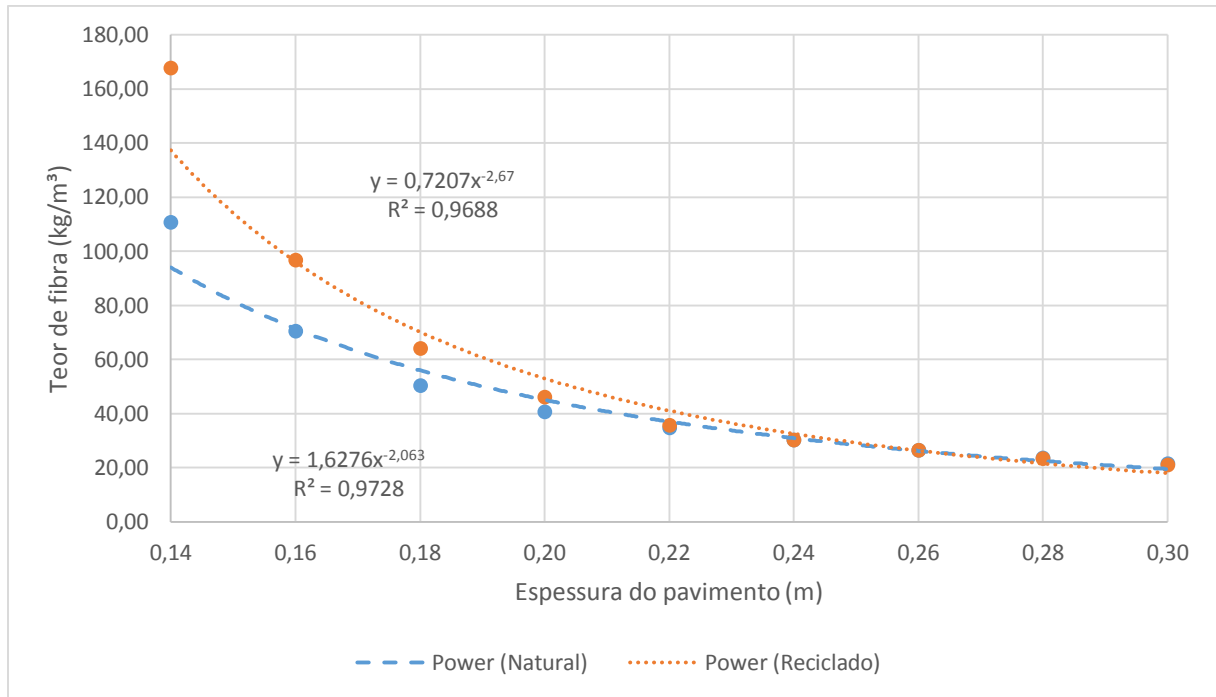
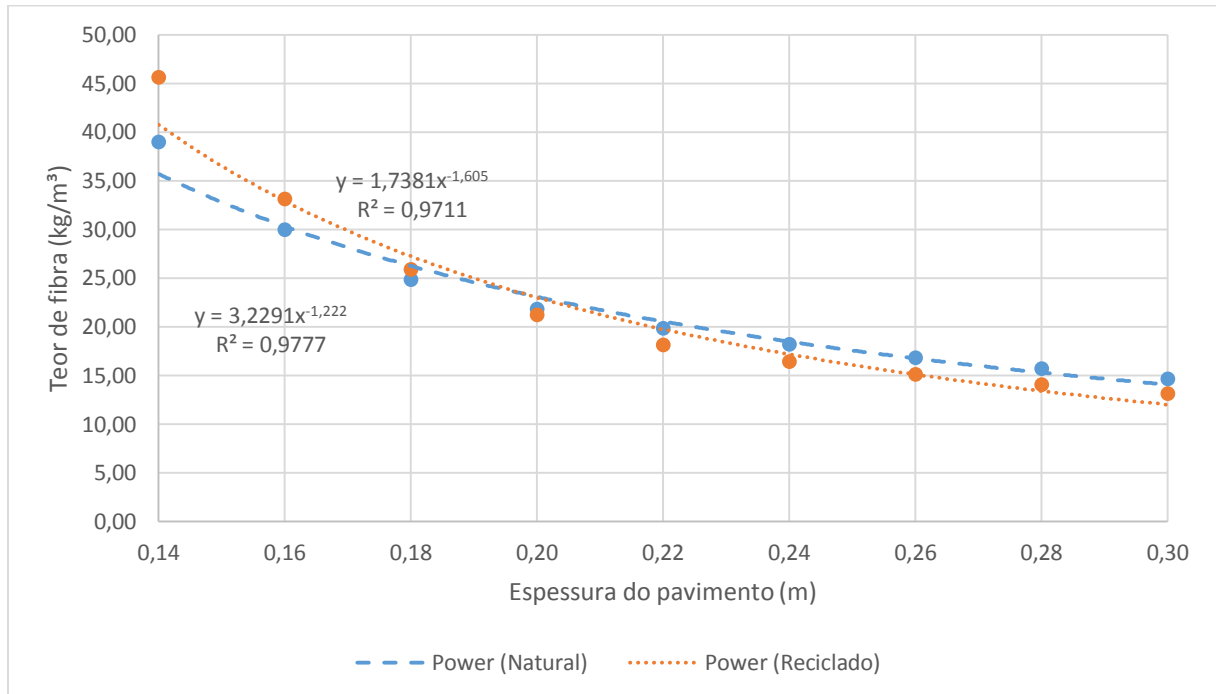


Figura 6.2.2.12. Correlação entre o teor de fibra e a espessura dos pavimentos (cenário crítico)



É possível notar que para pequenas espessuras o teor de fibras no reciclado é ligeiramente maior, porém com o aumento desta dimensão, ocorre um ponto de inversão. Isso

acontece por este possuir menores tensões solicitantes na face inferior e também em razão do aumento da parcela resistente atuante por parte do concreto.

Como era de se esperar, no cenário conservador os teores se mostraram muito elevados se comparados com o cenário crítico. Porém essa diferença cai drasticamente com o aumento da espessura.

De forma a garantir que não haja abertura de fissura na face superior dos pavimentos dimensionados anteriormente, fez-se a verificação do atendimento do $f_{ctk,fl}$ através da comparação com o valor de resistência à tração característica de pico (f_{ctk}) apresentada pelos concretos, dada pela Equação 6.2.2.1. A Tabela 6.2.2.5 mostra os valores obtidos para essa verificação, e indica que ela está atendida.

Equação 6.2.2.1

$$f_{ctk} = f_{ct} - 1,65 \cdot s$$

Tabela 6.2.2.5. Verificação de resistência a tração na face superior do pavimento (cenário conservador).

Tipo de agregado	Natural	Reciclado
f_{ct} médio (MPa)	5,34	3,07
Desvio padrão (s) (MPa)	0,14	0,20
f_{ctk} (MPa)	5,11	2,74
$f_{ctk,fl}$ (MPa)	0,52	0,59

Tabela 6.2.2.6. Verificação de resistência a tração na face superior do pavimento (cenário crítico).

Tipo de agregado	Natural	Reciclado
f_{ct} médio (MPa)	3,56	2,05
Desvio padrão (s) (MPa)	0,14	0,20
f_{ctk} (MPa)	3,33	1,72
$f_{ctk,fl}$ (MPa)	0,16	0,19

7. ANÁLISE DE IMPACTO AMBIENTAL

É fundamental mensurar o impacto ambiental da aplicação do CRFA com ARC em pavimentos, ratificando que a alternativa possa crescer ainda mais no futuro, visando às impositivas legislações ambientais do setor.

7.1. Metodologia de análise

7.1.1. Proposta de Cáceres, John e Figueiredo (2014)

Neste estudo buscou-se mensurar o impacto gerado pela quantificação de emissões de CO₂ dos elementos constituintes do CRFA. Para tanto, apoiando-se na metodologia apresentada num estudo realizado por Cáceres, John e Figueiredo (2014), no qual foram estimadas e compradas as emissões de CO₂ dos materiais componentes de dois pavimentos: um de concreto armado convencional e outro de CRFA; foi feita uma avaliação comparativa entre os dois pavimentos-protótipo dimensionados.

As emissões de CO₂ nos componentes foram ponderadas a partir de indicadores encontrados em revisão bibliográfica. Para ambos os casos se faz a avaliação a partir das emissões do cimento, areia, pedra britada (natural no primeiro caso e reciclada, no segundo) e fibras de aço. Somadas as parcelas de todos os elementos, será analisada a diferença de emissões produzidas.

7.1.2. Metodologia utilizada

Para realizar a avaliação comparativa das emissões de CO₂ para os dois pavimentos, adotou-se, como critério, a simples avaliação das emissões relativas a cada um dos materiais componentes. Determinadas as quantidades de cada componente e multiplicando-as pelas suas emissões unitárias, chega-se aos valores absolutos do conjunto.

Conforme Cáceres, John e Figueiredo (2014), esta metodologia adota hipóteses simplificadoras: não se considera a parcela de emissões relativas ao próprio processo de execução do pavimento, uma vez que os dois tipos de pavimento avaliados são semelhantes, mudando-se apenas o tipo de agregado; quanto ao aditivo, a prática normal é aumentar o teor de aditivo para corrigir o abatimento do CRFA, mas no presente caso, dado que os teores de fibras são relativamente baixos, o impacto na trabalhabilidade foi reduzido, como já foi

demonstrado na dissertação de Ceccato (1998), já citada no item 2.5, corroborando a consideração de tornar tal parcela desprezível no cálculo; por fim, também não foi considerada a absorção por carbonatação, pois os resultados de ambos os pavimentos devem ser equivalentes (CÁCERES; JOHN; FIGUEIREDO, 2014).

A quantificação de cada um dos materiais básicos do concreto foi feita segundo as metodologias apresentadas no item 5.2.1, de dosagem do concreto, e item **Error! Reference source not found.**, de teor de fibras, e o cálculo das emissões de cada concreto foi realizado para as espessuras de pavimento obtidas no item **Error! Reference source not found.**, tanto para a alternativa com agregado natural como com reciclado, considerando as situações com coeficientes de segurança e sem. Assim, foram avaliadas as emissões de 16 alternativas.

7.1.3. Emissões potenciais unitárias

A seguir são apresentadas as emissões unitárias para cada componente utilizado na produção dos concretos avaliados neste trabalho.

Tabela 7.1.3.1. Emissões máximas e mínimas por tipo de cimento.

Tipo de cimento	Teor de Clínquer (%)		Fabricante I		Fabricante II		Fabricante III	
			Emissão (kgCO ₂ /t)					
	Mínimo	Máximo	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
CPII	52,0	90,0	465,0	804,0	437,0	756,0	426,0	737,0

Extraído de: VANESSA C. H. C. OLIVEIRA, 2014.

Tabela 7.1.3.2. Emissões potenciais dos agregados (kgCO₂/t).

Areia	6,0
Pedra britada	15,0
Brita reciclada	1,0

Extraído de: LIMA, 2010.

Tabela 7.1.3.3. Emissões potenciais de fibra de aço e aço virgem (kgCO₂/t).

Fibra de aço	2680
Aço virgem	2200

Extraído de: STENGEL; SCHIESL, 2008 apud HABERT et al, 2012.

7.2. Resultados de emissões totais

São apresentados na Tabela 7.1.3.1 a Tabela 7.1.3.8, os resultados das emissões totais para os pavimentos-protótipos dimensionados sem coeficientes de segurança (cenário crítico).

Tabela 7.1.3.1. Emissões para espessuras de 14 cm com agregado natural sem coeficientes de segurança.

Material	Quantidade (t)	Fator de emissão (kgCO ₂ /t)	Emissão total (kgCO ₂ /t)	Parcela de emissão (%)
Cimento CII	2,58	604,17	1557,54	63,25%
Areia	5,53	6,00	33,19	1,35%
Brita	7,21	15,00	108,12	4,39%
Fibra de aço	0,26	2680,00	702,73	28,54%
Barras de ligação	0,03	2200,00	60,88	2,47%
Valor de emissão total (kgCO ₂ /48 m ² de pavimento)			2462,47	100,00%
Valor de emissão total (kgCO ₂ /m ² de pavimento)			51,30	

Tabela 7.1.3.2. Emissões para espessuras de 14 cm com ARC sem coeficientes de segurança.

Material	Quantidade (t)	Fator de emissão (kgCO ₂ /t)	Emissão total (kgCO ₂ /t)	Parcela de emissão (%)
Cimento CII	2,58	604,17	1557,54	63,31%
Areia	1,48	6,00	8,87	0,36%
Brita reciclada	11,26	1,00	11,26	0,46%
Fibra de aço	0,31	2680,00	821,60	33,40%
Barras de ligação	0,03	2200,00	60,88	2,47%
Valor de emissão total (kgCO ₂ /48 m ² de pavimento)			2460,15	100,00%
Valor de emissão total (kgCO ₂ /m ² de pavimento)			51,25	

Tabela 7.1.3.3. Emissões para espessuras de 16 cm com agregado natural sem coeficientes de segurança.

Material	Quantidade (t)	Fator de emissão (kgCO ₂ /t)	Emissão total (kgCO ₂ /t)	Parcela de emissão (%)
Cimento CII	2,95	604,17	1780,48	67,98%
Areia	6,32	6,00	37,94	1,45%
Brita	8,24	15,00	123,57	4,72%
Fibra de aço	0,23	2680,00	616,44	23,53%
Barras de ligação	0,03	2200,00	60,88	2,32%
Valor de emissão total (kgCO ₂ /48 m ² de pavimento)			2619,31	100,00%
Valor de emissão total (kgCO ₂ /m ² de pavimento)			54,57	

Tabela 7.1.3.4. Emissões para espessuras de 16 cm com ARC sem coeficientes de segurança.

Material	Quantidade (t)	Fator de emissão (kgCO ₂ /t)	Emissão total (kgCO ₂ /t)	Parcela de emissão (%)
Cimento CII	2,95	604,17	1780,48	69,91%
Areia	1,69	6,00	10,13	0,40%
Brita reciclada	12,87	1,00	12,87	0,51%
Fibra de aço	0,25	2680,00	682,31	26,79%
Barras de ligação	0,03	2200,00	60,88	2,39%
Valor de emissão total (kgCO ₂ /48 m ² pavimento)			2546,67	100,00%
Valor de emissão total (kgCO ₂ /m ² de pavimento)			53,06	

Tabela 7.1.3.5. Emissões para espessuras de 18 cm com agregado natural sem coeficientes de segurança.

Material	Quantidade (t)	Fator de emissão (kgCO ₂ /t)	Emissão total (kgCO ₂ /t)	Parcela de emissão (%)
Cimento CII	3,32	604,17	2002,81	71,02%
Areia	7,11	6,00	42,68	1,51%
Brita	9,27	15,00	139,01	4,93%
Fibra de aço	0,21	2680,00	574,71	20,38%
Barras de ligação	0,03	2200,00	60,88	2,16%
Valor de emissão total (kgCO ₂ /48 m ² de pavimento)			2820,09	100,00%
Valor de emissão total (kgCO ₂ /m ² de pavimento)			58,75	

Tabela 7.1.3.6. Emissões para espessuras de 18 cm com ARC sem coeficientes de segurança.

Material	Quantidade (t)	Fator de emissão (kgCO ₂ /t)	Emissão total (kgCO ₂ /t)	Parcela de emissão (%)
Cimento CII	3,32	604,17	2002,81	74,45%
Areia	1,90	6,00	11,40	0,42%
Brita reciclada	14,48	1,00	14,48	0,54%
Fibra de aço	0,22	2680,00	600,41	22,32%
Barras de ligação	0,03	2200,00	60,88	2,26%
Valor de emissão total (kgCO ₂ /48 m ² pavimento)			2689,99	100,00%
Valor de emissão total (kgCO ₂ /m ² de pavimento)			56,04	

Tabela 7.1.3.7. Emissões para espessuras de 20 cm com agregado natural sem coeficientes de segurança.

Material	Quantidade (t)	Fator de emissão (kgCO ₂ /t)	Emissão total (kgCO ₂ /t)	Parcela de emissão (%)
Cimento CII	3,68	604,17	2225,15	72,96%
Areia	7,90	6,00	47,42	1,55%
Brita	10,30	15,00	154,46	5,06%
Fibra de aço	0,21	2680,00	561,90	18,42%
Barras de ligação	0,03	2200,00	60,88	2,00%
Valor de emissão total (kgCO ₂ /48 m ² de pavimento)			3049,80	100,00%
Valor de emissão total (kgCO ₂ /m ² de pavimento)			63,54	

Tabela 7.1.3.8. Emissões para espessuras de 20 cm com ARC sem coeficientes de segurança.

Material	Quantidade (t)	Fator de emissão (kgCO ₂ /t)	Emissão total (kgCO ₂ /t)	Parcela de emissão (%)
Cimento CII	3,68	604,17	2225,15	77,76%
Areia	2,11	6,00	12,67	0,44%
Brita reciclada	16,09	1,00	16,09	0,56%
Fibra de aço	0,20	2680,00	546,72	19,11%
Barras de ligação	0,03	2200,00	60,88	2,13%
Valor de emissão total (kgCO ₂ /48 m ² pavimento)			2861,51	100,00%
Valor de emissão total (kgCO ₂ /m ² de pavimento)			59,61	

Na Tabela 7.1.3.9 a Tabela 7.1.3.16, são apresentados os resultados das emissões totais para os pavimentos-protótipos dimensionados com os coeficientes de segurança (cenário conservador).

Tabela 7.1.3.9. Emissões para espessuras de 14 cm com agregado natural com coeficientes de segurança.

Material	Quantidade (t)	Fator de emissão (kgCO ₂ /t)	Emissão total (kgCO ₂ /t)	Parcela de emissão (%)
Cimento CII	2,58	604,17	1557,54	41,47%
Areia	5,53	6,00	33,19	0,88%
Brita	7,21	15,00	108,12	2,88%
Fibra de aço	0,74	2680,00	1996,36	53,15%
Barras de ligação	0,03	2200,00	60,88	1,62%
Valor de emissão total (kgCO ₂ /48 m ² de pavimento)			3756,10	100,00%
Valor de emissão total (kgCO ₂ /m ² de pavimento)			78,25	

Tabela 7.1.3.10. Emissões para espessuras de 14 cm com ARC com coeficientes de segurança.

Material	Quantidade (t)	Fator de emissão (kgCO ₂ /t)	Emissão total (kgCO ₂ /t)	Parcela de emissão (%)
Cimento CII	2,58	604,17	1557,54	33,42%
Areia	1,48	6,00	8,87	0,19%
Brita reciclada	11,26	1,00	11,26	0,24%
Fibra de aço	1,13	2680,00	3021,47	64,84%
Barras de ligação	0,03	2200,00	60,88	1,31%
Valor de emissão total (kgCO ₂ /48 m ² de pavimento)			4660,02	100,00%
Valor de emissão total (kgCO ₂ /m ² de pavimento)			97,08	

Tabela 7.1.3.11. Emissões para espessuras de 16 cm com agregado natural com coeficientes de segurança.

Material	Quantidade (t)	Fator de emissão (kgCO ₂ /t)	Emissão total (kgCO ₂ /t)	Parcela de emissão (%)
Cimento CII	2,95	604,17	1780,48	51,58%
Areia	6,32	6,00	37,94	1,10%
Brita	8,24	15,00	123,57	3,58%
Fibra de aço	0,54	2680,00	1449,21	41,98%
Barras de ligação	0,03	2200,00	60,88	1,76%
Valor de emissão total (kgCO ₂ /48 m ² de pavimento)			3452,08	100,00%
Valor de emissão total (kgCO ₂ /m ² de pavimento)			71,92	

Tabela 7.1.3.12. Emissões para espessuras de 16 cm com ARC com coeficientes de segurança.

Material	Quantidade (t)	Fator de emissão (kgCO ₂ /t)	Emissão total (kgCO ₂ /t)	Parcela de emissão (%)
Cimento CII	2,95	604,17	1780,48	69,91%
Areia	1,69	6,00	10,13	0,40%
Brita reciclada	12,87	1,00	12,87	0,51%
Fibra de aço	0,25	2680,00	682,31	26,79%
Barras de ligação	0,03	2200,00	60,88	2,39%
Valor de emissão total (kgCO ₂ /48 m ² pavimento)			3855,92	100,00%
Valor de emissão total (kgCO ₂ /m ² de pavimento)			80,33	

Tabela 7.1.3.13. Emissões para espessuras de 18 cm com agregado natural com coeficientes de segurança.

Material	Quantidade (t)	Fator de emissão (kgCO ₂ /t)	Emissão total (kgCO ₂ /t)	Parcela de emissão (%)
Cimento CII	3,32	604,17	2002,81	58,69%
Areia	7,11	6,00	42,68	1,25%
Brita	9,27	15,00	139,01	4,07%
Fibra de aço	0,44	2680,00	1167,02	34,20%
Barras de ligação	0,03	2200,00	60,88	1,78%
Valor de emissão total (kgCO ₂ /48 m ² de pavimento)			3412,40	100,00%
Valor de emissão total (kgCO ₂ /m ² de pavimento)			71,09	

Tabela 7.1.3.14. Emissões para espessuras de 18 cm com ARC com coeficientes de segurança.

Material	Quantidade (t)	Fator de emissão (kgCO ₂ /t)	Emissão total (kgCO ₂ /t)	Parcela de emissão (%)
Cimento CII	3,32	604,17	2002,81	56,06%
Areia	1,90	6,00	11,40	0,32%
Brita reciclada	14,48	1,00	14,48	0,41%
Fibra de aço	0,55	2680,00	1482,86	41,51%
Barras de ligação	0,03	2200,00	60,88	1,70%
Valor de emissão total (kgCO ₂ /48 m ² pavimento)			3572,43	100,00%
Valor de emissão total (kgCO ₂ /m ² de pavimento)			74,43	

Tabela 7.1.3.15. Emissões para espessuras de 20 cm com agregado natural com coeficientes de segurança.

Material	Quantidade (t)	Fator de emissão (kgCO ₂ /t)	Emissão total (kgCO ₂ /t)	Parcela de emissão (%)
Cimento CII	3,68	604,17	2225,15	62,97%
Areia	7,90	6,00	47,42	1,34%
Brita	10,30	15,00	154,46	4,37%
Fibra de aço	0,39	2680,00	1045,84	29,60%
Barras de ligação	0,03	2200,00	60,88	1,72%
Valor de emissão total (kgCO ₂ /48 m ² de pavimento)			3533,74	100,00%
Valor de emissão total (kgCO ₂ /m ² de pavimento)			73,62	

Tabela 7.1.3.16. Emissões para espessuras de 20 cm com ARC com coeficientes de segurança.

Material	Quantidade (t)	Fator de emissão (kgCO ₂ /t)	Emissão total (kgCO ₂ /t)	Parcela de emissão (%)
Cimento CII	3,68	604,17	2225,15	63,52%
Areia	2,11	6,00	12,67	0,36%
Brita reciclada	16,09	1,00	16,09	0,46%
Fibra de aço	0,44	2680,00	1188,38	33,92%
Barras de ligação	0,03	2200,00	60,88	1,74%
Valor de emissão total (kgCO ₂ /48 m ² pavimento)			3503,16	100,00%
Valor de emissão total (kgCO ₂ /m ² de pavimento)			72,98	

Com os valores das emissões totais de CO₂ por m² de pavimento, foram realizadas correlações com as suas respectivas espessuras, para cada um dos tipos de pavimento (com agregado natural e reciclado, e com e sem coeficientes de segurança), obtendo-se os gráficos da Figura 7.1.3.1 e da Figura 7.1.3.2

Figura 7.1.3.1. Correlação entre a emissão de CO₂ e a espessura dos pavimentos, para os pavimentos dimensionados sem coeficientes de segurança.

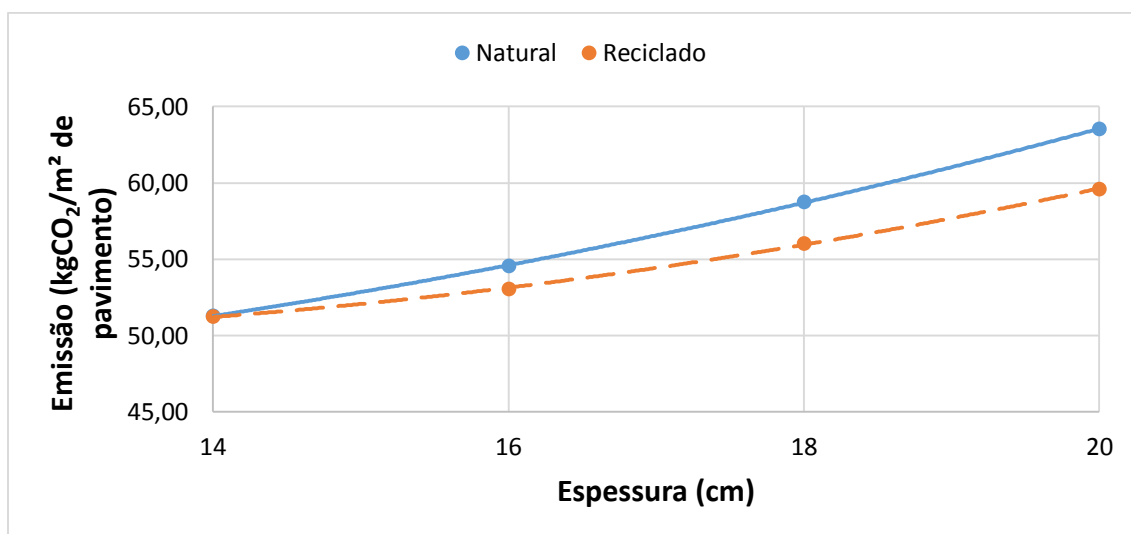
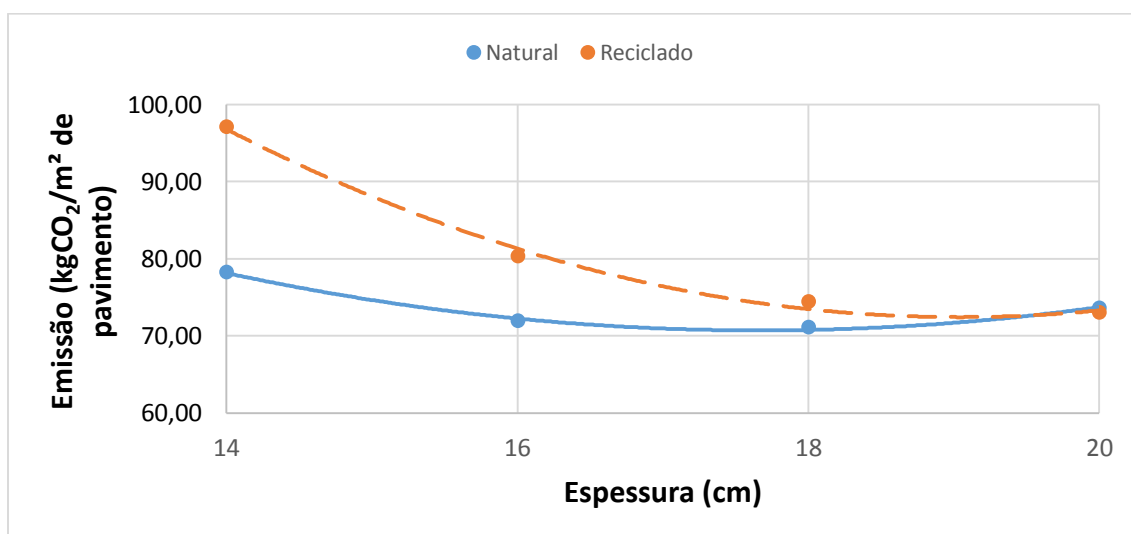


Figura 7.1.3.2. Correlação entre a emissão de CO₂ e a espessura dos pavimentos, para os pavimentos dimensionados com coeficientes de segurança.



Analisando as curvas da Figura 7.1.3.1, isto é, sem aplicação de coeficiente de segurança no dimensionamento dos pavimentos, nota-se que a alternativa do CRFA com ARC, para espessuras acima de 14 cm, se perfaz sempre mais efetiva sob o ponto de vista das emissões de CO₂. Isso ocorre porque, mesmo com uma densidade de fibras de aço maior, em comparação à alternativa com agregado natural, a parcela de emissão relativa ao componente reciclado compensa essa diferença, à medida que o pavimento ganha espessura.

No estudo do efeito ambiental, considerando a aplicação dos coeficientes de segurança no dimensionamento (Figura 7.1.3.2), percebe-se que o CRFA com ARC só se mostra vantajoso para pavimentos com espessuras iguais ou superiores a 20 cm. Neste caso, para as espessuras inferiores a 20 cm, a densidade de fibras é tão alta que eleva o grau de emissões de CO₂ a valores próximos de 100 kgCO₂/m² de pavimento para a espessura de 14 cm (em comparação, a alternativa com agregado natural apresentou 78,25 kgCO₂/m² de pavimento para a mesma espessura). Assim, o ganho ambiental somente se dá com o aumento da espessura da estrutura, que ajuda a mitigar a diferença de emissões pela redução do teor de fibras.

8. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nos ensaios se mostraram condizentes com o esperado, havendo uma redução, em cerca de 50%, nos resultados de resistência à compressão, módulo de elasticidade e resistência à tração na flexão do CRFA com agregado natural para o reciclado. Esta redução era esperada devido à necessidade de acréscimo de água na moldagem do concreto com agregado reciclado, para que pudesse ser compensada a absorção pelos finos presentes e pela presença de argamassa aderida a ele. Além disso, outro fator que impactou nesses resultados foi a absorção de água por imersão, que indicou que o reciclado apresenta cerca de 3 vezes mais vazios do que o natural.

Observou-se, também, um ganho na tensão de tração do CRFA com agregado reciclado com o aumento do teor de fibras. Além disso, apesar da grande redução em relação à tensão de pico, os dois concretos apresentaram resultados de resistências residuais muito semelhantes, demonstrando assim, a pequena influência do tipo de agregado frente àquela exercida pelas fibras, na condição pós-fissuração.

Os resultados do dimensionamento, a partir da adaptação do método de Nayar e Gettu, mostraram que, mesmo o CRFA com agregado reciclado possuindo uma resistência à tração muito inferior em relação ao natural, a proximidade dos valores de resistência residual acaba por torná-lo capaz de atender aos esforços solicitantes na condição mais crítica. Isso se deve a metodologia do dimensionamento se basear numa análise plástica do pavimento, ou seja, com este trabalhando até o ELU.

Nas condições do cenário conservador temos teores bastante elevados para as menores espessuras, como era de se esperar. No caso, um teor de 40 kg/m³, parâmetro de referência baseado no estudo de Pietra (2005), é alcançado com uma espessura de 22 cm. Já no cenário crítico esse valor é obtido para a espessura mínima de análise

Os resultados do impacto ambiental mostraram que existe uma vantagem ambiental em termos de emissão de CO₂ com o uso do agregado reciclado. Porém é importante citar que para espessuras muito baixas, o teor de fibra exigido para resistir aos esforços solicitantes se torna muito elevado, que acaba por “consumir” a vantagem de emissão zero do uso do agregado reciclado. No caso deste trabalho, a espessura mínima que viabiliza o uso do agregado reciclado em pavimento de CRFA, em termos técnicos e ambientais, foi de 14 cm no cenário crítico e 20 cm para o cenário conservador.

Por fim, conclui-se que é possível a utilização do concreto com agregado reciclado reforçado com fibras de aço para produção de pavimentos, com a ressalva de que, apesar da proximidade do comportamento pós-fissuração deste concreto com àquele que faz uso de agregado natural, o primeiro perde muito na resistência de pico. Dessa forma, uma possível solução para este inconveniente, seria a substituição parcial do agregado natural pelo reciclado.

9. PERSPECTIVAS DO ESTUDO

Avaliar o grau de substituição ótimo de agregado natural pelo reciclado para viabilizar o pavimento (seja do ponto de vista técnico, econômico ou ambiental), mantendo a dosagem proposta para a matriz, mas caracterizando o teor ideal de fibras no novo compósito.

É interessante, também, executar um pavimento-teste e realizar o acompanhamento de sua vida-útil, prevendo-se um horizonte de breve fissuração da estrutura, de forma a possibilitar a avaliação do comportamento do concreto com agregado reciclado reforçado com fibras de aço nesse tipo de aplicação.

10. REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C1609: Standard test method for flexural performance of fiber-reinforce concrete (using beam with third-point loading)**. Philadelphia, 2010. 8 p.

ÂNGULO, S. C. et al. Metodologia de caracterização de resíduos de construção e demolição. In: VI Seminário de Desenvolvimento Sustentável e Reciclagem na Construção Civil. **IBRACON CT-206**. São Paulo, 2003.

ÂNGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Argamassa e concreto endurecido – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica**. NBR 9778, ABNT, Rio de Janeiro, 2005.

_____. **Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. NBR NM 67, ABNT, Rio de Janeiro, 1998.

_____. **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. NBR 5738, ABNT, Rio de Janeiro, 2003.

_____. **Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto**. NBR 5739, ABNT, Rio de Janeiro, 2007.

_____. **Execução de pavimentos de concreto simples por meio mecânico**. NBR 7583, ABNT, Rio de Janeiro, 1986.

_____. **Fibras de aço para concreto – Especificação**. NBR 15530, ABNT, Rio de Janeiro, 2007.

BALBO, J. T. **Pavimentos de concreto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

BARRA, M.; VASQUEZ, E. Particularidades do processo de carbonatação em concretos de agregado reciclado. In: 4º Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções, 1997, Porto Alegre. **Anais**. Porto Alegre: UFRGS, 1997, p. 217-224.

BARROS, J. A. O.; ANTUNES, J. A. B. Experimental characterization of the flexural behaviour of steel fiber reinforced concrete according to RILEM TC 162-TDF recommendations. International RILEM Workshop on Test and Design Methods for Steelfibre Reinforced Concrete. **Proceedings**. RILEM Publications S.A.R.L, p. 77-89, 2003.

BASTOS, P. S. dos S. **Análise experimental de dormentes de concreto protendido reforçado com fibras de aço**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

BAZUCO, R. S. **Utilização de agregados reciclados de concreto para a produção de novos concretos**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

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

BERNARD, E. S. Influence of test machine control method on flexural performance of fiber reinforced concrete beams. **Journal of ASTM International**, v. 6, n. 9, 2009.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. da; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica – Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2006.

BIANCHI, F. R.; BRITO, I. R. T.; CASTRO, V. A. B. Estudo comparativo entre pavimento rígido e flexível. In: 50º Congresso Brasileiro do Concreto, 2008, Salvador. **Pavimentos**. IBRACON.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002. **Diário Oficial [da] União**, Brasília, DF, 7 jul. 2002, nº 136, pag. 95-96. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>. Acesso em: 19 maio 2014.

BRASIL. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes (DNIT). Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de pavimentos rígidos**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2005.

BUTTLER, A. M. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto – Influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados**. 2003. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

CÁCERES, A. R. E.; JOHN, V. M.; FIGUEIREDO, A. D. de. Comparação entre pavimentos de concreto armado e de concreto reforçado com fibras de aço com relação às emissões globais de CO₂. In: 56º Congresso Brasileiro do Concreto, 2014, Natal. **Anais**. IBRACON, 2014.

CARNEIRO, J. A.; LIMA, P. R. L.; LEITE, M. B.; TOLEDO FILHO, R. D. Compressive stress-strain behavior of steel fiber reinforced-recycled aggregate concrete. **Cement & Concrete Composites**, v. 46, p. 65-72, 2013.

CARNIO, M. A. **Propagação de trinca por fadiga do concreto reforçado com baixos teores de fibra**. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

CARRIJO, P. M. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

CECCATO, M. R. **Estudo da trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras de aço**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

CERVO, T. C. **Estudo da resistência à fadiga de concretos de cimento Portland para pavimentação**. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

CHODOUNSKY, M. A.; VIECILI, F. A. **Pisos industriais de concreto – Aspectos teóricos e executivos**. São Paulo: Reggenza, 2007.

FIGUEIREDO, A. D. de. 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. de. **Concreto reforçado com fibras**. Tese (Livre-Docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

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

FIGUEIREDO, A. D. de; MOURAD, F. A.; CARVALHO, J. L. C. Aspectos do controle do concreto reforçado com fibras de aço para pavimentos. In: 42º Congresso Brasileiro do Concreto, 2000, Fortaleza. **Anais**. IBRACON, 2000.

FIGUEIREDO, A. D. de; NUNES, N. L.; TANESI, J. Mix design analysis on steel fiber reinforced concrete. In: Fifth International RILEM Symposium on Fiber Reinforced Concrete (FRC), 2000, Lyon, France. **Proceedings**. RILEM Publications S.A.R.L., p. 103-118, 2000.

FREITAS, M. K. **Mudanças Climáticas e o papel das Cidades nas Políticas Públicas**, 2007.

GAO, J.; SUN, W.; MORINO, K. Mechanical properties of steel fiber-reinforced, high-strength, lightweight concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 19, p. 307-313, 1997.

GUIMARÃES NETO, G. L. **Estudo comparativo entre a pavimentação flexível e rígida**. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção da graduação de Engenheiro Civil. Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade da Amazônia, Belém, 2011.

HABERT, G; DENARIÉ, E; SAJNA, A; ROSSI, P. Lowering the global warming impact of bridge rehabilitation by using Ultra High Performance Fibre Reinforced Concretes. **Cement and Concrete Composites**, ed. 38, p. 1-11, 2012.

HANSEN, T. C. Recycling of demolished concrete and masonry. **RILEM Report**. London: Chapman & Hall, n. 6, 1. ed., 316 p., 1992.

JADOVSKI, I; MASUERO, A. B. Estudo dos custos de implantação, operação e manutenção de usinas de reciclagem de resíduos de construção e demolição. In: XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, 2006, Florianópolis. **XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído**. Porto Alegre: Antac, 2006.

JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Method of tests for flexural strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete**. JSCE-SF4. Concrete Library of JSCE. Part III - 2 Method of tests for steel fiber reinforced concrete, n. 3, June 1984. p.58-61.

JUAN, M. S. de; GUTIÉRREZ, P. A. Influence of recycled aggregate quality on concrete properties. In: Internacional RILEM Conference on Use of Recycled Materials in Buildings and Structures, 2004, Barcelona, Spain. **Proceedings**. RILEM Publications S.A.R.L., p. 545-553, 2004.

LARRARD, F. de. **Concrete mixture-proportioning - A scientific approach**. London: E & FN SPON, 1999.

LEE, C. J.; LANGE, D. A.; LEE, J. Y.; SHIN, S. W. Effects of fiber volume fraction and water/cement ratio on toughness development of steel fiber reinforced concrete. **Journal of Korea Institute of Building Construction**, v. 13, n. 1, p. 20-24, 2013.

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

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

LIMA, J. A. R. de. **Avaliação das consequências da produção de concreto no Brasil para as mudanças climáticas**. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.

LOSBERG, A. Design methods for structurally reinforced concrete pavements. **Series Chalmers University of Technology**. Göteborg: Chalmers University Books, 1961.

MAULTZSCH, M.; MELLMANN, G. Properties of large scale processed building rubble with respect to the reuse as aggregate in concrete. **Sustainable construction: use of recycled concrete aggregate**. London: Thomas Telford Pub., 1998. p. 99-107.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994. 573 p.

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

MERRETZ, W.; BORGERT, J.; SMITH, G; BAWEJA, D. Steel reinforced concrete in construction contracts and the 3mm residual flexural strength beam test. In: Concrete 2011 – Building a Sustainable Future, 2011, Perth, Australia. **Proceedings**. 2011.

MEYERHOF, G. G. Load-carrying capacity of concrete pavements. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, v. 88, p. 89-116, June 1962.

MODLER, L. E. A.; POZZOBON, C. E. Avaliação da viabilidade técnica de concreto elaborado com agregado graúdo reciclado. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**. Rio Grande: Editora Dunas, n. 11, p. 43-53, abr. 2008.

NAYAR, S. K.; GETTU, R. On the design of steel fibre reinforced concrete pavements and slabs-on-grade. In: 8th International RILEM Symposium on Fiber Reinforced Concrete: challenges and opportunities (BEFIB 2012), 2012, Guimarães, Portugal. **Proceedings**. RILEM Publications S.A.R.L., p. 1070-1081, 2012.

NEVES, P. B. das. **Características de fragmentação e microestruturais de rochas e seu comportamento na britagem para a produção de agregado**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005.

PARMENTIER, B.; VANDEWALLE, L.; RICKSTAL, F. van. Evaluation of scatter of the postpeak behaviour of fibre reinforced concrete in bending: A step towards reliability. In:

BEFIB 2008: 7th RILEM International Symposium on Fiber Reinforced Concrete, 2008, Chennai, India. **Proceedings**. RILEM Publications S.A.R.L., p. 133-143, 2008.

PIETRA, I. F. D. **Avaliação do concreto com agregados graúdos reciclados de resíduos de construção e demolição reforçado com fibras de aço**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

RAO, A.; JHA, K. N.; MISRA, S. Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. **Resources Conservation & Recycling**, v. 50, p. 71-81, July 2006.

REPORT ACI 544.1R-96. ACI manual of concrete practice. **American Concrete Institute**. Farmington Hills, Michigan, 2002.

RILEM TC 121-DRG. Specifications for concrete with recycled aggregates. **Materials and Structures Detail**. RILEM Publications S.A.R.L., v. 27, p. 557-559, 1994.

SALVADOR, R. P. **Análise comparativa de métodos de ensaio para caracterização do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

SAMAH, H. R.; HOVER, K. C. Influence of microcracking on the mass transport properties of concrete. **Materials Journal**. Michigan, v. 89, n. 4, p. 416-424, July 1992.

SÃO PAULO (Cidade). Secretaria Municipal de Infraestrutura Urbana e Obras (SIURB). **Instrução de Projeto IP-07 – Dimensionamento de pavimentos de concreto**. São Paulo, 2004a.

SÃO PAULO (Cidade). Secretaria Municipal de Infraestrutura Urbana e Obras (SIURB). **Instrução de Projeto IP-08 – Análise mecanicista à fadiga de estruturas de pavimento**. São Paulo, 2004b.

SÃO PAULO (Cidade). Secretaria do Verde e do Meio Ambiente. Decreto nº 48.075, de 28 de dezembro de 2006. **Secretaria do Governo Municipal**, 28 dez. 2006. Disponível em: <<http://leismunicipa.is/amteb>>. Acesso em: 19 maio 2014.

SÃO PAULO (Estado). Secretaria dos Transportes. Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER-SP). Diretora de Engenharia. **Avaliação funcional e estrutural de pavimento**. São Paulo, 2006.

SINDUSCON-SP. **Gestão ambiental de resíduos da construção civil: a experiência do SindusCon-SP**. São Paulo: Obra Limpa: I&T: SindusCon-SP, 2005.

TABSH, S. W.; ABDELFAH, A. S. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. **Construction and Buildings Materials**, v. 23, p. 1163-1167, Feb. 2009.

THE CONCRETE SOCIETY. **TR 34: Concrete industrial ground floors: a guide to design and construction**. England, 2003, 96 p.

VANDEWALLE, L.; RICKSTAL, F. van; HEIRMAN, PARMENTIER, B. On the round panel and 3-point bending tests. In: BEFIB 2008: 7th RILEM International Symposium on Fiber Reinforced Concrete, 2008, Chennai, India. **Proceedings**. RILEM Publications S.A.R.L., p. 173-182, 2008.

VANESSA C. H. C. OLIVEIRA. **Estratégias para a minimização da emissão de CO₂ de concretos estruturais**. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2014 (no prelo).

VIEIRA, L. de B. P. Implantação de modelo sustentável para centrais dosadoras de concreto: Redução do volume de resíduos com o uso de estabilizador de pega em centrais dosadoras de concreto. In: 52º Congresso Brasileiro do Concreto, 2010, Fortaleza. **Seminário de Sustentabilidade**. IBRACON.

WESTERGAARD, H. M. Computation of stresses in concrete roads. In: Fifth Annual Meeting of the Highway Research Board, 1925, Washington, D.C, USA. **Proceedings**. Highway Research Board, v. 5, p. 90-112, 1926.

XIAO, J.; LI, J.; ZHANG, C. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 1187-1194, 2005.

APÊNDICE A. RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DAS FIBRAS DE AÇO

Tabela1. Caracterização geométrica das fibras de aço.

Amostra	d ₁ mm	d ₂ mm	(d ₁ -d ₂)/d ₁ %	Aceito? (S=1;N=0)	d _e = (d ₁ +d ₂)/2 mm	Δd _e %	Aceito? (S=1;N=0)	l mm	Δl %	Aceito? (S=1;N=0)
1	0,76	0,79	3,80%	Sim	0,775	3,33%	1	61,82	3,03%	1
2	0,76	0,76	0,00%	1	0,760	1,33%	1	61,87	3,12%	1
3	0,76	0,75	1,32%	1	0,755	0,67%	1	61,75	2,92%	1
4	0,76	0,73	3,95%	1	0,745	0,67%	1	61,81	3,02%	1
5	0,79	0,76	3,80%	1	0,775	3,33%	1	61,73	2,88%	1
6	0,76	0,73	3,95%	1	0,745	0,67%	1	61,96	3,27%	1
7	0,79	0,74	6,33%	0	0,765	2,00%	1	61,57	2,62%	1
8	0,76	0,75	1,32%	1	0,755	0,67%	1	61,94	3,23%	1
9	0,77	0,73	5,19%	0	0,750	0,00%	1	61,69	2,82%	1
10	0,77	0,75	2,60%	1	0,760	1,33%	1	61,63	2,72%	1
11	0,77	0,76	1,30%	1	0,765	2,00%	1	61,36	2,27%	1
12	0,73	0,74	1,35%	1	0,735	2,00%	1	61,90	3,17%	1
13	0,77	0,76	1,30%	1	0,765	2,00%	1	61,74	2,90%	1
14	0,73	0,75	2,67%	1	0,740	1,33%	1	61,38	2,30%	1
15	0,73	0,73	0,00%	1	0,730	2,67%	1	61,89	3,15%	1
16	0,74	0,75	1,33%	1	0,745	0,67%	1	61,75	2,92%	1
17	0,79	0,75	5,06%	0	0,770	2,67%	1	61,85	3,08%	1
18	0,79	0,74	6,33%	0	0,765	2,00%	1	61,90	3,17%	1
19	0,75	0,80	6,25%	0	0,775	3,33%	1	61,85	3,08%	1
20	0,75	0,76	1,32%	1	0,755	0,67%	1	61,69	2,82%	1
21	0,76	0,73	3,95%	1	0,745	0,67%	1	61,89	3,15%	1
22	0,75	0,72	4,00%	1	0,735	2,00%	1	61,93	3,22%	1
23	0,78	0,74	5,13%	0	0,760	1,33%	1	61,83	3,05%	1
24	0,74	0,75	1,33%	1	0,745	0,67%	1	61,71	2,85%	1
25	0,75	0,76	1,32%	1	0,755	0,67%	1	61,75	2,92%	1
26	0,76	0,77	1,30%	1	0,765	2,00%	1	61,64	2,73%	1
27	0,76	0,75	1,32%	1	0,755	0,67%	1	61,90	3,17%	1
28	0,73	0,77	5,19%	0	0,750	0,00%	1	61,54	2,57%	1
29	0,76	0,74	2,63%	1	0,750	0,00%	1	61,59	2,65%	1
30	0,76	0,75	1,32%	1	0,755	0,67%	1	61,72	2,87%	1
31	0,75	0,77	2,60%	1	0,760	1,33%	1	61,81	3,02%	1
32	0,75	0,75	0,00%	1	0,750	0,00%	1	61,84	3,07%	1
33	0,76	0,79	3,80%	1	0,775	3,33%	1	61,86	3,10%	1
34	0,74	0,74	0,00%	1	0,740	1,33%	1	61,93	3,22%	1
35	0,75	0,75	0,00%	1	0,750	0,00%	1	61,75	2,92%	1
36	0,78	0,75	3,85%	1	0,765	2,00%	1	61,75	2,92%	1
37	0,76	0,73	3,95%	1	0,745	0,67%	1	61,76	2,93%	1
38	0,78	0,75	3,85%	1	0,765	2,00%	1	61,77	2,95%	1
39	0,76	0,76	0,00%	1	0,760	1,33%	1	61,99	3,32%	1

Continuação da Tabela1.

40	0,73	0,76	3,95%	1	0,745	0,67%	1	61,63	2,72%	1
41	0,77	0,82	6,10%	0	0,795	6,00%	0	61,80	3,00%	1
42	0,75	0,74	1,33%	1	0,745	0,67%	1	61,54	2,57%	1
43	0,74	0,74	0,00%	1	0,740	1,33%	1	61,68	2,80%	1
44	0,77	0,80	3,75%	1	0,785	4,67%	1	61,78	2,97%	1
45	0,76	0,75	1,32%	1	0,755	0,67%	1	61,70	2,83%	1
46	0,76	0,76	0,00%	1	0,760	1,33%	1	61,99	3,32%	1
47	0,77	0,74	3,90%	1	0,755	0,67%	1	61,72	2,87%	1
48	0,76	0,75	1,32%	1	0,755	0,67%	1	61,69	2,82%	1
49	0,76	0,74	2,63%	1	0,750	0,00%	1	61,83	3,05%	1
50	0,74	0,73	1,35%	1	0,735	2,00%	1	61,51	2,52%	1
51	0,74	0,79	6,33%	0	0,765	2,00%	1	61,88	3,13%	1
52	0,73	0,73	0,00%	1	0,730	2,67%	1	61,85	3,08%	1
53	0,73	0,81	9,88%	0	0,770	2,67%	1	61,89	3,15%	1
54	0,78	0,78	0,00%	1	0,780	4,00%	1	61,04	1,73%	1
55	0,75	0,79	5,06%	0	0,770	2,67%	1	61,95	3,25%	1
56	0,73	0,79	7,59%	0	0,760	1,33%	1	61,88	3,13%	1
57	0,77	0,77	0,00%	1	0,770	2,67%	1	61,89	3,15%	1
58	0,74	0,74	0,00%	1	0,740	1,33%	1	62,01	3,35%	1
59	0,75	0,80	6,25%	0	0,775	3,33%	1	61,71	2,85%	1
60	0,74	0,73	1,35%	1	0,735	2,00%	1	61,90	3,17%	1
			Total	78,33%	Total		98,33%	Total	100,00%	

APÊNDICE B. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DO CRFA COM AGREGADO NATURAL

Tabela 1. Resistência à compressão do CRFA com agregado natural com 3 dias de idade.

CP	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	d (mm)	h (mm)	h/d	A (mm ²)	F (N)	fc (MPa)
20N-1	98,83	100,03	99,43	200,00	2,01	7764,70	261198	33,64
20N-2	100,96	99,63	100,30	200,00	1,99	7900,39	268394	33,97
35N-1	100,14	101,04	100,59	200,00	1,99	7946,93	261219	32,87
35N-2	100,51	99,90	100,21	200,00	2,00	7886,22	267738	33,95
50N-1	99,09	99,09	99,09	200,00	2,02	7711,69	265082	34,37
50N-2	99,67	99,67	99,67	200,00	2,01	7802,23	263324	33,75
Média	99,87	99,89	99,88	200,00	2,00	7835,36	264492,50	33,76
Desvio padrão	0,75	0,59	0,52	0,00	0,01	82,31	2858,83	0,46
CV	0,75%	0,59%	0,53%	0,00%	0,53%	1,05%	1,08%	1,36%

Tabela 2. Resistência à compressão do CRFA com agregado natural com 7 dias de idade.

CP	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	d (mm)	h (mm)	h/d	A (mm ²)	F (N)	fc (MPa)
20N-3	98,46	98,70	98,58	200,00	2,03	7632,51	319093	41,81
20N-4	100,28	100,50	100,39	200,00	1,99	7915,36	304373	38,45
35N-3	97,95	99,84	98,90	200,00	2,02	7681,37	307381	40,02
35N-4	99,69	98,94	99,32	200,00	2,01	7746,75	313724	40,50
50N-3	99,49	98,20	98,85	200,00	2,02	7673,60	337748	44,01
50N-4	99,07	99,18	99,13	200,00	2,02	7717,14	339888	44,04
Média	99,16	99,23	99,19	200,00	2,02	7727,79	320367,83	41,47
Desvio padrão	0,78	0,75	0,58	0,00	0,01	91,13	13864,62	2,06
CV	0,78%	0,76%	0,59%	0,00%	0,58%	1,18%	4,33%	4,96%

Tabela 3. Resistência à compressão do CRFA com agregado natural com 14 dias de idade.

CP	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	d (mm)	h (mm)	h/d	A (mm ²)	F (N)	fc (MPa)
20N-5	99,17	98,61	98,89	200,00	2,02	7680,59	365113	47,54
20N-6	98,25	100,50	99,38	200,00	2,01	7756,11	359484	46,35
35N-5	100,48	99,30	99,89	200,00	2,00	7836,71	361451	46,12
35N-6	99,97	100,39	100,18	200,00	2,00	7882,28	369543	46,88
50N-5	100,07	98,77	99,42	200,00	2,01	7763,14	377118	48,58
50N-6	98,41	100,10	99,26	200,00	2,02	7737,39	390096	50,42
Média	99,39	99,61	99,50	200,00	2,01	7776,04	370467,50	47,65
Desvio padrão	0,85	0,76	0,42	0,00	0,01	66,00	10495,77	1,48
CV	0,85%	0,76%	0,42%	0,00%	0,42%	0,85%	2,83%	3,11%

Tabela 4. Resistência à compressão do CRFA com agregado natural com 28 dias de idade.

CP	d₁ (mm)	d₂ (mm)	d (mm)	h (mm)	h/d	A (mm²)	F (N)	f_c (MPa)
20N-7	98,86	98,50	98,68	200,00	2,03	7648,00	356918	46,67
35N-7	100,55	100,19	100,37	200,00	1,99	7912,21	343577	43,42
50N-7	99,81	99,79	99,80	200,00	2,00	7822,60	412140	52,69
Média	99,74	99,49	99,62	200,00	2,01	7794,27	370878,33	47,59
Desvio padrão	0,69	0,72	0,70	0,00	0,01	109,70	29680,40	3,84
CV	0,69%	0,72%	0,70%	0,00%	0,71%	1,41%	8,00%	8,06%

APÊNDICE C. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DO CRFA COM AGREGADO RECICLADO

Tabela 1. Resistência à compressão do CRFA com agregado reciclado com 3 dias de idade.

CP	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	d (mm)	h (mm)	h/d	A (mm ²)	F (N)	fc (MPa)
20R-1	99,71	101,30	100,51	200,00	1,99	7933,51	109042	13,74
20R-2	100,05	100,85	100,45	200,00	1,99	7924,83	110761	13,98
35R-1	100,70	99,97	100,34	200,00	1,99	7906,69	135102	17,09
35R-2	99,13	100,00	99,57	200,00	2,01	7785,80	136958	17,59
50R-1	100,90	99,90	100,40	200,00	1,99	7916,94	145549	18,38
50R-2	101,15	101,43	101,29	200,00	1,97	8057,92	130211	16,16
Média	100,27	100,58	100,42	200,00	1,99	7920,95	127937,17	16,16
Desvio padrão	0,71	0,64	0,50	0,00	0,01	78,97	13540,71	1,75
CV	0,71%	0,64%	0,50%	0,00%	0,50%	1,00%	10,58%	10,86%

Tabela 2. Resistência à compressão do CRFA com agregado reciclado com 7 dias de idade.

CP	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	d (mm)	h (mm)	h/d	A (mm ²)	F (N)	fc (MPa)
20R-3	100,54	100,24	100,39	200,00	1,99	7915,36	132369	16,72
20R-4	100,33	100,52	100,43	200,00	1,99	7920,88	147800	18,66
35R-3	99,19	99,42	99,31	200,00	2,01	7745,19	154546	19,95
35R-4	100,97	98,32	99,65	200,00	2,01	7798,32	157166	20,15
50R-3	101,03	101,29	101,16	200,00	1,98	8037,25	154474	19,22
50R-4	100,25	101,64	100,95	200,00	1,98	8003,12	164253	20,52
Média	100,39	100,24	100,31	200,00	1,99	7903,35	151768,00	19,21
Desvio padrão	0,61	1,12	0,66	0,00	0,01	103,59	9934,11	1,27
CV	0,61%	1,12%	0,66%	0,00%	0,66%	1,31%	6,55%	6,61%

Tabela 3. Resistência à compressão do CRFA com agregado reciclado com 14 dias de idade.

CP	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	d (mm)	h (mm)	h/d	A (mm ²)	F (N)	fc (MPa)
20R-5	100,02	100,82	100,42	200,00	1,99	7920,09	146432	18,49
20R-6	98,90	99,78	99,34	200,00	2,01	7750,65	143540	18,52
35R-5	100,40	98,70	99,55	200,00	2,01	7783,45	174110	22,37
35R-6	99,12	99,93	99,53	200,00	2,01	7779,55	186286	23,95
50R-5	100,49	98,94	99,72	200,00	2,01	7809,28	185530	23,76
50R-6	99,11	99,52	99,32	200,00	2,01	7746,75	178392	23,03
Média	99,67	99,62	99,64	200,00	2,01	7798,30	169048,33	21,68
Desvio padrão	0,65	0,69	0,37	0,00	0,01	58,39	17530,36	2,31
CV	0,65%	0,70%	0,37%	0,00%	0,37%	0,75%	10,37%	10,64%

Tabela 4. Resistência à compressão do CRFA com agregado reciclado com 28 dias de idade.

CP	d₁ (mm)	d₂ (mm)	d (mm)	h (mm)	h/d	A (mm²)	F (N)	f_c (MPa)
20R-7	100,88	100,31	100,60	200,00	1,99	7947,72	163240	20,54
35R-7	99,70	99,96	99,83	200,00	2,00	7827,30	202619	25,89
50R-7	102,51	101,65	102,08	200,00	1,96	8184,11	193126	23,60
Média	101,03	100,64	100,84	200,00	1,98	7986,38	186328,33	23,34
Desvio padrão	1,15	0,73	0,93	0,00	0,02	148,21	16779,60	2,19
CV	1,14%	0,72%	0,93%	0,00%	0,92%	1,86%	9,01%	9,38%

APÊNDICE D. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DO CRFA COM AGREGADO NATURAL

Tabela 1. Resistência à tração do CRFA com agregado natural com teor de fibras de 20 kg/m³.

CP	L (mm)	B ₁ (mm)	B ₂ (mm)	B (mm)	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	D (mm)	P _{pico} (N)	f _{ct} (MPa)	P _{0,75} (N)	f _{0,75} (MPa)	P _{3,0} (N)	f _{3,0} (MPa)	T _{3,0} (J)	f _{e,3} (MPa)
20N-1	450,00	153,35	151,78	152,57	152,68	151,35	152,02	39474,80	5,04	17480,20	2,23	14572,10	1,86	26,21	1,12
20N-2	450,00	150,00	152,71	151,36	153,60	151,67	152,64	41227,30	5,26	13015,40	1,66	10411,60	1,33	20,53	0,87
20N-3	450,00	153,68	152,02	152,85	152,75	150,97	151,86	45948,30	5,87	11024,50	1,41	10281,60	1,31	22,16	0,94
20N-4	450,00	153,59	153,64	153,62	147,60	148,59	148,10	39863,00	5,32	15183,80	2,03	13266,30	1,77	23,80	1,06
20N-5	450,00	153,69	153,17	153,43	147,57	148,37	147,97	34805,30	4,66	14951,70	2,00	12161,90	1,63	21,96	0,98
Média	450,00	152,86	152,66	152,76	150,84	150,19	150,52	40263,74	5,23	14331,12	1,87	12138,70	1,58	22,93	0,99
s	0,00	1,44	0,69	0,80	1,88	1,59	2,04	3572,68	0,39	2176,87	0,29	1650,77	0,22	1,94	0,09
CV	0,00%	0,94%	0,45%	0,52%	1,25%	1,06%	1,36%	8,87%	7,52%	15,19%	15,73%	13,60%	14,21%	8,46%	8,57%

Tabela 2. Resistência à tração do CRFA com agregado natural com teor de fibras de 35 kg/m³.

CP	L (mm)	B ₁ (mm)	B ₂ (mm)	B (mm)	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	D (mm)	P _{pico} (N)	f _{ct} (MPa)	P _{0,75} (N)	f _{0,75} (MPa)	P _{3,0} (N)	f _{3,0} (MPa)	T _{3,0} (J)	f _{e,3} (MPa)
35N-1	450,00	151,93	150,20	151,07	152,52	151,55	152,04	48244,20	6,22	29677,70	3,82	24437,30	3,15	43,10	1,85
35N-2	450,00	152,09	152,41	152,25	152,51	151,58	152,05	39889,30	5,10	18980,45	2,43	16243,60	2,08	27,95	1,19
35N-3	450,00	153,20	153,53	153,37	148,99	148,10	148,55	40262,90	5,35	17072,40	2,27	13691,90	1,82	25,25	1,12
35N-4	450,00	151,27	150,44	150,86	149,09	149,75	149,42	45696,60	6,11	49618,40	6,63	35729,70	4,77	64,91	2,89
35N-5	450,00	153,54	150,80	152,17	148,15	147,92	148,04	36267,60	4,89	23792,60	3,21	21631,10	2,92	35,48	1,60
Média	450,00	152,41	151,48	151,94	150,25	149,78	150,02	42072,12	5,53	27828,31	3,67	22346,72	2,95	39,34	1,73
s	0,00	0,84	1,28	0,91	1,88	1,59	1,71	4311,89	0,53	11734,47	1,58	7695,98	1,04	14,22	0,64
CV	0,00%	0,55%	0,85%	0,60%	1,25%	1,06%	1,14%	10,25%	9,64%	42,17%	43,05%	34,44%	35,27%	36,15%	36,96%

Tabela 3. Resistência à tração do CRFA com agregado natural com teor de fibras de 50 kg/m³.

CP	L (mm)	B ₁ (mm)	B ₂ (mm)	B (mm)	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	D (mm)	P _{pico} (N)	f _{ct} (MPa)	P _{0,75} (N)	f _{0,75} (MPa)	P _{3,0} (N)	f _{3,0} (MPa)	T _{3,0} (J)	f _{e,3} (MPa)
50N-1	450,00	152,60	151,26	151,93	152,38	151,97	152,18	42954,10	5,49	36438,90	4,66	28189,70	3,61	49,94	2,13
50N-2	450,00	152,47	152,27	152,37	151,67	152,40	152,04	36449,10	4,66	34610,40	4,42	28810,50	3,68	47,22	2,01
50N-3	450,00	151,71	151,93	151,82	151,02	150,99	151,01	42251,30	5,49	29389,40	3,82	25148,10	3,27	42,23	1,83
50N-4	450,00	151,25	151,84	151,55	154,04	154,29	154,17	46219,20	5,77	36821,40	4,60	32293,60	4,03	52,84	2,20
50N-5	450,00	154,41	154,82	154,62	148,87	149,90	149,39	37086,20	4,84	33616,70	4,38	28509,10	3,72	48,50	2,11
Média	450,00	152,49	152,42	152,46	151,60	151,91	151,75	40991,98	5,25	34175,36	4,38	28590,20	3,66	48,14	2,06
s	0,00	1,08	1,24	1,11	151,44	151,90	1,56	3705,47	0,43	2665,78	0,30	2270,63	0,25	3,50	0,13
CV	0,00%	0,71%	0,81%	0,73%	151,39	151,80	1,03%	9,04%	8,15%	7,80%	6,80%	7,94%	6,69%	7,27%	6,24%

Figura 1. Resultados obtidos no ensaio de tração na flexão para CRFA com agregado natural para o teor de 20 kg/m³.

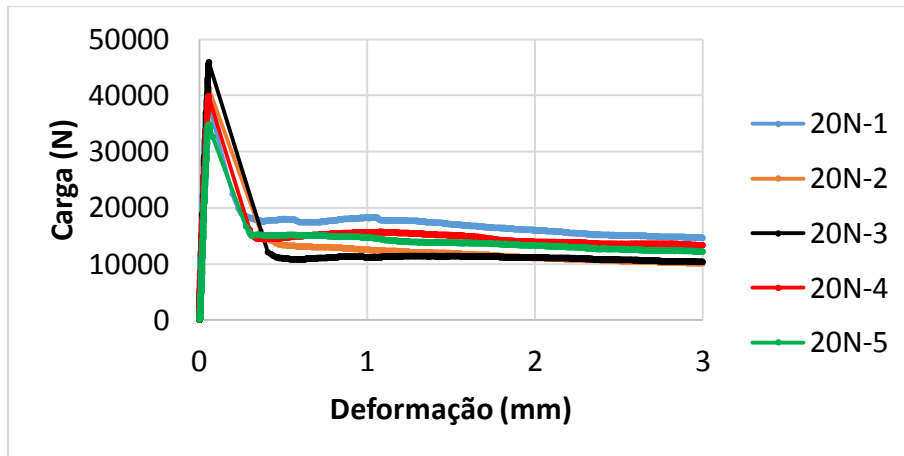


Figura 2. Resultados obtidos no ensaio de tração na flexão para CRFA com agregado natural para o teor de 35 kg/m³.

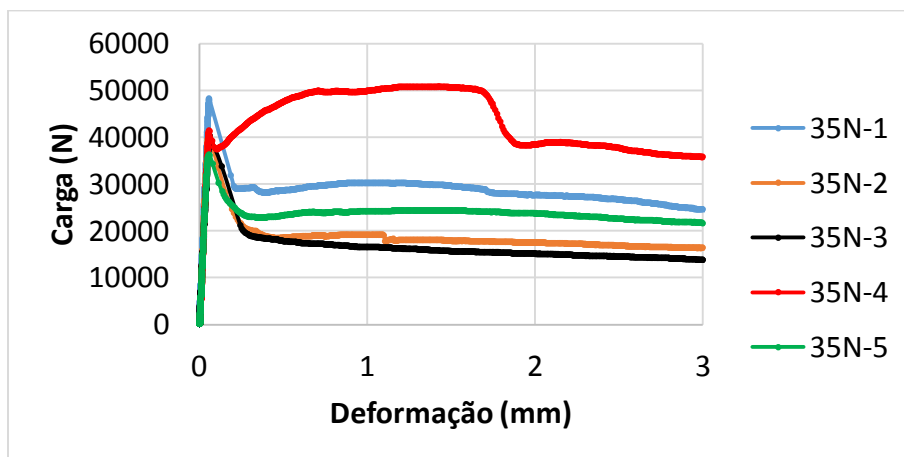
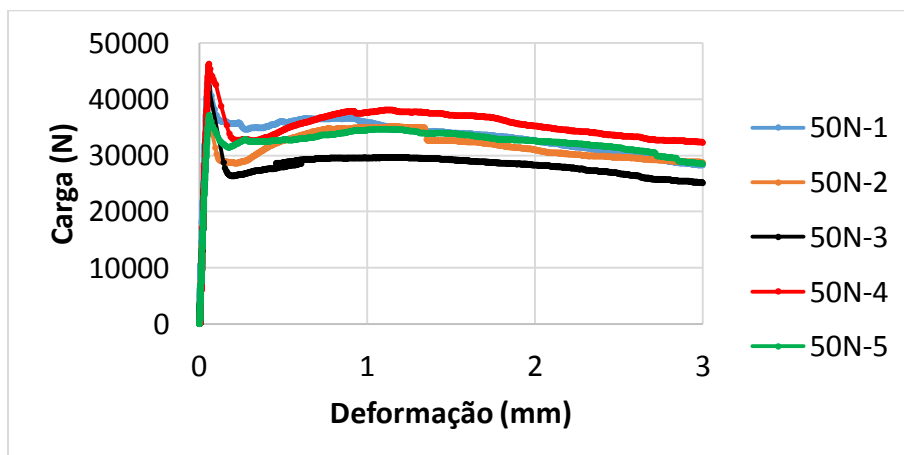


Figura 3. Resultados obtidos no ensaio de tração na flexão para CRFA com agregado natural para o teor de 50 kg/m³.



APÊNDICE E. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO DO CRFA COM AGREGADO RECICLADO

Tabela 1. Resistência à tração do CRFA com agregado reciclado com teor de fibras de 20 kg/m³.

CP	L (mm)	B ₁ (mm)	B ₂ (mm)	B (mm)	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	D (mm)	P _{pico} (N)	f _{ct} (MPa)	P _{0,75} (N)	f _{0,75} (MPa)	P _{3,0} (N)	f _{3,0} (MPa)	T _{3,0} (J)	f _{e,3} (MPa)
20R-1	450,00	150,67	152,90	151,79	149,10	152,97	151,04	22858,00	2,97	13473,20	1,75	12704,50	1,65	20,87	0,90
20R-2	450,00	154,42	152,69	153,56	155,19	153,30	154,25	23537,60	2,90	11744,20	1,45	12581,20	1,55	19,19	0,79
20R-3	450,00	152,59	152,80	152,70	151,13	150,83	150,98	23106,30	2,99	15595,10	2,02	16890,50	2,18	25,10	1,08
20R-4	450,00	152,92	152,97	152,95	151,44	150,95	151,20	19627,30	2,53	11360,80	1,46	12404,10	1,60	18,43	0,79
20R-5	450,00	154,63	154,10	154,37	150,44	149,42	149,93	20249,70	2,63	12730,60	1,65	13721,50	1,78	20,35	0,88
Média	450,00	153,05	153,09	153,07	151,46	151,49	151,48	21875,78	2,80	12980,78	1,67	13660,36	1,75	20,79	0,89
s	0,00	1,43	0,51	0,86	2,03	1,45	1,45	1608,75	0,19	1502,88	0,21	1678,93	0,23	2,32	0,11
CV	0,00%	0,94%	0,33%	0,56%	1,34%	0,96%	0,96%	7,35%	6,76%	11,58%	12,59%	12,29%	13,07%	11,16%	12,05%

Tabela 2. Resistência à tração do CRFA com agregado reciclado com teor de fibras de 35 kg/m³.

CP	L (mm)	B ₁ (mm)	B ₂ (mm)	B (mm)	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	D (mm)	P _{pico} (N)	f _{ct} (MPa)	P _{0,75} (N)	f _{0,75} (MPa)	P _{3,0} (N)	f _{3,0} (MPa)	T _{3,0} (J)	f _{e,3} (MPa)
35R-1	450,00	152,13	150,05	151,09	151,42	151,11	151,27	25120,70	3,27	23306,90	3,03	22056,00	2,87	34,65	1,50
35R-2	450,00	152,79	153,85	153,32	148,75	148,22	148,49	22737,80	3,03	16112,00	2,14	12490,90	1,66	22,67	1,01
35R-3	450,00	151,55	150,50	151,03	150,50	150,36	150,43	25500,00	3,36	28038,00	3,69	24993,00	3,29	40,89	1,79
35R-4	450,00	151,89	152,48	152,19	151,65	152,19	151,92	24892,20	3,19	23895,00	3,06	24506,60	3,14	36,71	1,57
35R-5	450,00	152,49	153,06	152,78	153,53	152,53	153,03	21801,00	2,74	24195,00	3,04	26082,20	3,28	37,49	1,57
Média	450,00	152,17	151,99	152,08	151,17	150,88	151,03	24010,34	3,12	23109,38	3,00	22025,74	2,85	34,48	1,49
s	0,00	0,44	1,47	0,91	1,56	1,54	1,53	1464,94	0,22	3875,29	0,49	4946,28	0,61	6,24	0,26
CV	0,00%	0,29%	0,97%	0,60%	1,03%	1,02%	1,01%	6,10%	6,96%	16,77%	16,47%	22,46%	21,49%	18,09%	17,51%

Tabela 3. Resistência à tração do CRFA com agregado reciclado com teor de fibras de 50 kg/m³.

CP	L (mm)	B ₁ (mm)	B ₂ (mm)	B (mm)	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	D (mm)	P _{pico} (N)	f _{ct} (MPa)	P _{0,75} (N)	f _{0,75} (MPa)	P _{3,0} (N)	f _{3,0} (MPa)	T _{3,0} (J)	f _{e,3} (MPa)
50R-1	450,00	153,77	155,33	154,55	149,44	148,54	148,99	25853,80	3,39	24573,60	3,22	20708,70	2,72	35,52	1,55
50R-2	450,00	152,39	151,83	152,11	151,35	152,43	151,89	26571,00	3,41	29330,90	3,76	29384,00	3,77	43,20	1,85
50R-3	450,00	152,73	152,20	152,47	148,72	148,78	148,75	24528,20	3,27	23263,90	3,10	20415,30	2,72	32,97	1,47
50R-4	450,00	151,05	149,49	150,27	148,84	148,77	148,81	23819,60	3,22	27679,80	3,74	26665,70	3,61	40,62	1,83
50R-5	450,00	152,26	152,38	152,32	149,80	149,98	149,89	23792,00	3,13	21060,30	2,77	19881,30	2,61	31,08	1,36
Média	450,00	152,44	152,25	152,34	149,63	149,70	149,67	24912,92	3,28	25181,70	3,32	23411,00	3,09	36,68	1,61
s	0,00	0,87	1,86	1,36	0,95	1,46	1,19	1116,63	0,10	2982,95	0,38	3873,12	0,50	4,57	0,20
CV	0,00%	0,57%	1,22%	0,89%	0,63%	0,97%	0,79%	4,48%	3,19%	11,85%	11,54%	16,54%	16,05%	12,46%	12,10%

Figura 1. Resultados obtidos no ensaio de tração na flexão para CRFA com agregado reciclado para o teor de 20 kg/m³.

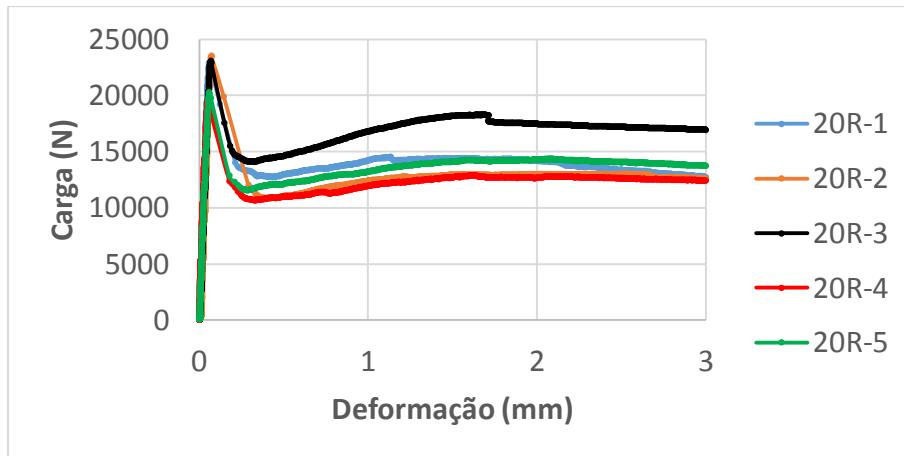


Figura 2. Resultados obtidos no ensaio de tração na flexão para CRFA com agregado reciclado para o teor de 35 kg/m³.

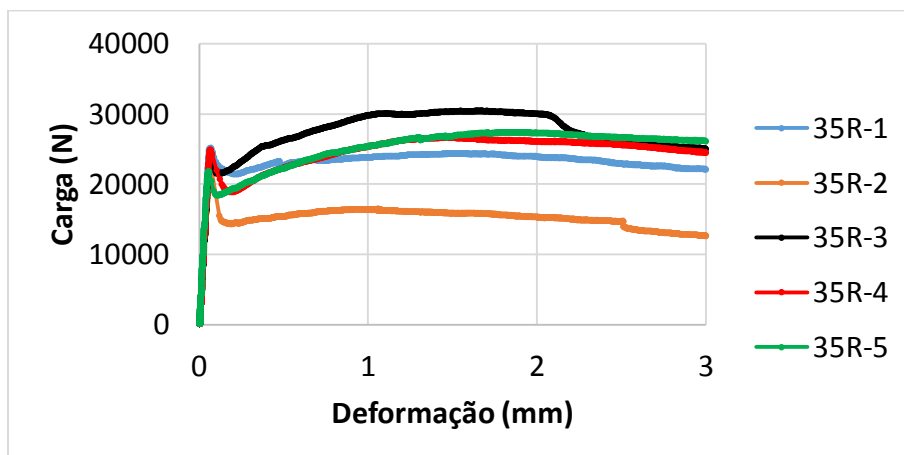
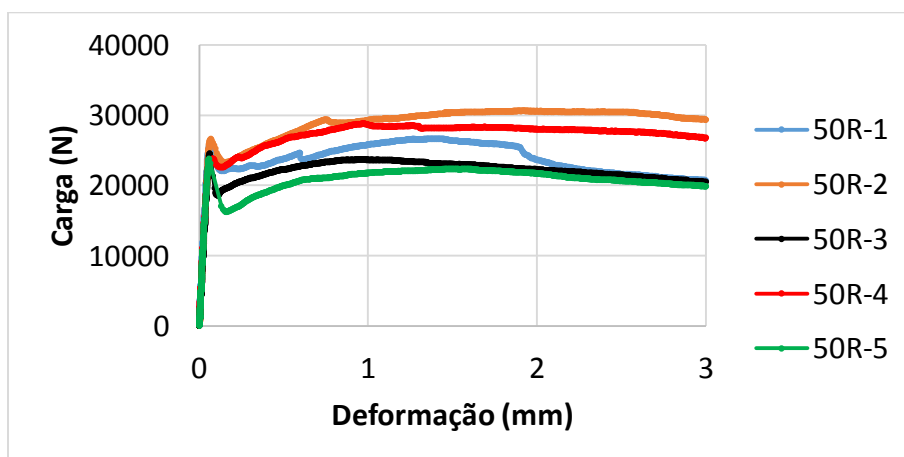


Figura 3. Resultados obtidos no ensaio de tração na flexão para CRFA com agregado reciclado para o teor de 50 kg/m³.



APÊNDICE F. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CRFA COM AGREGADO NATURAL

Tabela 1. Módulo de elasticidade do CRFA com agregado natural com 7 dias de idade.

CP	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	d (mm)	L (mm)	h/L	A (mm ²)	F _a (kN)	σ _a (MPa)	ΔL _a (mm)	F _b (kN)	σ _b (MPa)	ΔL _b (mm)	E _c (GPa)
20N-1	98,22	100,67	99,45	200,00	2,01	7767,04	3,92	0,51	0,008	79,36	10,22	0,060	37,35
35N-1	100,58	99,89	100,24	200,00	2,00	7890,94	3,93	0,50	0,014	79,36	10,06	0,066	36,77
35N-2	100,69	98,76	99,73	200,00	2,01	7810,84	3,93	0,50	0,020	79,33	10,16	0,076	34,48
50N-1	99,07	98,77	98,92	200,00	2,02	7685,25	3,93	0,51	0,014	79,36	10,33	0,066	37,75
50N-2	101,01	99,28	100,15	200,00	2,00	7876,77	3,93	0,50	0,016	79,39	10,08	0,068	36,85
Média	99,91	99,47	99,69	200,00	2,01	7806,17	3,93	0,50	0,014	79,36	10,17	0,067	36,64
Desvio padrão	1,08	0,73	0,48	0,00	0,01	75,29	0,00	0,00	0,004	0,02	0,10	0,005	1,14
CV	1,08%	0,73%	0,48%	0,00%	0,48%	0,96%	0,04%	0,96%	26,93%	0,03%	0,96%	7,67%	3,11%

Tabela 2. Módulo de elasticidade do CRFA com agregado natural com 28 dias de idade.

CP	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	d (mm)	L (mm)	h/L	A (mm ²)	F _a (kN)	σ _a (MPa)	ΔL _a (mm)	F _b (kN)	σ _b (MPa)	ΔL _b (mm)	E _c (GPa)
20N-3	98,50	99,48	98,99	200,00	2,02	7696,13	3,94	0,51	0,002	111,26	14,46	0,078	36,70
20N-4	99,94	100,50	100,22	200,00	2,00	7888,58	3,93	0,50	0,002	111,26	14,10	0,080	34,89
35N-3	100,29	99,61	99,95	200,00	2,00	7846,13	3,93	0,50	0,006	111,26	14,18	0,078	38,00
35N-4	100,31	100,19	100,25	200,00	2,00	7893,30	3,93	0,50	0,010	111,26	14,10	0,084	36,75
50N-3	100,17	99,96	100,07	201,00	2,01	7864,20	3,93	0,50	0,004	111,26	14,15	0,072	40,34
50N-4	101,41	100,89	101,15	200,00	1,98	8035,66	3,93	0,49	0,006	111,26	13,85	0,076	38,16
Média	100,10	100,11	100,10	200,17	2,00	7870,67	3,93	0,50	0,005	111,26	14,14	0,078	37,47
Desvio padrão	0,86	0,49	0,63	0,37	0,01	99,30	0,01	0,01	0,003	0,00	0,18	0,004	1,67
CV	0,85%	0,49%	0,63%	0,19%	0,66%	1,26%	0,14%	1,38%	55,38%	0,00%	1,26%	4,68%	4,47%

APÊNDICE G. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE DO CRFA COM AGREGADO RECICLADO

Tabela 1. Módulo de elasticidade do CRFA com agregado reciclado com 7 dias de idade.

CP	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	d (mm)	L (mm)	h/L	A (mm ²)	F _a (kN)	σ _a (MPa)	ΔL _a (mm)	F _b (kN)	σ _b (MPa)	ΔL _b (mm)	E _c (GPa)
20R-1	99,66	98,02	98,84	200,00	2,02	7672,83	3,92	0,51	0,014	38,43	5,01	0,066	17,30
20R-2	100,31	97,75	99,03	200,00	2,02	7702,35	3,93	0,51	0,018	38,46	4,99	0,072	16,60
35R-1	100,32	98,18	99,25	200,00	2,02	7736,61	3,93	0,51	0,016	38,50	4,98	0,060	20,31
35R-2	98,31	98,61	98,46	200,00	2,03	7613,94	3,93	0,52	0,014	38,37	5,04	0,056	21,54
50R-1	100,78	98,38	99,58	200,00	2,01	7788,15	3,92	0,50	0,010	38,45	4,94	0,054	20,15
Média	99,88	98,19	99,03	200,00	2,02	7702,78	3,93	0,51	0,014	38,44	4,99	0,062	19,18
Desvio padrão	0,86	0,29	0,38	0,00	0,01	58,69	0,00	0,00	0,003	0,04	0,03	0,007	1,90
CV	0,86%	0,30%	0,38%	0,00%	0,38%	0,76%	0,06%	0,80%	18,43%	0,11%	0,68%	10,75%	9,88%

Tabela 2. Módulo de elasticidade do CRFA com agregado reciclado com 28 dias de idade.

CP	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	d (mm)	L (mm)	h/L	A (mm ²)	F _a (kN)	σ _a (MPa)	ΔL _a (mm)	F _b (kN)	σ _b (MPa)	ΔL _b (mm)	E _c (GPa)
20R-3	99,92	100,53	100,23	200,00	2,00	7889,36	3,93	0,50	0,012	55,88	7,08	0,082	18,82
20R-4	100,00	100,70	100,35	200,00	1,99	7909,06	3,93	0,50	0,012	55,88	7,07	0,080	19,32
35R-3	99,79	100,69	100,24	200,00	2,00	7891,73	3,93	0,50	0,008	55,90	7,08	0,074	19,96
35R-4	100,18	101,26	100,72	200,00	1,99	7967,49	3,93	0,49	0,008	55,89	7,01	0,070	21,04
50R-3	101,44	100,38	100,91	200,00	1,97	7997,57	3,92	0,49	0,006	55,90	6,99	0,062	23,21
50R-4	100,39	101,72	101,06	200,00	1,98	8020,57	3,93	0,49	0,006	55,90	6,97	0,068	20,90
Média	100,29	100,88	100,58	200,00	1,99	7945,96	3,93	0,49	0,009	55,892	7,034	0,073	20,54
Desvio padrão	0,55	0,46	0,33	0,00	0,01	51,96	0,00	0,00	0,002	0,008	0,045	0,007	1,43
CV	0,55%	0,46%	0,33%	0,00%	0,44%	0,65%	0,04%	0,68%	28,78%	0,01%	0,64%	9,49%	6,97%

APÊNDICE H. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

Tabela 1. Absorção de água por imersão do CRFA com agregado natural com 28 dias de idade.

CP	h (mm)	ø ₀ (mm)	ø ₄₅ (mm)	ø ₉₀ (mm)	ø (mm)	V (cm³)	M _{sat} (g)	M _s (g)	A (%)	ρ (kg/m³)
20N-1	94,13	98,11	99,26	99,15	98,84	722,24	1762,48	1676,86	5,11	2321,74
20N-2	95,71	98,84	99,02	99,91	99,26	740,57	1770,70	1691,02	4,71	2283,40
35N-1	92,64	98,95	99,59	100,24	99,59	721,69	1753,39	1674,67	4,70	2320,49
35N-2	93,94	100,19	100,09	99,28	99,85	735,64	1786,91	1708,48	4,59	2322,44
50N-1	96,45	99,54	100,70	99,13	99,79	754,34	1892,37	1816,60	4,17	2408,20
50N-2	96,75	100,64	99,64	98,08	99,45	751,59	1919,87	1840,25	4,33	2448,48
Média	94,94	99,38	99,72	99,30	99,46	737,68	1814,29	1734,65	4,60	2350,79
Desvio Padrão	1,48	0,85	0,55	0,68	0,34	12,76	66,19	67,57	0,30	57,66
CV	1,56%	0,86%	0,55%	0,69%	0,35%	1,73%	3,65%	3,90%	6,51%	2,45%

Tabela 2. Absorção de água por imersão do CRFA com agregado reciclado com 28 dias de idade.

CP	h (mm)	ø ₀ (mm)	ø ₄₅ (mm)	ø ₉₀ (mm)	ø (mm)	V (cm³)	M _{sat} (g)	M _s (g)	A (%)	ρ (kg/m³)
20R-1	97,54	100,34	99,96	98,90	99,73	762,00	1650,19	1440,02	14,59	1889,80
20R-2	97,27	100,49	99,17	99,58	99,75	760,09	1643,62	1432,40	14,75	1884,51
35R-1	96,25	100,41	99,75	100,16	100,11	757,56	1684,01	1491,81	12,88	1969,23
35R-2	97,08	100,18	99,14	100,12	99,81	759,62	1694,42	1498,03	13,11	1972,08
50R-1	98,51	99,90	101,75	101,65	101,10	790,81	1794,02	1610,07	11,42	2035,97
50R-2	93,63	100,33	100,46	99,58	100,12	737,18	1696,51	1517,24	11,82	2058,16
Média	96,71	100,28	100,04	100,00	100,10	761,21	1693,80	1498,26	13,10	1968,29
Desvio Padrão	1,53	0,19	0,89	0,85	0,47	15,66	49,27	58,64	1,25	65,64
CV	1,58%	0,19%	0,89%	0,85%	0,47%	2,06%	2,91%	3,91%	9,58%	3,33%