

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Soraya Bonafé Ladeira dos Santos

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE CONCRETO COM AREIA DE BRITA
REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO PARA PAVIMENTOS**

Macaé

2019

Soraya Bonafé Ladeira dos Santos

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE CONCRETO COM AREIA DE BRITA
REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO PARA PAVIMENTOS**

Trabalho de conclusão de curso submetida à
Universidade Federal do Rio de Janeiro –
Campus Macaé como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do título de
bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Conrado Vidotte Plaza

Co-orientador: Thiago Variz de Miranda

Macaé

Fevereiro 2019

Nome: SANTOS, Soraya Bonafé Ladeira dos

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE CONCRETO COM AREIA DE BRITA
REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO PARA PAVIMENTOS**

Trabalho de conclusão de curso submetida à
Universidade Federal do Rio de Janeiro –
Campus Macaé como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do título de
bacharel em Engenharia Civil.

Macaé, 07 de fevereiro de 2019

Prof. Msc. Conrado Vidotte Plaza
Professor Orientador
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Msc. Thiago Variz de Miranda
Professor Co – orientador
Universidade Federal Fluminense

Prof. Msc. Juliana Correa Trindade
Engenheira Civil
Membro da Banca Examinadora

Prof. Dr. Marcelo Costa Cardoso
Membro da Banca Examinadora
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Humberto Rodrigues Torres
Membro da Banca Examinadora
Engenheiro Civil – UFRJ Campus Macaé

MACAÉ – RIO DE JANEIRO, BRASIL

FEVEREIRO DE 2019

Santos, Soraya Bonafé Ladeira

Análise de desempenho de concreto com areia de brita reforçado com fibras de aço para pavimentação / Soraya Bonafé. – Macaé: UFRJ/ Campus Macaé, 2019.

Orientador: Conrado Vidotte Plaza

Projeto de Graduação – UFRJ/ Campus Macaé/Curso de Engenharia Civil, 2019. Referências Bibliográficas: p. 99-108.

1. Pavimentos Rígidos. 2. Concreto Reforçado com Fibras de Aço. 3. Fibras de Aço. 4. Concreto com Areia de Brita. 5. Areia de Brita.

I. Plaza, Conrado Vidotte II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Campus Macaé, Curso de Engenharia Civil. III. Título.

Dedico este trabalho aos meus pais, Carlos Américo Fonseca dos Santos e Elza Bonafé Ladeira, e irmãos, Felipe Bonafé Ladeira dos Santos e Lucas Bonafé Ladeira dos Santos, por estarem comigo em todos momentos da minha vida me apoiando sempre. Obrigada por tudo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, Ele é o meu maior motivador e quem me levantou mesmo quando ninguém sabia que eu estava caída. Não me deixou desistir em nenhum momento, o Seu amor é meu guia, a minha segurança para lutar pelos meus sonhos conforme a Sua vontade. Que sejas sempre o centro em minha vida, a razão, a minha torre forte. Gratidão sempre estará em meu coração pelas bênçãos derramadas, e pelo principal, a Sua presença e amor em minha vida. “ Porque Dele, por meio Dele e para Ele, são todas as coisas! ”.

A meus pais, e meus irmãos, pelo amor incondicional, por saber que posso contar com vocês, saber que não tenho apenas uma casa na qual eu posso voltar a qualquer momento, tenho um lar. Quando eu vim morar em outra cidade me bateu desespero de ficar longe de minha família, mas Deus tem propósito em tudo e um dos aprendizados que eu tive, foi dar mais valor à essa família que Ele me deu, dar valor a cada noite em claro de minha mãe para cuidar de mim doente, a cada noite em claro de meu pai trabalhando para nos dar oportunidades na vida. Cada gesto e atitudes de vocês me permitiram estar aqui hoje finalizando um ciclo de minha vida que é mérito totalmente de vocês. Não sabem a gratidão que tenho e a emoção que escorre nos meus olhos ao escrever isso. Isto aqui é de vocês, muito obrigada!

À minhas amigas de infância que sempre estiveram presentes em todos os momentos de minha vida, me apoiando, chorando e sorrindo comigo, orando por mim, torcendo. Eu sou grata a Deus por ter me apresentado vocês e tê-las mantido comigo. Carmem, Laís e Thairiny, obrigada pela amizade de vocês. São essenciais para mim. Aos amigos que eu ganhei na caminhada, amigos da faculdade: Nara, Jonas, Laís, Lucas e Pamela, aqueles que Deus, com todo o seu cuidado, me deu para me ajudar nos estudos e na vida, a presença de vocês foi primordial na minha formação, vocês me deram força quando eu já pensava que não fosse conseguir, vocês me apoiaram, me levantaram, ficamos sem dormir, aflitos várias vezes, mas estávamos juntos. Eu quero tê-los comigo para toda vida.

Ao André, que foi o meu companheiro de iniciação científica, me ajudou em toda a pesquisa, sem você teria sido muito difícil. Muito obrigada por todo apoio, pelas várias vezes que ficou me ajudando até tarde da noite no laboratório. Ao Lucas, que me ajudou várias vezes enquanto realizava a sua pesquisa, e me cedeu areia e brita, obrigada!

Ao professor Conrado Vidotte Plaza, pela orientação. Você foi essencial para eu realizar essa pesquisa, a sua confiança, sua atenção em todos os momentos, seu conhecimento, são dignos de honra. Sempre disposto a ensinar, a ouvir e ajudar, sou muito grata, de verdade, a cada minuto dedicado a mim! Você é um profissional de excelência. Muito obrigada!

A Universidade Federal do Rio de Janeiro – Campus Macaé, e todos os profissionais que trabalham nesta instituição: professores, técnicos, funcionários de limpeza, xerox e restaurante. Todo aprendizado que eu obtive nessa Universidade foi de grande valia para mim, e sou grata a todos por isso!

À empresa Maccaferri, localizada em São Paulo, por ter concedido as fibras de aço para objeto de minha pesquisa sem cobrar valor algum, nem mesmo o valor de frete. Meu muito obrigada!

RESUMO

SANTOS, Soraya Bonafé Ladeira dos. Análise de desempenho de concreto com areia de brita reforçado com fibras de aço. 2019. XX f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Macaé, 2019.

Diante do crescimento das cidades e da situação atual das estradas e rodovias brasileiras, a utilização do pavimento rígido se torna uma alternativa relevante e eficiente devido a sua alta vida útil e baixa necessidade de manutenção. No entanto, devido ao concreto possuir baixa resistência à tração, baixa resistência à fadiga e à fissuração, por exemplo, a tecnologia do concreto reforçado com fibras de aço se apresenta como uma ótima possibilidade para se melhorar significativamente essas e outras importantes propriedades. Porém, devido ao alto consumo de concreto na pavimentação, faz-se necessária uma maior preocupação com relação aos recursos naturais utilizados em sua produção. A areia natural é um destes recursos que vem se esgotando em vários países, com exploração desenfreada nos leitos dos rios, portanto, a areia de brita se torna uma ótima alternativa de substituição, gerado a partir de resíduos do processo de britagem. Este trabalho apresenta um estudo do concreto reforçado com fibras de aço e substituição gradativa da areia natural pela areia de brita, no intuito de analisar as resistências à compressão axial e compressão diametral (tração indireta) do concreto composto por esses materiais, a fim de ser utilizado na pavimentação rígida. Além disso, foi averiguado a consistência alcançada por cada traço estudado, com análise de seus resultados para viabilidade de execução. Os resultados mostraram significativos ganhos de propriedades importantes para uso em pavimentação, como resistência à tração, resistência à propagação de fissuras e até aumento na resistência à compressão axial. Evidenciando, assim, a possibilidade de utilização da areia de brita na composição do concreto da pavimentação, juntamente com as fibras de aço. No entanto, a areia de brita retardou o ganho de resistência do concreto tanto para compressão quanto para tração, podendo não ser indicada a sua utilização para os casos onde se deseja resistência inicial, como por exemplo para a abertura da pista ao tráfego antes da completa cura do concreto.

Palavras-chave: Pavimentos Rígidos. Concreto Reforçado com Fibras de Aço. Fibras de Aço. Concreto com Areia de Brita. Areia de brita.

ABSTRACT

SANTOS, Soraya Bonafé Ladeira dos. Análise de desempenho de concreto com areia de brita reforçado com fibras de aço.2019. XX f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Macaé, 2019.

Abstract of Undergraduate Project presented to UFRJ Macaé as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

The growth of cities and the current situation of Brazilian roads and highways brings the use of rigid pavement as a relevant and efficient alternative due its high useful life and low maintenance needs. However, the concrete has low tensile strength, low fatigue strength and cracking, for example, the steel fiber reinforced concrete technology presents as an excellent possibility to improve these and other important properties. Due to the high consumption of concrete in the paving, it becomes necessary a greater concern about the natural resources used in its production. The natural sand is a resource that is being depleted in several countries, with unbridled exploitation in the riverbeds, then crushed sand is a great substitution alternative, generated from waste of the rock crushing process. This research presents a study of reinforced concrete with steel fibers and gradual replacement of natural sand by crushed sand, in order to analyze the resistance to axial compression and diametric compression (indirect traction) of the concrete composed of these materials, to be used in rigid paving. Besides that, the consistency achieved by each trait studied was analyzed to verify its viability of execution. The results showed significant gains of important properties for use in paving, such as tensile strength, resistance to crack propagation, and even increase in resistance to axial compression. Therefore, the results corroborate for possibility of using crushed sand in the composition of the concrete for pavements, together with the steel fibers. However, the crushed sand has retarded the resistance gain of the concrete for both compression and traction, it is not indicated its use in cases where initial resistance is necessary, such as for opening the roadway to the traffic before the concrete is completely cured.

Keywords: Rigid Pavement. Concrete Reinforced with Steel Fiber. Steel Fiber. Concrete with Crushed Sand. Crushed Sand.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição dos esforços do pavimento flexível e rígido. (Fonte Adaptada: ABCP, 2010).....	22
Figura 2 -Perfil longitudinal do pavimento rígido (Fonte: Bianchi et Al., 2008).	22
Figura 3 – Custo x anos de vida do pavimento flexível e pavimento rígido (Fonte: ABCP, [200?]).	23
Figura 4 - Propagação de fissuras em concreto simples (Fonte: Barros, 2009, apud Do Nascimento, 2015).....	27
Figura 5 - Propagação de fissuras em concreto reforçado com fibras (Fonte: Barros, 2009, apud Do Nascimento, 2015).....	27
Figura 6 - Representação da compatibilidade entre agregados e as fibras de aço e propagação de fissuras nesta situação. (Fonte: Figueiredo, 2000).....	29
Figura 7 - Representação da incompatibilidade entre agregados e fibras de aço e a propagação da fissura nesta situação. (Fonte: Figueiredo, 2000)	29
Figura 8 – Comportamento do concreto relacionado ao volume de fibras (Fonte: Figueiredo, 2011).....	30
Figura 9- Curva de cargas x deflexão para concretos de $f_{ck} = 20\text{MPa}$ e diferentes teores de fibras de aço (Fonte: Figueiredo, 2011).....	31
Figura 10 - Ouriço de fibras de aço formado na mistura do concreto (Fonte: Figueiredo, 2000).	33
Figura 11 - Demanda de água em partículas mais alongadas comparadas às esféricas para obtenção de mesma viscosidade (Fonte: Hawlitschek, 2014 apud, André, 2017).	35
Figura 12 - Exigências químicas para cada tipo de cimento (Fonte: Boletim Técnico, ABCP).	37
Figura 13 - Exigências físicas e mecânicas para cada tipo de cimento Portland (Fonte: Boletim Técnico, ABCP).	37
Figura 14 – Classificação e geometria das fibras de aço para reforço do concreto (Fonte: NBR 15330:2007).....	38
Figura 15 - Resistência limite conforme a classificação da fibra de aço (Fonte: NBR 15330:2007).....	39
Figura 16 - Comparação entre o formato de areia natural (primeira) e areia de brita (segunda) (Fonte: Coin, 2009 apud André, 2017).....	43

Figura 17 - Componentes micáceos: Muscovita à esquerda e Biotita à direita (Fonte: André, 2017).....	44
Figura 18 - Relação entre o teor de biotita e a resistência à compressão de argamassas (Fonte: Wakizaka et. Al., 2005 apud André, 2017).	45
Figura 19 - Relação entre a quantidade de água no concreto e consistência obtida (Fonte: Neville, 2016).....	48
Figura 20 - Perda de abatimento no decorrer do tempo. Mistura (A): sem aditivo, relação a/c de 0,58; Mistura (B): com aditivo, relação a/c de 0,47 (Fonte: Neville, 2016).	49
Figura 21 – Influência de repetidas dosagens de aditivo superplastificante à base de naftaleno na consistência do concreto (Fonte: Neville, 2016).	50
Figura 22 - Classes do concreto (Fonte: Banduk, 2005).	52
Figura 23 - curva de determinação da relação a/c em função das resistências do concreto e cimento aos 28 dias (Fonte: Bucher, 1989).	53
Figura 24 - Estimativa do consumo de água por volume de concreto (m ³), em função do diâmetro máximo do agregado graúdo e do abatimento do concreto (Fonte: Rodrigues, 1998).	54
Figura 25 - Volume compactado seco de agregado graúdo por metro cúbico de concreto (Fonte: Rodrigues, 1998).	55
Figura 26 - Fibras de aço utilizadas no concreto.....	68
Figura 27 - Características técnicas das fibras de aço utilizadas (Fonte: Ficha técnica de fibras de aço, Wirand).....	68
Figura 28 - Aditivo utilizado na pesquisa.....	69
Figura 29 - Ensaio de determinação de massa específica da areia natural.	61
Figura 30 - Ensaio de determinação da massa específica da areia de brita.	63
Figura 31 - Microscopia da Areia de Brita.	64
Figura 32 - Ensaio de Massa unitária compactada do agregado graúdo.	65
Figura 33 - Corpo de prova contendo pontos de fragilidade.	80
Figura 34 - Dois corpos de prova do traço T1 à esquerda, e os dois outros do traço T2, todos rompidos à compressão axial.....	87
Figura 35 – Microscopia do concreto após a ruptura e desprendimento das fibras de aço em (a) e (b).....	87
Figura 36 - Concreto simples, T0, rompido a compressão diametral.....	93
Figura 37 - Concreto com fibras de aço, T1, rompido a compressão diametral.....	93
Figura 38 - Concreto do traço T2 após rompimento à compressão diametral.....	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características do aditivo superplastificante utilizado na pesquisa.....	69
Tabela 2 - Resumo de características da areia natural.....	61
Tabela 3- Resumo das características obtidas para a areia de brita.....	63
Tabela 4 - Resumo das características obtidas do agregado graúdo.....	65
Tabela 5 - Traços e porcentagens de dosagens.....	73
Tabela 6 - Resultados de abatimentos de cone obtidos em cada traço.....	78
Tabela 7 - Resistências à compressão obtidas para o traço T0.....	81
Tabela 8 - Resistências à compressão obtidas para o traço T1.....	81
Tabela 9 - Resistências à compressão obtidas para o traço T2.....	82
Tabela 10 - Resistências à compressão obtidas para o traço T3.....	82
Tabela 11 - Resistências à compressão obtidas para o traço T4.....	83
Tabela 12 - Resistência Média à compressão de cada traço.....	83
Tabela 13 - Resistências à tração obtidas para o traço T0.....	88
Tabela 14 - Resistências à tração obtidas para o traço T1.....	88
Tabela 15 - Resistências à tração obtidas para o traço T2.....	89
Tabela 16 – Resistências à tração obtidas para o traço T3.....	89
Tabela 17 - Resistências à tração obtidas para o traço T4.....	90
Tabela 18 - Resistência Média à Tração de cada traço.....	90
Tabela 19 - Resistências à Tração direta e à Tração na Flexão obtidos por correlações.....	95

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva granulométrica dos agregados.....	67
Gráfico 2 - Consistência do concreto em cada traço - Abatimento de cone.....	79
Gráfico 3 - Resultados de resistência à compressão axial e consistência de cada traço.....	84
Gráfico 4 - Resultados de resistências à compressão diametral e consistências de cada traço.....	91

LISTA DE ABREVIATURAS

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI – American Concrete Institute

CNT – Confederação Nacional do Transporte

CP – Cimento Portland

CRFA – Concreto Reforçado com Fibras de Aço

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	6
RESUMO 8	
ABSTRACT	9
LISTA DE TABELAS	12
LISTA DE GRÁFICOS.....	13
LISTA DE ABREVIATURAS.....	13
SUMÁRIO.....	14
1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Contextualização	16
1.2 Justificativa.....	18
1.3 Motivação.....	19
1.4 Objetivos	20
1.4.1 Objetivo Geral	20
1.4.2 Objetivos Específicos	20
1.5 Estrutura do Trabalho.....	20
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1 Pavimentos de Concreto.....	21
2.2 Concreto para pavimentação	25
2.3 Concreto Reforçado com Fibras de Aço (CRFA)	26
2.4 Pavimento de concreto com fibras de aço	33
2.5 Concreto com Areia de Brita.....	34
2.6 Materiais da Composição do Concreto	35
2.6.1 Cimento Portland.....	35
2.6.2 Fibras de Aço	37
2.6.3 Agregados Miúdos	40
2.6.3.1 Areia Natural	40
2.6.3.2 Areia de Brita	41
2.6.4 Agregado Graúdo	45
2.6.5 Água de Amassamento.....	46
2.6.6 Aditivos Superplastificantes.....	47
2.7 Dosagem do concreto – Método ABCP	50
2.8 Ensaio no Concreto em estado fresco	56
2.9 Ensaio no Concreto em estado Endurecido.....	57
2.9.1 Ensaio de Resistência à compressão axial.....	57
2.9.2 Ensaio de Resistência à tração por compressão diametral	58

3	MATERIAIS E MÉTODOS	60
3.1	Programa Experimental.....	60
3.1.1	Etapa 1 – Caracterização e Especificação dos Materiais	60
3.1.2	Agregados Miúdos	60
3.1.3	Agregado Graúdo	64
3.1.4	Cimento Portland.....	67
3.1.5	Fibras de Aço	67
3.1.6	Aditivo.....	68
3.1.7	Etapa 2 – Definição dos Traços.....	69
3.1.7.1	Dosagem do Concreto	70
3.1.7.2	Dosagem das fibras de aço	72
3.1.8	Etapa 3 –Execução dos traços de concreto.....	72
3.1.8.1	Traços definidos para estudo.....	72
3.1.9	Etapa 4 – Ensaio no concreto em estado fresco	74
3.1.10	Etapa 5 – Ensaio no concreto em estado endurecido.....	76
3.1.10.1	Ensaio de resistência à compressão axial	76
3.1.10.2	Ensaio de resistência à tração indireta, por compressão diametral	76
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	78
4.1	Resultados dos ensaios do concreto fresco	78
4.2	Resultados dos ensaios do concreto endurecido	80
4.2.1	Ensaio de resistência a compressão axial.....	80
4.2.2	Ensaio de resistência a compressão diametral.....	88
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	96
5.1	Conclusões	96
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	98
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100

1 INTRODUÇÃO

Esta sessão objetiva-se a apresentar o tema abordado de forma genérica, mostrando a situação atual da pavimentação rígida no país, bem como a utilização do concreto e seus principais componentes, utilizados neste trabalho. Serão apresentados, também, os objetivos deste trabalho, e a motivação para se realizar a presente pesquisa.

1.1 Contextualização

Com o crescimento territorial do Brasil no século XX, o pavimento de concreto de cimento Portland chegou ao país com o lema do presidente da República vigente, Presidente Washington Luís: “Governar é abrir estradas”, sendo um período de grande incentivo à construção de novas estradas, como a construção da Rodovia Caminhos do Mar, em 1925, ligando o município de São Paulo a Santos. Esta foi a primeira obra a utilizar deste tipo de pavimento em toda a América Latina e uma das primeiras de todo o mundo. A partir de então, o pavimento rígido, foi utilizado em grande escala com ligações entre diversos Estados do país até a década de 70. Ao avistar a grande importância do pavimento de concreto, a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), na década de 90, iniciou seus estudos quanto à novas tecnologias a serem implementadas para melhorias no concreto de pavimentação (ABCP, 2009).

Porém, mesmo após anos terem se passado, segundo a ABCP (2012), a malha rodoviária do Brasil ainda possui aproximadamente apenas 4% de pavimentação em concreto, diferentemente de países como os Estados Unidos e Alemanha, que, segundo dados do ano de 1999 da Associação Rodoviária Mundial, possuem cerca de 20% e 40%, respectivamente, de rodovias pavimentadas de concreto (BALBO, 2009).

Atualmente, segundo dados da Confederação Nacional de Transportes (CNT), consolidados no relatório gerencial de 2018, as rodovias do Brasil são responsáveis por mais de 90% do transporte de passageiros e mais de 60% de transporte de cargas e que ainda cerca de 213.453 quilômetros de rodovia se encontram pavimentados, contra 1.507.248 quilômetros sem pavimentação, que interligam grandes mercados. Um outro dado importante apresentado no relatório foi o de pavimentos com alguns tipos de patologias, que representam 75,9% (81.351 km) do total de rodovias avaliadas, identificando-se desgaste em 52,8% (56.582 km) da extensão; trinca em malha ou remendo em 18,9% (20.304 km); afundamentos, ondulações ou buracos em 3,4% (6.644 km); e 0,8% (821 km) totalmente destruído. Ressalta-se que o setor de

transportes é de tamanha relevância no cenário do país, impactando diretamente em todo setor produtivo, econômico e social. Diante deste cenário, pavimentos degradados, carentes de grandes manutenções, podem gerar altos custos operacionais para transportadoras, além de aumentar a incidência de acidentes.

O uso do pavimento rígido tem crescido e se mostrado como uma alternativa de grandes vantagens para as rodovias, principalmente as rodovias de tráfego pesado e constante. As grandes cargas, transferidas ao pavimento, geram maior necessidade de manutenção no decorrer de sua vida útil, porém, uma das características do pavimento rígido é a sua alta durabilidade e consequente redução da necessidade de manutenção das rodovias, tornando, este, um empreendimento economicamente mais viável ao longo do tempo, em relação aos pavimentos flexíveis (RIBEIRO et. al., 2000; MESQUITA, 2001), além de melhorias ecológicas de emissão de material particulado (MESQUITA, 2001), economias no consumo de combustível em comparação ao pavimento flexível (TAYLOR et. Al., 2006) e segurança do tráfego (PACE & BECKER, 1997).

Diante disso, muitos estudos vêm se desenvolvido a fim de aprimorar a tecnologia aplicada aos materiais do concreto para pavimentação, e assim gerar maior desempenho estrutural, juntamente com estudos de viabilidade econômica de utilização, otimizando processos, bem como sua execução. A inserção de fibras de aço no concreto para pavimentação, por exemplo, tem sido uma das frentes de estudo com grandes resultados satisfatórios.

As fibras de aço têm apresentado grande utilização no concreto por seu relevante aumento de resistências adquiridas, inclusive à compressão e, principalmente, à tração. Além da resistência ao impacto, fadiga, à abrasão e por se tornarem mais tenazes e dúcteis (ALMEIDA, 1999). O concreto reforçado com este material ainda apresenta uma propagação de fissuras dificultada devido ao alto módulo de elasticidade apresentado pelas fibras (FIGUEIREDO, 2000). Devido à essas principais características, o concreto reforçado pelas fibras de aço (CRFA) pode ser aplicado em túneis, obras vinculadas a esforços dinâmicos e em pavimentos, por receberem grandes e constantes solicitações de impacto, possibilitando-se obter um crescimento de vida útil da estrutura e apresentando muitas vezes, vantagens econômicas.

Com o crescente uso desta tecnologia de reforços de concreto no Brasil, principalmente na pavimentação, (GRACIELLI COLPO, 2011) faz-se necessário estudos aprofundados do concreto com fibras de aço e análise de seu desempenho de diversas formas. Além disso, com maior preocupação ambiental (que se deve ter atualmente em todos setores econômicos), diante

dos recursos naturais com os quais são utilizados na produção do concreto, estudos de substituições de areia natural por outros materiais, é muito importante e necessário.

Na dosagem do concreto, o principal agregado miúdo utilizado é a areia natural, um dos recursos que, em alguns lugares do mundo, já se encontra escassa. De todos recursos naturais presentes e produzidos no planeta, aproximadamente 75% é consumido pela construção civil (PINTO, 1999) e os mais utilizados nas obras são os agregados e o cimento. A areia natural é obtida, principalmente, pela extração em leito de rios, e as licenças para exploração têm sido suspensas, tornando o custo desses agregados maior, e, devido à escassez desse recurso a cada dia mais evidente, o custo do metro cúbico do concreto também acaba por ser afetado, elevando-se o seu valor (ALMEIDA & SILVA, 2005 apud SILVA et. Al., 2015). Por outro lado, a areia de brita, ou pó de brita, é um produto do processo de britagem que, em muitos lugares, não possui uma finalidade adequada, sendo descartadas de forma irregular, resultando em impactos ao meio ambiente. Alguns estudos buscaram avaliar sua eficácia como agregado miúdo, os quais apresentaram bons resultados quanto ao seu desempenho no concreto bem gerenciado e planejado, com controle tecnológico eficaz (SILVA et. Al., 2015). Porém, a utilização de areia de brita como agregado miúdo ainda é muito pequena, segundo Valverde (apud SILVA et. Al., 2015), apenas 9% da areia utilizada no estado de São Paulo, tem essa origem na construção civil. Em suma, a sua utilização se torna uma alternativa sustentável de grande relevância e muita importância para incentivo de maiores estudos com relação às características, que seu uso, incorporam ao concreto.

1.2 Justificativa

A falta de estradas e rodovias pavimentadas em boas condições, geram uma grande desvantagem no setor de transportes, responsáveis por grande movimentação de produtos e mercadorias. Essas condições inadequadas acarretam problemas de segurança, com o aumento relevante de acidentes, além de custos elevados de operação do setor de transportes, devido a problemas mecânicos gerados nos veículos e até o aumento do consumo de combustíveis, ocasionando em elevados custos logísticos, que impactam nos preços finais das mercadorias e, consequente, redução da competitividade no cenário global.

Diante disso, o pavimento de concreto, ao contrário do pavimento flexível (mais utilizado atualmente), pode trazer resultados vantajosos e eficientes para pavimentação de rodovias do país, como ocorre em outros países mais desenvolvidos.

A utilização do reforço no concreto com fibras de aço pode também trazer ao pavimento um grande avanço com relação às resistências adquiridas, prolongando ainda mais a vida útil do pavimento e melhorando a sua eficácia na capacidade de absorção de grandes esforços ao qual é submetido.

Tudo isso ressalta a importância do estudo do pavimento rígido utilizando-se da tecnologia das fibras de aço em sua mistura. Além disso, diante da situação de possível escassez de um dos recursos naturais utilizados na produção do concreto, o presente trabalho apresenta uma preocupação ambiental e a busca por um concreto mais sustentável, através da substituição parcial da areia natural por areia de brita neste concreto reforçado. Pois, compreende-se por sustentabilidade, o ato de se aproveitar as matérias primas e reaproveitar os rejeitos e resíduos gerados por alguma atividade, como é o caso da areia de brita.

Portanto, diante do que foi apresentado, surge a necessidade de estudos aprofundados incluindo-se concentrações de areia de brita no concreto reforçado com fibras de aço para a pavimentação, no intuito de analisar sua viabilidade técnica e a redução do impacto ambiental na dosagem de um concreto mais sustentável ambientalmente, mantendo ainda o seu desempenho estrutural.

1.3 Motivação

A motivação para este trabalho teve início na prática de Iniciação Científica na área de materiais e tecnologia do concreto, realizada durante a graduação em Engenharia Civil. Por interesse na área e após diversas pesquisas a respeito do estado atual das estradas no país, dada tamanha importância que estas representam para os setores de produção, economia e segurança, foi pensado em se estudar uma das novas tecnologias de concreto reforçado para pavimentos rígidos, em crescimento atualmente. No caso, optou-se por avaliar o comportamento do Concreto Reforçado com Fibras de Aço (CRFA), adicionando-se na mistura, a areia de brita, no intuito de se conhecer e avaliar as características físicas e estruturais desta composição.

Além da importância de estudos na área tecnológica para o concreto, tem-se a grande preocupação ambiental deste estudo, utilizando-se a areia de brita, possibilitando a preservação de um recurso natural, a areia dos rios, permitindo-se obter, assim, um concreto mais sustentável. Assunto de grande importância que precisa ter atenção e ser estudado em todas áreas.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em analisar o desempenho estrutural do concreto para pavimentação quando reforçado com fibras de aço e substituindo gradativamente a areia por areia de brita como agregado miúdo em sua mistura a partir de ensaios laboratoriais para se obter as resistências a compressão axial e diametral (ou tração indireta) dos corpos de prova moldados.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Compreender, a partir de referencial bibliográfico, as características inerentes à elaboração e execução do pavimento rígido, bem como os benefícios gerados pelo uso da fibra de aço e substituição da areia natural pela areia de brita nesse tipo de concreto;
- Definir a dosagem do concreto de referência para comparação com as dosagens contendo adições de fibras de aço e areia de brita;
- Avaliar o comportamento estrutural das diferentes dosagens estabelecidas a partir da resistência à compressão e à tração do concreto para pavimentos;
- Analisar os resultados obtidos para cada adição na dosagem referência do concreto;

1.5 Estrutura do Trabalho

O trabalho de pesquisa se encontra organizado em cinco partes. A primeira contextualiza a situação e o estudo que se realizará neste trabalho, apresentando os objetivos do trabalho. Na segunda parte encontra-se o levantamento bibliográfico acerca de cada tema a ser analisado. Na terceira, tem-se os métodos para desenvolvimento do trabalho. Na quarta parte apresenta-se os resultados obtidos de trabalhabilidade e resistências mecânicas das misturas de concreto estudadas, bem como análise e discussão dos mesmos. Na quinta parte concentra-se as considerações finais e sugestões futuras de trabalho. Por fim, são listadas as referências utilizadas para o desenvolvimento do presente trabalho de pesquisa.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentado todo o fundamento teórico construído a partir do levantamento bibliográfico, como conceitos de pavimentação rígida, concretos utilizando fibras de aço, areia de brita como agregado miúdo e ensaios de desempenho.

2.1 Pavimentos de Concreto

Conforme já apresentado, o Brasil passou por uma fase em que o pavimento de concreto de cimento Portland se acentuou em sua utilização e implementação. Porém, com o avanço das indústrias petrolíferas, o pavimento flexível, que se utiliza de derivados de petróleo, tornou-se mais chamativo devido ao seu custo reduzido de execução. No entanto, nos últimos anos, devido a um relativo aumento no custo do asfalto e crescentes concessões de estradas que consideram o custo total do pavimento ao longo de sua vida útil, tem-se manifestado uma mudança de tendência um interesse maior no pavimento de concreto (MESQUITA, 2001).

Segundo Filho e Rocha (2018), o investimento da implantação do pavimento flexível é de 42% mais barato do que o do pavimento rígido, porém, contabilizando o investimento total final da implantação, somado às manutenções no decorrer dos anos de vida útil, o pavimento flexível se torna mais oneroso e o pavimento rígido mais competitivo no mercado, pois o menor custo de manutenção para mantê-lo em condições satisfatórias, em comparação ao pavimento flexível, cobre o gasto de construção inicial. Portanto, o pavimento de concreto se mostra mais eficaz economicamente, com melhor custo-benefício.

Esta durabilidade está associada diretamente à resistência e ao tipo de distribuição de cargas que este tipo de pavimento apresenta: diferentemente dos pavimentos flexíveis, o pavimento rígido possui uma placa de concreto de cimento Portland que funciona como superfície de rolagem, ao mesmo tempo que atua como uma camada estrutural, como se pode ver na Figura 1. Ela possui uma considerável rigidez à flexão, distribuindo uniformemente as tensões aplicadas, apresentando um melhor desempenho sobre as bases mais frágeis, ao contrário do pavimento flexível que transfere às camadas inferiores maior tensão e responsabilidade estrutural (MESQUITA, 2001).

Segundo DNIT (2006), o pavimento rígido é constituído por material de elevada rigidez, como o concreto de cimento Portland. Devido à esta característica de rigidez, os esforços oriundos do tráfego são distribuídos em uma maior área. Uma vez que tensão é expressa a partir

da relação entre força e área, o aumento da área atenua as solicitações nas camadas inferiores, dispensando a necessidade de uma base, como no pavimento flexível.

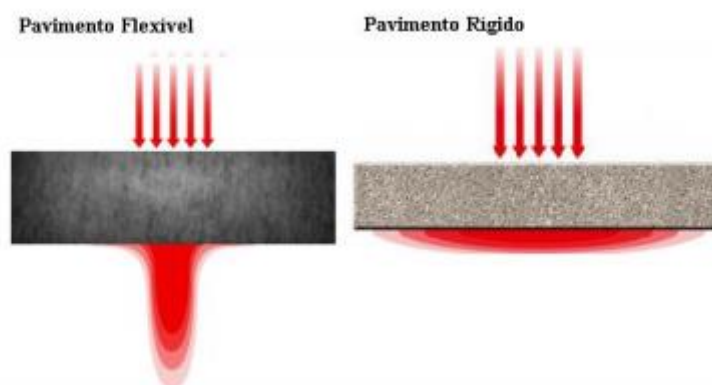


Figura 1 - Distribuição dos esforços do pavimento flexível e rígido. (Fonte Adaptada: ABCP, 2010).

No pavimento rígido, o revestimento de concreto trabalha principalmente à tração. Portanto, seu dimensionamento se desenvolve em função das propriedades e resistência à tração das placas de concreto de cimento Portland, apoiadas na camada de transição: partir da resistência adquirida à tração do concreto e considerações em relação à fadiga, coeficientes de reação do subleito, e também, devido às cargas aplicadas, é feita a determinação de sua espessura. A seguir a representação do perfil longitudinal de um pavimento rígido:

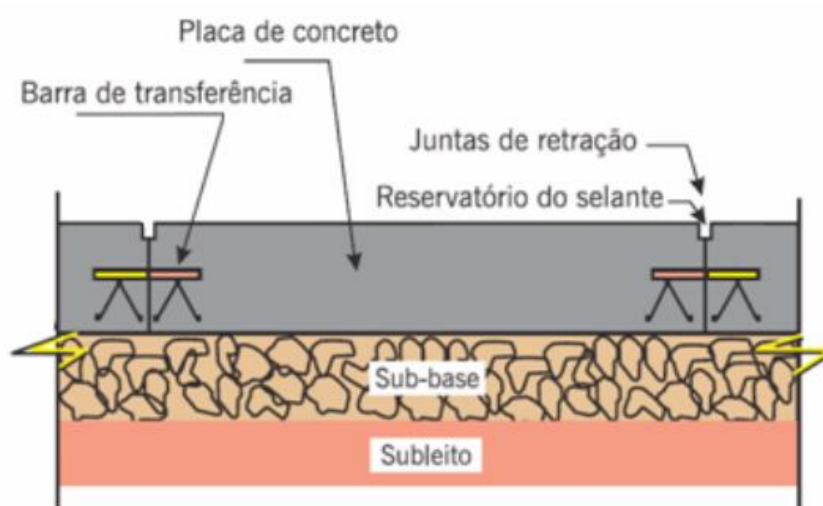


Figura 2 -Perfil longitudinal do pavimento rígido (Fonte: Bianchi et Al., 2008).

Como apresentado na imagem, a camada de concreto apresenta barras de transferência entre as placas de concreto, para transferência das cargas entre as placas. A junta de retração é

utilizada para controle de fissuras, onde é depositado um selante para evitar que sujeira e água entrem em contato com a armadura de transferência. As camadas abaixo do revestimento rígido são: a sub-base, constituída, geralmente, de solo-cimento; e o subleito, solo de fundação ao qual será apoiada a estrada. Pode se observar que, devido a distribuição mais uniforme das cargas, exige-se uma menor capacidade de suporte do subleito, sendo este pavimento uma boa alternativa para solos mais frágeis (MESQUITA, 2001).

No que diz respeito à vida útil, a formação de buracos e deformações plásticas, como marcas de trilhos de rodas, são impedidas nos pavimentos de concreto devido também à sua impermeabilidade, possibilitando maior durabilidade (EDSON, 2017 apud FREITAS, 2018).

O pavimento flexível apresenta uma vida útil de no máximo 20 anos, necessitando de uma manutenção constante e mais onerosa, enquanto que a vida útil do pavimento rígido é de 25 a 30 anos, exigindo manutenção apenas no décimo quinto ano horizonte de projeto, sendo assim, uma solução eficiente para zonas críticas como corredores de ônibus, estacionamentos, e rodovias de tráfego pesado (RIBEIRO et. al., 2000). Essa maior durabilidade, e, por conseguinte, menor necessidade de intervenções de manutenção podem diluir o custo inicial de implantação do pavimento rígido. Esta afirmação se aplica, principalmente, em vias de tráfego intenso e pesado.

Neste contexto, a ABCP avaliou o custo total no decorrer da vida útil dos dois tipos de pavimentos, o que resultou no gráfico apresentado na Figura 3, conforme a seguir:

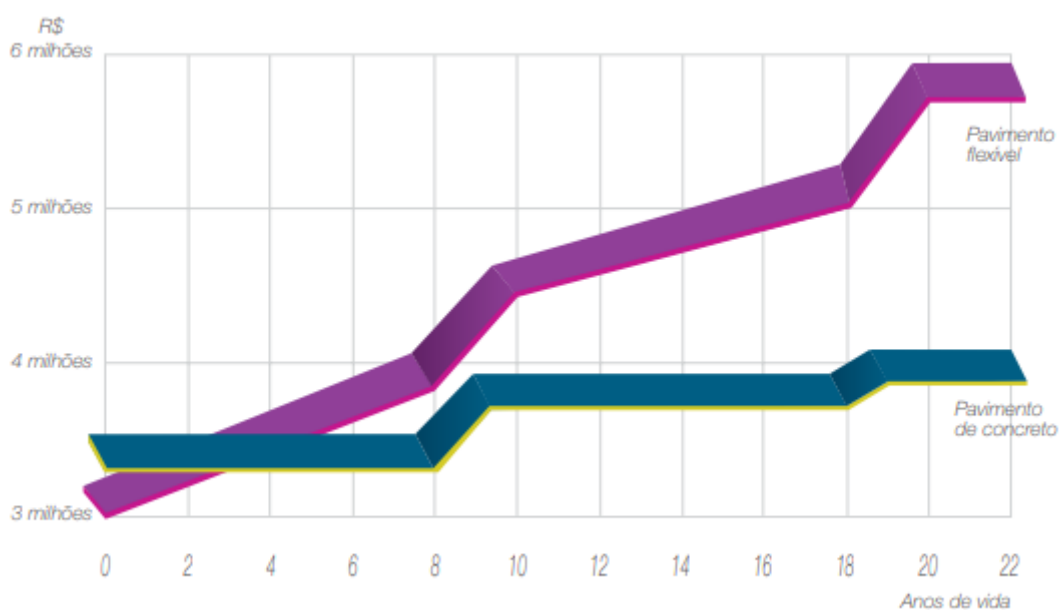


Figura 3 – Custo x anos de vida do pavimento flexível e pavimento rígido (Fonte: ABCP, [200?]).

Estudos realizados pela Votorantim em parceria com a Fundação Espaço ECO, mostraram que a solução de pavimento em concreto é 13% mais eco eficiente. Segundo Mesquita (2001), o pavimento flexível libera no meio ambiente partículas sólidas de material asfáltico que se desagregam por desgaste normal, podendo contaminar as margens da rodovia com elementos como o chumbo e enxofre, que são elementos químicos nocivos à natureza e pouco degradáveis.

O pavimento rígido ainda promove uma economia de 1% a 6% no consumo de combustíveis em comparação ao pavimento flexível (TAYLOR et. Al., 2006). Um exemplo mostrado, ela mesma pesquisa da Fundação Espaço ECO, foi a Via Régis Bittencourt, do trajeto São Paulo – Curitiba, que, se fosse uma via pavimentada em concreto, geraria uma economia de 16 milhões de litros de combustível por ano, (considerando-se uma economia média de combustível de 3%) equivalente a 360 mil carros populares com o tanque cheio, levando-se em conta o tráfego médio da rodovia de 25 mil veículos por dia.

Outras conclusões apresentadas por estes estudos foram com relação a estabilidade e segurança com a redução de 14% a 40% de distância de frenagem do veículo. Já com relação à economia de energia providas da iluminação pública, a reflexão da luz gerada no concreto, por ele ser de coloração mais clara, acarreta em uma menor necessidade de iluminação pública para a visualização da estrada (PACE & BECKER, 1997). Essa melhor visibilidade aumenta a segurança. Ele ainda gera uma maior aderência entre pneu e pavimento, possibilitando uma redução na distância de frenagem, bem como uma melhor estabilidade do veículo nas curvas (SANTANA, 2008).

Os pavimentos de concreto de cimento Portland podem ser de diversos tipos, como de: concreto simples, concreto simples com barras de transferência, concreto com armadura distribuída descontínua sem função estrutural, concreto estruturalmente armado e concreto protendido e ainda reforçado com fibras. A partir desses tipos de pavimentos e mediante importância de correta execução de seu concreto, são desenvolvidos estudos e técnicas para a melhoria de desempenho do mesmo. A dosagem do concreto, ensaios e caracterização dos materiais é realizada conforme a norma da DNIT 054/2004 – PRO: “Pavimento Rígido – Estudos de traços de concreto e ensaios de caracterização de materiais”, sendo utilizados agregados miúdos e graúdos, como no concreto convencional, porém, estudos de tecnologia do concreto vem apresentando novas formas de se melhorar o seu comportamento mecânico e aproveitamento dos materiais empregados. Uma grande frente de estudos traz como alternativa a incorporação de fibras de reforço no concreto, como por exemplo, as fibras de aço.

2.2 Concreto para pavimentação

A Norma DNIT 054/2004, define estudos de caracterização dos materiais e requisitos do concreto a ser empregado nestes tipos de pavimentação. Segundo a norma, o estudo de dosagem do concreto deve ser realizado de forma a se obter as resistências características de tração e de compressão. Além disso, a trabalhabilidade do concreto deve ser definida conforme o ensaio de abatimento de tronco de cone da NBR NM 67 (1998), para concretos com abatimento maiores que 20mm, como é o caso para este presente estudo. Outro requisito apresentado é o consumo de cimento em um mínimo de 320 kg/m³ e relação água/cimento entre 0,40 e 0,55.

A trabalhabilidade é uma característica muito importante para o concreto de pavimentação, que representa a plasticidade do concreto em estado fresco, que é relacionado ao percentual de argamassa de sua composição, deixando-o mais fluido. Porém, o aumento de água para satisfazer a trabalhabilidade gera uma redução de resistência. Assim, faz-se necessária, em alguns casos, a utilização de aditivos plastificantes, superplastificantes, ou incorporadores de ar, que aumentam a trabalhabilidade do concreto sem reduzir sua resistência, permitindo um concreto que possa ser devidamente lançado e adensado.

Outra característica importante, que merece atenção, para o concreto do pavimento é a baixa retração do mesmo. A retração é um fenômeno que ocorre em estado fresco do concreto, onde a água, em meio ao processo de cura, é perdida devido a hidratação do cimento e pela secagem superficial do concreto através da evaporação, causando uma redução do volume e o aparecimento de fissuras (MOSCATELLI, 2011). Fenômeno que tornaria o concreto permeável, através das fissuras, sujeitando-o a ações degradantes da água em sua estrutura.

A exsudação e segregação também devem ser bem controlados na execução do pavimento. A exsudação é a ocorrência de água de amassamento na superfície do concreto recém lançado, causando uma segregação, devido a densidade da água ser menor do que a densidade do cimento e dos agregados, fazendo com que o fator água/cimento da superfície se diferencie do restante da massa de concreto, sendo muito maior e gerando uma redução da resistência na superfície. Por conta disso, o material pode sofrer um desgaste maior e prematuro. Portanto, deve-se ter um cuidado no controle de materiais utilizados e nos procedimentos de execução do concreto para pavimentação, pois o mesmo deve ser produzido para resistir a esses esforços abrasivos superficiais ao qual são expostos durante toda a sua vida útil.

Para o concreto já endurecido, características mecânicas devem ser observadas e garantidas. Conforme o Manual de Pavimentos Rígidos do DNIT (2005), o concreto para pavimentação deve apresentar resistências mecânicas a compressão e tração mínimas. A

resistência à tração na flexão deve ser na ordem de 4,5 Mpa e para concretos estruturalmente armados, o concreto deve apresentar um mínimo de resistência à compressão axial de 30 Mpa. A resistência à tração é um fator muito importante a ser controlada no concreto, pois nos pavimentos rígidos destinados à grande volume de tráfego, são gerados esforços de tração na parte inferior do pavimento que, devido à sua constante aplicação e a fragilidade do concreto para cargas de tração, podem provocar uma deterioração da área inferior da pavimentação (FIGUEIREDO, 2005).

Outro fenômeno ao qual o pavimento é submetido é a fadiga, devido ao carregamento cíclico ao qual ele recebe. As fissuras ocorrem de natureza frágil, devido ao concreto apresentar pouca ou até nenhuma deformação plástica associada à fissuração. A ruptura ocorre em função dessa propagação das microfissuras, cuja fratura apresenta direção perpendicular em relação à direção de aplicação de tensões ao qual a superfície de concreto está sujeita (CALLISTER,2002). A formação das microfissuras é uma característica relacionada ao concreto pela baixa ou falta de aderência entre os agregados e a pasta, ou pela presença de vazios de ar e regiões fracas onde se concentração as tensões.

Em pavimentos de concretos simples, a tensão de tração na flexão é o principal esforço pelo qual a estrutura está submetida e a resistência a fadiga na flexão é dada pela razão entre a tensão máxima e o número de ciclos aplicados (SILVA & CARNEIRO, 2014). O fluxo de veículos ao qual o pavimento recebe, está diretamente ligado ao comportamento de fadiga, a intensidade do carregamento em ciclos pode aumentar o aparecimento de fissuras e ocasionar a sua ruptura, que se desenvolve na região mais rígida da estrutura do pavimento (CERVO, 2004).

Ainda segundo CERVO (2004), a diferença de temperatura entre a parte superior e inferior das placas de concreto do pavimento rígido, geram um aumento da tensão causando um empenamento do pavimento. Outro fator influenciador do comportamento sob fadiga é a relação água/cimento, que, segundo Klaiber e Lee (1982), relações água/cimento inferiores a 0,40, para concretos simples, geram redução da resistência à fadiga do concreto.

2.3 Concreto Reforçado com Fibras de Aço (CRFA)

O concreto simples, sem adições, possui características frágeis, apresentando muitas limitações com relação a esforços externos e condições de ambiente, como a resistência à tração e retração hidráulica, por exemplo. Ainda as fissuras geradas por esses efeitos se expandem nas

regiões entre os agregados e a matriz do concreto. A utilização de fibras de aço em proporções apropriadas reduz esse tipo comportamento, gerando um reforço no concreto.

As fibras de aço, devido ao seu alto módulo de elasticidade, garantem ao concreto uma redução da propagação de fissuras, absorvendo e transmitindo as tensões de um para outro no interior da matriz, impedindo o aumento das fissuras e o rompimento abrupto da estrutura, como ocorre com o concreto sem reforço, propriedade capaz de substituir total ou parcialmente as barras e telas de aço em certas estruturas de concreto (FIGUEIREDO, 2005).

As imagens a seguir apresentam as distribuições das tensões no concreto, que quando encontram uma barreira, como as fissuras, as contornam para permitir sua propagação e, assim, ocorre uma concentração na extremidade da fissura, ocasionando o crescimento acelerado das mesmas e consequente ruptura da estrutura, conforme mostrado por Barros (2009, p.48 apud DO NASCIMENTO, 2015, p.46).

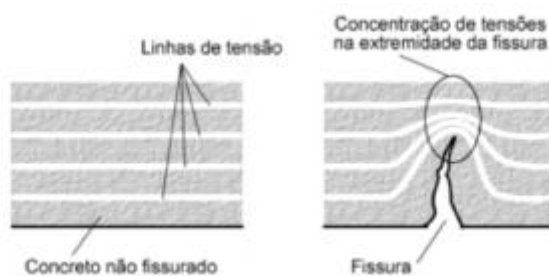


Figura 4 - Propagação de fissuras em concreto simples (Fonte: Barros, 2009, apud Do Nascimento, 2015).

Para concretos reforçados com fibras de aço, a concentração de tensão é diferente, pois elas atuam como pontes de ligação e transferência de esforços, ocasionando em uma resistência maior, impedindo a rápida ruptura da estrutura, em um comportamento mais dúctil, conforme apresentado na imagem a seguir:

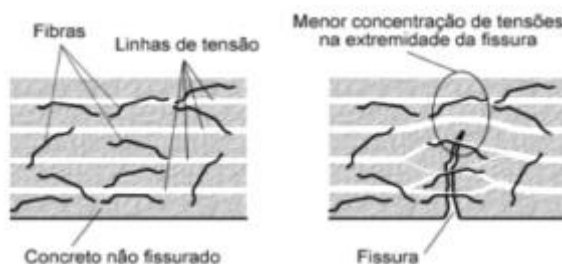


Figura 5 - Propagação de fissuras em concreto reforçado com fibras (Fonte: Barros, 2009, apud Do Nascimento, 2015).

Ainda, segundo Watanabe (2008, p.134):

Se as fibras forem suficientemente resistentes, bem aderidas à matriz cimentícia, e em bastante quantidade, elas ajudarão a manter pequena a abertura das fissuras. Permitirão ao CRF

resistir a tensões de tração bem elevadas, com uma grande capacidade de deformação no estágio pós-fissuração (o chamado “strain softening”).

Portanto, mesmo após a fissuração da matriz, o concreto reforçado com fibras de aço tem a capacidade de ainda absorver e suportar tensões, mantendo, assim a integridade estrutural e maior coesão (ALMEIDA, 1999). Isso é possível devido ao aumento da tenacidade, provocada pela presença das fibras, que é a propriedade relacionada à capacidade de absorção da energia de deformação necessária para ocasionar a ruptura do material.

Com relação a resistência mecânica de compressão, alguns autores afirmam a não interferência das fibras de aço neste fator, Bentur e Mindess (2007) afirmam que, a adição das fibras pode não alterar a resistência à compressão e que, muitas vezes, o decréscimo pode até ocorrer devido a necessidade de aumento de água para se manter a fluidez e trabalhabilidade do concreto ao reforça-lo com fibras de aço. No entanto, alguns autores apresentam, em seus trabalhos, resultados positivos com relação à compressão desse material. Williamson (1974, apud ACI 544.4R-88), apresentou um concreto com 2% de teor de fibra de aço de fator de forma de 100, e agregado de dimensão máxima de 19mm, com aumento de 23% em sua resistência à compressão.

Segundo Lopes (2005), a utilização de fibras longas e distribuídas na mesma direção da propagação de tensão da tração, gera um aumento muito significativo na resistência à tração direta das matrizes, em que, comparando-se com o concreto de fibras de aço distribuídas aleatoriamente, estas apresentam um menor incremento de resistência à tração.

Conforme Medeiros (2012):

A ruptura por tração do concreto com fibras ocorre por alongamento elástico ou plástico das fibras de aço, e por degradação da matriz de concreto na zona de transição fibra-matriz, por arrancamento ou por ruptura da fibra de aço.

A resistência à tração e a geometria da fibra estão diretamente ligados a ductilidade do compósito, em que, no momento do arrancamento das fibras de aço da matriz do concreto, há um incremento da tenacidade do material, conforme estudado por Sarzalejo et. al. (2007 apud COLPO, 2011). A resistência a esse arrancamento das fibras pode ainda ser aumentada pela aderência mecânica gerada pela ancoragem obtida através da utilização de fibras de aço com ganchos ou seções geométricas variáveis (LOPES, 2005).

Outro importante aspecto a ser analisado no concreto reforçado com fibras de aço é a interação entre os agregados e a fibra incorporada na matriz. Segundo Maidl (1991, apud FIGUEIREDO, 2000), para que as fibras alcancem um maior número de fissuras que venham a ocorrer no concreto, deve-se ter uma compatibilidade dimensional entre essas fibras e agregados. Essa interação é importante pois a fissura se propaga pela interface entre o agregado graúdo e a argamassa do concreto que apresente uma resistência mecânica baixa e moderada, sendo assim, como a fibra funciona como uma ponte de transferência de tensões, ela deve ter um comprimento maior que duas vezes a dimensão máxima do agregado graúdo, de modo que as fibras ocupem as regiões de fissuração, contendo-as e reduzindo a velocidade de sua expansão (FIGUEIREDO, 2000). Ainda segundo Figueiredo (2000) temos abaixo a representação de duas situações: a compatibilidade (Figura 6) e a não compatibilidade (Figura 7) entre os agregados e as fibras de aço.

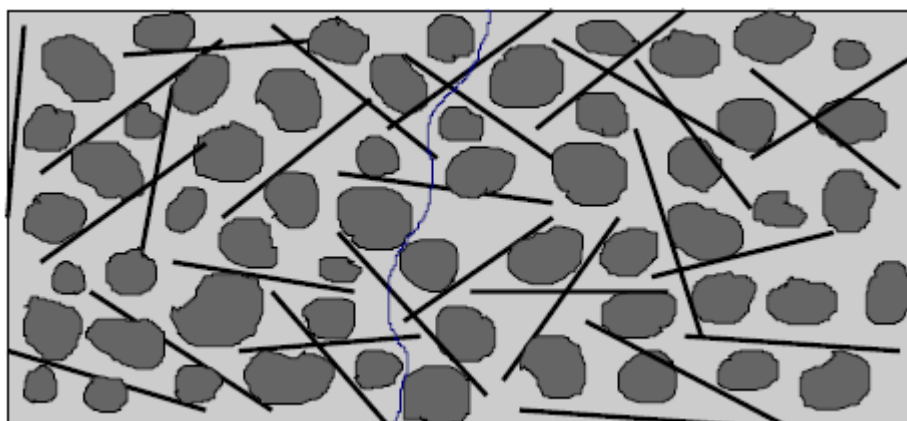


Figura 6 - Representação da compatibilidade entre agregados e as fibras de aço e propagação de fissuras nesta situação. (Fonte: Figueiredo, 2000)

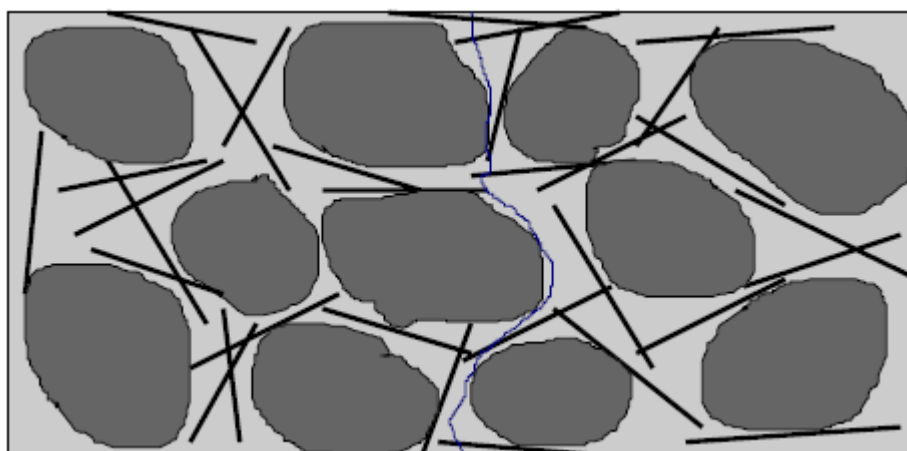


Figura 7 - Representação da incompatibilidade entre agregados e fibras de aço e a propagação da fissura nesta situação. (Fonte: Figueiredo, 2000)

A capacidade do comportamento de pontes de transferência de tensão está diretamente ligada ao teor de fibras que se encontra na matriz.

Para Holanda et. al. (2001), quanto maior o teor de fibras no concreto, maior será o aumento de tenacidade, conferindo uma melhor distribuição das tensões aplicadas e assim menos fissuras ocorrerão no pavimento, podendo-se também, disponibilizar um maior espaçamento entre as juntas de dilatação.

O teor responsável por manter a mesma característica portante do concreto, mesmo após a sua ruptura pode ser denominado como o volume crítico de fibras. Quando a matriz contém um volume de fibras acima deste volume crítico, mesmo após a sua ruptura, ela consegue receber acréscimos de carregamento, porém, para volumes de fibra abaixo do volume crítico, no momento da ruptura da matriz já ocorre a redução de sua capacidade portante (FIGUEIREDO, 2011). A Figura 8, apresentada a seguir, mostra esse comportamento relacionado ao teor de fibras:

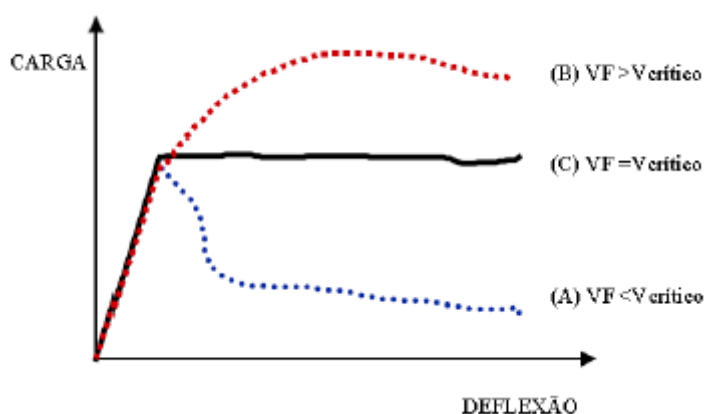


Figura 8 – Comportamento do concreto relacionado ao volume de fibras (Fonte: Figueiredo, 2011).

Conforme mostrado por Figueiredo (2011), o trecho inicial pode-se observar um comportamento elástico linear que corresponde ao estágio pré-fissurado da matriz, e logo após, é visto um patamar de escoamento, como em materiais dúcteis, por onde é possível verificar a diferença entre os comportamentos para volumes abaixo, igual e acima do volume crítico.

Para Mehta e Monteiro (2008) há três classificações para volumes de fibras de aço em porcentagens referentes ao volume total resultante:

- Baixa fração volumétrica, menor que 1%;
- Fração volumétrica moderada, e entre 1% e 2%;
- Alta fração volumétrica, com volumes acima de 2%:

A baixa fração volumétrica é indicada para se reduzir as fissuras por retração no concreto, usuais para lajes e pavimentos, por possuírem grandes superfícies expostas. A fração moderada para concretos projetados e estruturas que sejam capazes de absorver energia e fadiga, pois devido a sua porcentagem, apresentam aumento no seu módulo de ruptura, tenacidade à fratura e resistência ao impacto. Já a alta fração volumétrica de fibras de aço é utilizada em compósitos de alto desempenho.

Figueiredo (2011), relaciona a deflexão do concreto com a carga a ser aplicada para os diferentes teores de fibras de aço adicionados à matriz conforme ilustrado na Figura 9.

Pode-se observar que em dada deformação, igual para todos os teores de fibras de aço, quanto maior for o teor de fibras, maior será a capacidade portante do concreto, pois maior é a necessidade de aplicação de carga para se prover uma mesma deformação (SHIMOSAKA, 2017).

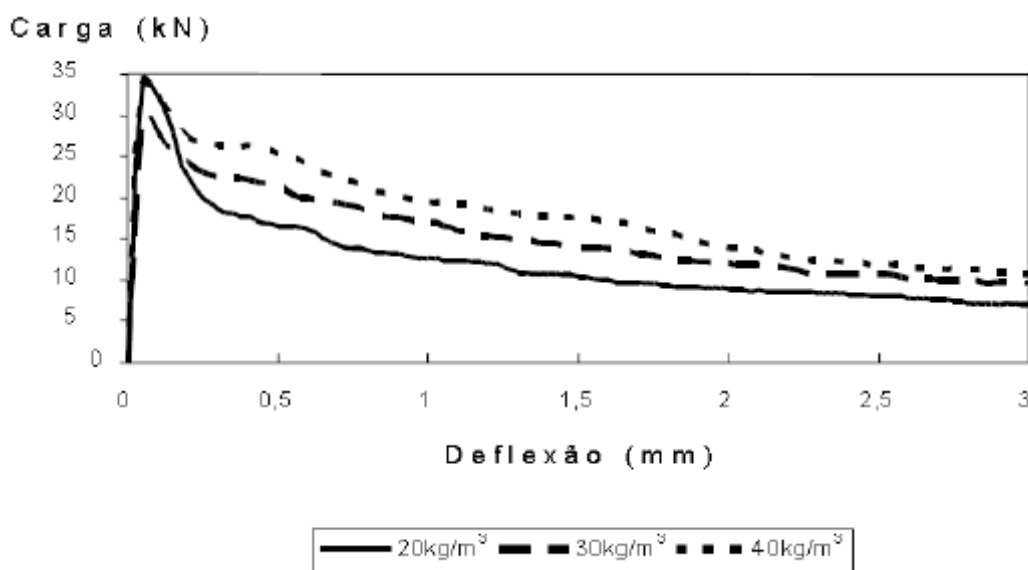


Figura 9- Curva de cargas x deflexão para concretos de $f_{ck} = 20\text{MPa}$ e diferentes teores de fibras de aço (Fonte: Figueiredo, 2011).

Uma das limitações encontradas no concreto reforçado com fibras de aço, é a redução ocasionada em sua fluidez, ou seja, em sua trabalhabilidade. Segundo Figueiredo (2000), a redução da trabalhabilidade ocorre devido à área superficial de molhagem aumentar, demandando um consumo maior de água.

Ainda, segundo ele:

Se forem adicionados 50kg de fibras de aço com ancoragem em gancho, 30mm de comprimento e seção circular com diâmetro de 0,5mm em um metro cúbico de concreto teremos uma nova área de molhagem de, aproximadamente, 50m². Dessa forma, ter-se-á uma menor quantidade de água disponível para fluidificar a mistura. Por isso, fica claro que, quanto menor for o diâmetro da fibra, maior será a influência da mesma na perda de fluidez da mistura. De maneira similar, fibras mais longas atuam na consistência do concreto.

Tem-se, portanto, que o fator de forma, que é a relação entre o comprimento e o diâmetro, é um fator importante para a análise da trabalhabilidade, em que quanto maior for o fator de forma, mais a trabalhabilidade será afetada (Figueiredo, 2000). Seguindo ainda essa mesma ideia de área superficial de molhagem, Edgington et al. (1974), mostrou que a quantidade e o tamanho do agregado, com diâmetro acima de 5mm também afetam a trabalhabilidade da mistura. Além desses parâmetros mostrados, Lopes (2005) apresenta mais alguns que influenciam diretamente na trabalhabilidade do concreto: o fator água cimento, o volume de fibras utilizado, o uso de aditivos superplastificantes e o tipo de misturador utilizado na execução do concreto reforçado com fibras de aço.

Outra situação problemática é o surgimento de fibras de aço na superfície dos pavimentos de concreto reforçado, que não tem a capacidade de perfurar pneus dos veículos, mas acabam oxidando-se e gerando pontos de ferrugem, além de gerar um desconforto visual, sendo necessário a tomada de providências para melhorar essa ocorrência, como a especificação de altos abatimentos de cone (FIGUEIREDO, 2000). Um aumento elevado e exagerado do abatimento de cone pode também ocasionar a segregação da fibra (CECCATO, 1998) que por possuir uma massa específica maior que a do concreto, elas se afastam da superfície reduzindo o reforço nessa região.

O concreto reforçado com fibras de aço, segundo Figueiredo (2000), também pode apresentar aglomerações das fibras de aço, formando ouriços que ocasionam pontos fracos no concreto, por não permitir a entrada total da massa de concreto entre os vazios, como mostrado na Figura 10. Uma forma de se reduzir este problema é a melhor distribuição da fibra no concreto, durante o seu lançamento, para uma mistura homogeneizada.



Figura 10 - Ourião de fibras de aço formado na mistura do concreto (Fonte: Figueiredo, 2000).

2.4 Pavimento de concreto com fibras de aço

As propriedades do concreto para utilização em pavimentos vêm sendo aprimoradas de forma a combater o comportamento frágil do concreto simples, aumentando sua ductilidade e sua resistência à tração. Para isso, as fibras de aço adicionadas ao concreto tem sido uma opção promissora (COLPO, 2011).

A execução de pavimento industriais de concreto utilizando fibras de aço no Brasil, segundo os fabricantes, atingiu dois milhões de metros quadrados, apesar de que ainda faltam muitas informações e orientações sobre sua tecnologia e execução para que essa tecnologia seja popularizada (FIGUEIREDO, 2000).

Figueiredo (2000), ainda assim, pontua várias vantagens para a utilização de pavimento de concreto reforçado com fibras de aço, quando comparadas ao uso de telas de aço soldadas:

- Não existe a etapa de colocação das telas metálicas, o que reduz o tempo total de execução da obra e o número de operários necessários para a execução dessa etapa.
- Há também uma economia de espaço na obra, uma vez que não é necessário estocar a armadura.
- As fibras não requerem o uso de espaçadores como as telas metálicas e, no caso de se utilizar um concreto com consistência adequada e sem excesso de vibração, garantem o reforço de toda a espessura de concreto do pavimento. Isto nem sempre ocorre com o uso de telas metálicas, que podem ser deslocadas com a passagem de

carrinhos de mão deixando a parte superior da placa sem reforço.

- As fibras também permitem o corte das juntas de dilatação sem a necessidade de barras de transferência pré-instaladas. Além disso, as fibras reforçam as bordas das juntas minimizando o efeito de lascamento nessas regiões.
- Existe uma maior facilidade de acesso ao local da concretagem, podendo-se, em alguns casos, atingir o local de lançamento do concreto com o próprio caminhão betoneira, o que é quase sempre impossível quando da utilização de telas metálicas que impedem o livre trânsito de pessoas e equipamentos após a sua instalação.
- Não representam restrição quanto à mecanização da execução do pavimento.

2.5 Concreto com Areia de Brita

A utilização da areia de brita no concreto vem sendo estudada de forma a tornar o concreto ambientalmente mais sustentável. O seu desempenho tem se apresentado adequado na produção do concreto, e em muitos dos casos, eficiente como alternativa e substituta da areia natural, obtendo resultados de resistências iguais ou superiores para traços de proporções semelhantes (ANDRÉ, 2017).

Uma vantagem do uso da areia de brita na produção do concreto, segundo Coin (2009), está na possibilidade de se ajustar a sua composição granulométrica, adaptando-a para os seus diferentes usos, podendo-se ainda, realizar a escolha da rocha a ser utilizada em sua produção. Segundo o autor, cada rocha apresenta propriedades importantes que influenciam significativamente na extração e britagem em fatores como: consumo de energia, produção de finos, formato e textura das partículas, e ainda a qualidade do concreto fresco e endurecido.

A forma dos grãos de areia de brita obtidos tem grande influência na trabalhabilidade do concreto, e conseqüentemente, em sua resistência. Um grão de formato lamelar, apresentará uma menor trabalhabilidade diferentemente de um grão cúbico ou arredondado, pois eles geram maior interação entre os elementos proporcionando uma menor relação de vazios no concreto (MENOSSE, 2004).

Ainda, segundo estudos e ensaios laboratoriais realizados por Bonavetti et Al., (1994, apud MENOSSI, 2004), devido ao aumento da área superficial que deve ser umedecida pela água do traço do concreto, a demanda de água cresce proporcionalmente ao aumento da porcentagem de pó de brita que é incrementada na produção do concreto, ocasionando em uma redução da trabalhabilidade do concreto (MENOSSI, 2004).

Esta maior demanda de água no concreto pelas partículas mais lamelares comparadas às esféricas pode ser representada graficamente como na Figura 11.

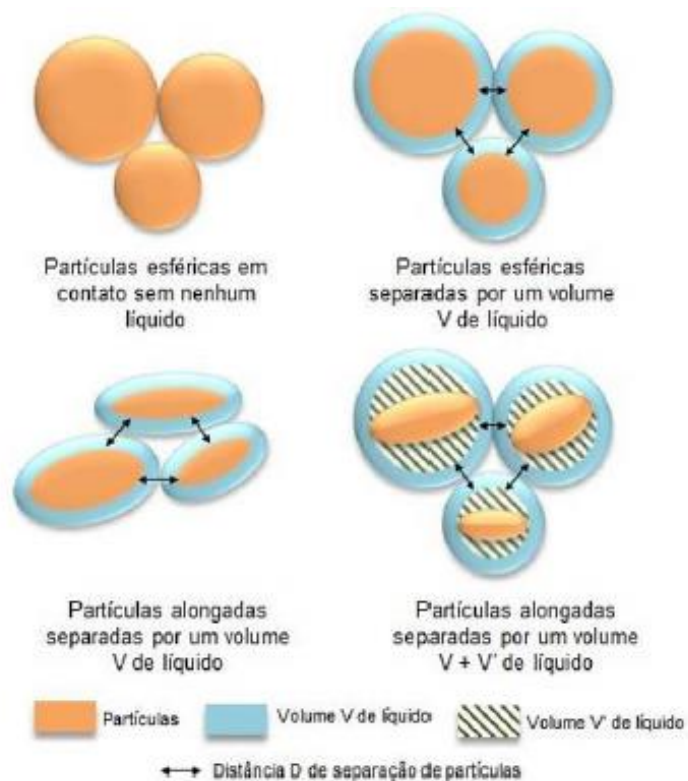


Figura 11 - Demanda de água em partículas mais alongadas comparadas às esféricas para obtenção de mesma viscosidade (Fonte: Hawlitschek, 2014 apud, André, 2017).

2.6 Materiais da Composição do Concreto

O concreto convencional é composto pelos seguintes materiais: cimento Portland, agregado miúdo, agregado graúdo, e água. Porém, adições podem complementar o concreto, como aditivos, fibras, e outras composições que adquirem ao concreto um maior reforço.

2.6.1 Cimento Portland

Segundo a ABCP (2002, p.5), Joseph Aspdin, um construtor inglês, foi o responsável por criar o cimento Portland. O material recebeu esse nome por conta de sua coloração se assemelhar com a coloração das pedras de Portland (pedras usadas em construções na Inglaterra), uma ilha situada no sul da Inglaterra. Além da coloração, a invenção se assemelhava também na dureza da pedra, e, assim, Aspdin registrou e patenteou o cimento Portland, em 1824.

Então, em 1926, no Brasil, foi inaugurada a Companhia Brasileira de Cimento Portland, em uma cidade a 23 quilômetros de São Paulo, Perus. A partir de então, iniciou-se um processo de consolidação e crescimento da indústria brasileira do cimento (SNIC, 2003).

Conforme o Manual de pavimentos rígidos do DNIT (2005), o cimento Portland é composto de clínquer, com adições misturadas no momento de moagem do clínquer, sendo um dos fatores que diferenciam os vários tipos de cimento. Essas adições, que devem ser finamente moídas, são: escória de alto forno, materiais pozolânicos e materiais carbonáticos.

O Manual afirma, ainda, que, para a execução de pavimentos de concreto não há exigências quanto ao tipo de cimento e características físicas e químicas que ele deve conter, porém, os cimentos que apresentam maior eficiência, quanto ao aumento de resistência e baixo consumo, são os que apresentam um processo de endurecimento mais lento, os quais tem mostrado melhores resultados para esse tipo de obra (nos casos em que não há necessidade de abertura rápida para o tráfego). Dependendo da escolha mais conveniente, quando possível, do tipo e marca do cimento, a obra poderá receber maior economia, além de maior qualidade e durabilidade, devido à redução da probabilidade de fissuração do concreto.

Conforme a norma NBR 16697:2018 “Cimento Portland - Requisitos”, o cimento deve atender a algumas exigências como químicas, físicas e mecânicas, que garantem o desempenho mecânico e reológico do concreto, conforme apresentado na Figura 12 e Figura 13, respectivamente.

Tipo de cimento portland	Resíduo insolúvel (%)	Perda ao fogo (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	CO ₂ (%)	S (%)
CP I	≤ 1,0	≤ 2,0	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 1,0	-
CP I-S	≤ 5,0	≤ 4,5			≤ 3,0	-
CP II-E	≤ 2,5	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 5,0	-
CP II-Z	≤ 16,0					-
CP II-F	≤ 2,5					-
CP III	≤ 1,5	≤ 4,5	-	≤ 4,0	≤ 3,0	≤ 1,0 ⁽¹⁾
CP IV ^{(2) (3)}	⁽⁴⁾	≤ 4,5	≤ 6,5	≤ 4,0	≤ 3,0	-
CP V-ARI	≤ 1,0	≤ 4,5	≤ 6,5	≤ 3,5 ≤ 4,5 ⁽⁵⁾	≤ 3,0	-

Figura 12 - Exigências químicas para cada tipo de cimento (Fonte: Boletim Técnico, ABCP).

Tipo de cimento portland	Classe	Finura		Tempos de pega		Expansibilidade		Resistência à compressão				
		Resíduo na peneira 75 mm (%)	Área específica (m ² /kg)	Início (h)	Fim (h)	A frio (mm)	A quente (mm)	1 dia (MPa)	3 dias (MPa)	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)	91 dias (MPa)
CP I	25	≤ 12,0	≥ 240	≥ 1	≤ 10 ⁽¹⁾	≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5	-	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	-
	32		≥ 260						≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	
	40		≥ 280						≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0	
CP II-E	25	≤ 12,0	≥ 240	≥ 1	≤ 10 ⁽¹⁾	≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5	-	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	-
	32		≥ 260						≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	
	40		≥ 280						≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0	
CP III ⁽²⁾	25	≤ 8,0	-	≥ 1	≤ 12 ⁽¹⁾	≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5	-	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 32,0 ⁽¹⁾
	32		≥ 10,0						≥ 20,0	≥ 32,0	≥ 40,0 ⁽¹⁾	
	40		≥ 12,0						≥ 23,0	≥ 40,0	≥ 48,0 ⁽¹⁾	
CP IV ⁽²⁾	25	≤ 8,0	-	≥ 1	≤ 12 ⁽¹⁾	≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5	-	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 32,0 ⁽¹⁾
	32								≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	≥ 40,0 ⁽¹⁾
CP V-ARI		≤ 6,0	≥ 300	≥ 1	≤ 10 ⁽¹⁾	≤ 5 ⁽¹⁾	≤ 5	≥ 14,0	≥ 24,0	≥ 34,0	-	-

Figura 13 - Exigências físicas e mecânicas para cada tipo de cimento Portland (Fonte: Boletim Técnico, ABCP).

2.6.2 Fibras de Aço

Em 2007, a ABNT publicou a primeira norma sobre fibras de aço, contando com especificações, parâmetros de classificações e tipologias de diferentes tipos de fibras. Esta norma foi de grande valia para ordenação do mercado, possibilitando sua maior recepção e aceitação em busca de melhorias para o concreto reforçado com fibras de aço.

A referida norma intitula-se como NBR 15530:07 “Fibras de aço para concreto – Especificação”. Esta norma apresenta três tipos de fibras conforme a sua geometria, conforme listado a seguir e ilustrado na Figura 14:

- Tipo A: Fibra de aço com ancoragem em suas extremidades;
- Tipo B: Fibra de aço corrugada;
- Tipo C: Fibra de aço reta.

A partir da tipologia, é apresentado a classificação da fibra que depende do material utilizado para sua produção, podendo ser trefilado ou laminado:

- Classe I: Fibra originada de arame trefilado a frio;
- Classe II: Fibra originada de chapa laminada cortada a frio;
- Classe II: Fibra originada de arame trefilado e escarificado.

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

Figura 14 – Classificação e geometria das fibras de aço para reforço do concreto (Fonte: NBR 15330:2007).

A definição da resistência mínima da fibra é relacionada diretamente com a classificação e tipologia encontrados, pois ela procede da geometria e do tipo de aço pela qual a fibra se originou. A norma apresenta o mínimo de resistência à tração para o aço da fibra, sendo de 500MPa, e prevê os diferentes limites das mesmas, relacionadas a cada tipo e classe de fibras.

Fibra	Limite de resistência a tração do aço MPa (*)fu
A I	1000
A II	500
C I	800
C II	500
C III	800
R I	1000
R II	500

(*)Esta determinação deve ser feita no aço, no diâmetro equivalente final imediatamente antes do corte.

Figura 15 - Resistência limite conforme a classificação da fibra de aço (Fonte: NBR 15330:2007).

Outra característica importante a ser observada em fibras de aço é o fator de forma, que é definida como a relação geométrica entre o comprimento da fibra de aço, não alongado, e o diâmetro da fibra. Este fator de forma é definido no intuito de manter uma mesma característica nas fibras de aço utilizadas no concreto reforçado. Além de que esse aspecto mostra a quantidade de fibras presentes na matriz do concreto, em que quanto maior for o fator de forma da fibra empregada, mais fibras de aço estarão intervindo no reforço do concreto (COLPO, 2011). O fator de forma também pode ser caracterizado como a esbelteza da fibra, em que quanto maior for o seu comprimento ou menor o seu diâmetro, maior será a esbelteza da fibra, fazendo com que a capacidade resistente após a fissuração do concreto aumente (MEDEIROS, 2012).

Como apresentado, as fibras podem apresentar formas diferentes de sua geometria, apresentando ganchos e/ou ondulações em seu comprimento. Estas características permitem incrementar a aderência das fibras ao concreto, aumentando sua resistência ao arrancamento.

As fibras de aço são as fibras de maior utilização em elementos estruturais de concretos reforçados com fibras, pois apresentam um alto módulo de elasticidade, o que garante melhoria na tenacidade, controle de fissuras, resistência à fadiga, ao impacto e à tração na flexão, conforme a ACI 544.1R-96 (2006, apud MEDEIROS, 2012).

2.6.3 Agregados Miúdos

A norma NBR 7211:2009 “Agregados para Concreto – Especificações”, define agregado miúdo como o agregado que passa pela peneira de abertura de malha 4,75mm. Com relação ao material pulverulento, algo muito importante para areias de brita ou pó de pedra, a norma estabelece que o material passante por essa peneira, de malha menor que 0,075mm, não pode ultrapassar 3% nas utilizações em concreto que será submetido a um desgaste superficial, e para concretos protegidos deste desgaste, o limite é de 5%. Já para os casos de partículas geradas pela britagem de rochas (areia de brita), esses limites aumentam para 10% em concretos expostos a desgaste e 12% em concretos protegidos de desgaste superficial, quando se for possível a comprovação, diante da apreciação petrográfica que partículas acima de 150 µm não gerem finos, como materiais micáceos, ferruginosos e argilominerais expansivos, que possam alterar as propriedades do concreto.

2.6.3.1 Areia Natural

O agregado miúdo natural, ou areia, é caracterizado por ser um material sem volume e forma definidos, muitas vezes inerte. Quase sempre, ele é vendido da forma como é extraído, apenas passando por uma separação das porções mais grossas e resíduos, pelas grelhas, o material também passa por uma lavagem para que se possa retirar a argila presente (ABDI, 2012).

As areias são divididas em finas, médias, grossas e muito grossas a partir do módulo de finura encontrado. O módulo de finura é obtido pela soma de porcentagens de material retido acumulado nas peneiras de série normal, dividida por 100 (VIEIRA, 2014).

Conforme o seu módulo de finura, as areias podem ser classificadas em (PETRUCCI, 1998):

- Muito grossas: $MF > 3,90$;
- Grossas: $3,30 < MF < 3,90$;
- Médias: $2,40 < MF < 3,30$;
- Finas: $MF < 2,40$.

Este agregado se encontra na natureza na forma de sedimentos não coesos, quando em leitos de rios, planícies e terraços aluviais e dunas litorâneas ou sedimentos consolidados em

formato de quartzitos e arenitos, que passam por litificação. Os métodos mais comuns de extração da areia natural são: dragagem, desmonte hidráulico e desmonte mecânico (MME, 2009).

O consumo anual de areia natural na construção civil no Brasil chega a 320 milhões de m³. Com este volume seria possível construir 7100 estádios como o Maracanã. Quase que toda essa quantidade de material é retirada das baixadas e leitos dos rios, atividades que agridem as suas calhas naturais levando a um aumento de vazão da água, propiciando a erosão de suas margens. Ainda, há a retirada da cobertura vegetal das áreas deixando o solo estéril (Reportagem, 2003).

As areias são razoavelmente abundantes no país, porém, em certas regiões, como as metropolitanas de Rio de Janeiro e São Paulo, a demanda é superior à oferta deste recurso, sendo necessário o transporte do material vindo de regiões distantes (MME, 2009). Sendo assim, como a extração é realizada em grandes volumes, o preço do produto se torna baixo, mas o seu transporte chega a 2/3 do preço final do material (ANDRÉ, 2017).

No entanto, em diversas regiões próximas a centros urbanos, a extração de areia natural tem se tornado limitada devido a leis de proteção ambiental mais rigorosas, como por exemplo o Rio Grande do Sul, que, além de proibir a extração do recurso natural de vários rios, foram feitas restrições na profundidade permitida para lavrar a areia e na largura, ou distância mínima em relação as margens dos rios (MME, 2009).

2.6.3.2 Areia de Brita

A areia de brita é uma areia manufaturada, criada a partir dos restos de britagem ou executadas intencionalmente a partir da escolha da rocha. Em países mais desenvolvidos, a utilização da areia de brita como alternativa para agregado miúdo, em substituição da areia natural, se iniciou nos anos setenta, uma década após a produção dos primeiros equipamentos usados na britagem do material fino, viabilizando a ideia de produção de areia de brita, ou pó de pedra para comercialização (ALMEIDA e SAMPAIO, 2002). Portanto, o uso da areia de brita tem sido uma alternativa muito significativa para substituição da areia natural como agregado miúdo, que se encontra cada vez mais escassa e gerando impactos ambientais.

No processo de fabricação do agregado graúdo, até 30% da massa do material que passa pelo britador é inviabilizada no seu uso como agregado graúdo, devido à redução dessa massa a partículas de dimensões inferiores à 4mm (CEPURITIS, 2014).

Essa fração resultante da britagem foi tratada por muito tempo como resíduo, por ser um material de pouco interesse comercial, afetando a rentabilidade do agregado graúdo e gerando danos ambientais por conta do armazenamento do material não utilizado (ANDRÉ, 2017).

Ainda, segundo o autor,

O correto beneficiamento deste resíduo permite aos produtores de agregado a conversão de um material de baixo valor de mercado em um produto de qualidade, capaz de substituir parcialmente ou na totalidade o uso do agregado miúdo natural para fabricação de concreto, argamassa e asfalto, garantindo propriedades adequadas de trabalhabilidade, resistência, consumo de água e cimento. O produto final deste beneficiamento deve possuir qualidade e granulometria apropriadas, consistindo em um material produzido com os devidos fins e não apenas o reuso de rejeitos de mina.

Países desenvolvidos já se utilizam da areia de brita como agregado miúdo, no Japão, por exemplo, esta é uma realidade devido ao esgotamento de suas reservas naturais. Na Nova Zelândia, a substituição ocorreu devido a resultados melhores e mais eficientes com o agregado manufaturado, através do uso de britadores de impacto vertical, obtendo-se concretos de maiores resistência à compressão e densidade, pela maior proporção encontrada de material pulverulento (COIN, 2009).

Menossi (2004), afirma que, com a utilização do pó de pedra em grande escala, ou areia de brita, pode-se ter as seguintes vantagens, não só para as pedreiras e concreteiras, mas também ao próprio consumidor:

- Total aproveitamento das pedreiras, sem descarte de efluentes;
- Menor consumo de cimento no concreto;
- Agregado miúdo com características físicas e químicas constantes;
- Solução de impactos e problemas ambientais;
- Custo final do concreto reduzido.

Ainda conforme Menossi (2004), o formato apresentado pelos grãos impacta diretamente na trabalhabilidade e resistência à compressão do concreto. Com relação à trabalhabilidade, um concreto composto de agregado muito lamelar vai apresentar menor trabalhabilidade, diferentemente de um agregado mais cúbico ou “arredondado” que possuem

maior interação entre seus grãos e conseqüentemente o concreto terá menor porcentagem de vazios. As pilhas formadas pelos agregados demonstram esse fenômeno, a pilha formada pela areia natural apresenta um ângulo de repouso da ordem de 37° enquanto as pilhas de britas e de areia de britagem (pó de pedra) alcançam mais do que 45°.

Resultados de ensaios experimentais mostraram que, conforme aumentada a proporção de areia de brita, maior é a necessidade de água devido ao aumento da superfície a ser umedecida, gerando uma redução na trabalhabilidade. Para adição de 20% de areia de brita, por exemplo, o acréscimo de água chegou a 17% (BONAVETTI et. Al., 1994).

A Figura 16 mostra o formato arredondado apresentado pelas partículas dos agregados de origem natural, que possuem essa forma pela contínua abrasão sofrida por agentes da natureza, enquanto os agregados manufaturados apresentam um formato de seus grãos mais angular, com vértices e arestas definidos, influenciado pelo tipo de britador e a razão de redução empregada em sua cominuição e pelo tipo de rocha de origem do agregado (NEVILLE, 2012).



Figura 16 - Comparação entre o formato de areia natural (primeira) e areia de brita (segunda) (Fonte: Coin, 2009 apud André, 2017).

Weidman (2008) afirmou que o formato das partículas dos agregados pode ocasionar em um aumento no desgaste dos equipamentos (tubulação e betoneiras) para produção e bombeamento do concreto. Os formatos mais arredondados das partículas facilitam e proporcionam um melhor acabamento superficial do concreto reduzindo a sua forma áspera.

Apesar disso, Bahabri (2016, apud ANDRÉ, 2017) afirma que um agregado de elevada proporção de partículas angulares e bem graduado tendem a gerar uma mistura mais empacotada, resistente e durável, em comparação com o agregado mais arredondado. Porém, as partículas mais alongadas apresentam resultados indesejados por se romper facilmente diante da ação de cargas.

As características de formato, textura e granulometria do agregado são governadas pela natureza desses agregados, ou seja, pelas características da rocha matriz pelo qual originou-se o agregado em questão. Isso exerce uma grande influência no comportamento do concreto em estado fresco e endurecido (ANDRÉ, 2017).

As principais rochas utilizadas para obtenção dos agregados, no Brasil, são: granitos, gnaisses, calcários, dolomitos, basaltos e diabásios (MME, 2009). A produção de agregados no Estado do Rio de Janeiro se desenvolve em regiões próximas a corpos granito-gnáissicos gnaisses do Complexo Rio Negro e gnaisses Facoidal. Essas rochas apresentam uma composição de quartzo-feldspato com grandes teores de muscovita e biotita. Segundo Parreira (2016, apud ANDRÉ, 2017) a muscovita é um mineral composto por silicato de potássio e alumínio hidratado com baixos teores de ferro, magnésio, cálcio, sódio, lítio, flúor e titânio, e biotita, é um silicato de potássio, magnésio-ferro-alumínio hidratado. A Figura 17 representa esses dois minerais.



Figura 17 - Componentes micáceos: Muscovita à esquerda e Biotita à direita (Fonte: André, 2017).

A biotita é um mineral que apresenta um aspecto lamelar de superfície lisa, que afetam a trabalhabilidade e a demanda de água na mistura do concreto (ANDRÉ, 2017). Wakizaka et. Al. (2005, apud ANDRÉ, 2017) observou ainda, que o elevado teor de biotita na argamassa gerou uma redução da resistência à compressão, devendo-se à característica anisotrópica do material em seu formato lamelar, além disso, a resistência à flexão também se reduziu devido à baixa interação entre a superfície lisa da biotita e a pasta de cimento hidratado. Ele desenvolveu uma relação entre o percentual de biotita e a resistência à compressão do concreto, conforme mostrado na Figura 18.

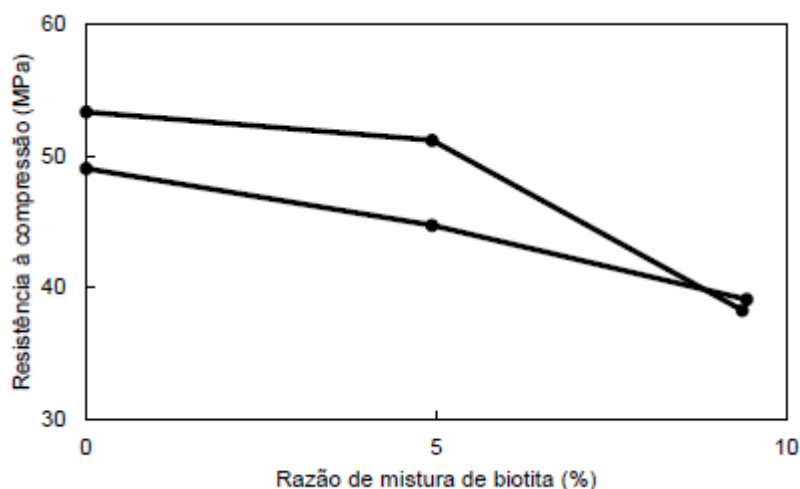


Figura 18 - Relação entre o teor de biotita e a resistência à compressão de argamassas (Fonte: Wakizaka et. Al., 2005 apud André, 2017).

2.6.4 Agregado Graúdo

Assim como para o agregado miúdo, o agregado graúdo também é classificado de acordo com a norma NBR 7211:2009. A norma o define como as partículas que passam pela peneira de abertura de malha de 75mm e ficam retidos na peneira de abertura de malha de 4,75mm, estabelecendo também, um valor máximo aceitável para o material pulverulento (<0,075mm) de 1% com relação à massa do agregado graúdo, ou 2% para agregados produzidos a partir de rochas que apresentam absorção de água inferior a 1%.

A origem do agregado graúdo pode ser tanto natural como do resultado da fragmentação de blocos extraídos de maciços rochosos provenientes de processos de britagem e peneiramento. As rochas mais utilizadas no processo de britagem, para obtenção da brita, são: gnaiss, granito, basalto, diabásio, calcário e dolomito. No Brasil, aproximadamente 85% da brita é oriunda de rochas graníticas e gnáissicas, 10% em calcário e dolomito e 5% em basalto e diabásio (MME, 2009).

Os agregados graúdos devem manter suas propriedades diante da ação do ar, água ou gelo, ou seja, originados de rochas estáveis. Agregados de rochas como as feldspáticas e xisto, não devem ser utilizados pois se decompõem sob ação da água ou ar (PETRUCCI, 1998).

Para Mendes (2002), as características mais importantes que devem ser analisadas são: mineralogia, composição granulométrica, forma, resistência mecânica, dimensão máxima, textura superficial, reatividade química e módulo de elasticidade.

A norma NBR 7211:2009 “Agregados para concreto - Especificações” define que as pedras britadas são separadas por peneiras e assim classificadas conforme a sua dimensão, encontrada quando é retido 95% da amostra nas peneiras de seu grupo. As pedras britadas são classificadas conforme sua passagem pela abertura de peneiras como mostrado pela norma NBR 7225:1993 “Materiais de pedra e agregados naturais”:

- Brita 0: Diâmetro entre 4,8 e 9,5mm;
- Brita 1: Diâmetro entre 9,5 e 19mm;
- Brita 2: Diâmetro entre 19 e 25mm;
- Brita 3: Diâmetro entre 25mm e 50mm;
- Brita 4: Diâmetro entre 50 e 76mm;
- Brita 5: Diâmetro entre 76 e 100mm;

Segundo o ACI (1993 apud CHODOUNSKY; VIECILI, 2007), os agregados graúdos com dimensão maior que 19mm não são recomendados para concretos reforçados com fibras.

2.6.5 Água de Amassamento

Conforme o Manual de pavimentos rígidos do DNIT (2005), a água utilizada no amassamento do concreto deve ser isenta de substâncias prejudiciais ao processo de pega e cura do concreto. Presume-se como satisfatórias as águas tratadas e utilizadas no abastecimento das cidades, e, quando a água que precisar ser utilizada não for tratada, como de rios, reservatórios ou poços, por exemplo, ensaios de caracterização tecnológica deverão ser feitos em amostras dessa água.

Impurezas presentes na água de amassamento podem impactar de forma negativa na resistência do concreto ou causar manchas em sua superfície e até ocasionar a corrosão da armadura, por isso a água de amassamento deve ser escolhida e utilizada corretamente e com atenção (NEVILLE, 1997).

Conforme a NBR 6118:1978 “Projeto de estruturas de concreto”, a água de amassamento deve apresentar certos limites, como a seguir:

- Valor de pH: $5,8 \leq \text{pH} \leq 8,0$;
- Resíduos sólidos $\leq 5000 \text{ mg/l}$;
- Cloretos (Cl) $\leq 500 \text{ mg/l}$;
- Matéria orgânica $\leq 3 \text{ mg/l}$;

- Sulfatos (SO_4^{2-}) ≤ 300 mg/l;
- Açúcar ≤ 5 mg/l

A relação água/cimento é a relação em peso de água e cimento contidos no concreto, em que, quanto menor for essa relação, menor será o teor de água no concreto fresco, menor a trabalhabilidade e maior será a resistência do concreto.

2.6.6 Aditivos Superplastificantes

Os aditivos, em geral, podem ser definidos como sendo um produto químico, de composição orgânica ou inorgânica, que, desconsiderando certas exceções, são utilizadas em quantidades máximas de até 5% em relação à massa do cimento, no intuito de obter alterações nas propriedades do concreto, sendo capazes de conferir vantagens físicas e econômicas ao concreto, permitindo a utilização do concreto em situações que antes existiam dificuldades e possibilitando uma maior variedade de componentes na mistura do concreto (NEVILLE, 2016).

O Manual de Pavimentos Rígidos do DNIT (2005), define os aditivos como sendo substâncias não totalmente indispensáveis na mistura do concreto, porém, quando nele colocado, antes ou durante a mistura, em pequenas quantidades, reforçam ou geram tanto no estado plástico como endurecido, certas características do concreto e efeitos diversos, como a seguir:

- Melhora da trabalhabilidade;
- Aceleração ou retardamento do tempo de pega;
- Redução da permeabilidade;
- Aceleração do desenvolvimento da resistência nas idades iniciais;
- Mais resistente aos agentes agressivos;
- Retardamento ou diminuição do calor de hidratação;
- Desenvolvimento de propriedades fungicidas, germicidas ou inseticidas.

Conforme Neville (2016) os aditivos são classificados conforme a sua função no concreto, tendo frequentemente ações adicionais junto a mistura, e a classificação segundo a ASTM C 494-10 é dada da seguinte forma:

- Tipo A: Redutor de água
- Tipo B: Retardador;

- Tipo C: Acelerador;
- Tipo D: Redutor de água e retardador;
- Tipo E: Redutor de água e acelerador;
- Tipo F: Redutor de água de elevado desempenho ou superplastificante;
- Tipo G: Redutor de água de elevado desempenho e retardador ou superplastificante e retardador;
- Tipo S: Desempenho específico.

Os aditivos superplastificantes são basicamente aditivos redutores de água. São compostos quimicamente por polímeros orgânicos solúveis em água, produzindo longas moléculas de elevada massa molecular a partir do processo de polimerização. Essas longas moléculas envolvem as partículas de cimento, atribuindo a elas uma carga altamente negativa ocasionando uma repulsão estérica entre elas. Esse fenômeno resulta em uma defloculação e dispersão das partículas de cimento aumentando a trabalhabilidade da mistura de concreto (NEVILLE, 2016).

Ainda segundo o autor, os superplastificantes podem também aumentar a resistência do concreto, mantendo-se uma trabalhabilidade normal, devido à redução significativa da relação água/cimento que os superplastificantes podem proporcionar à mistura. A Figura 19 mostra os dois possíveis resultados diante a utilização deste tipo de aditivo no concreto.

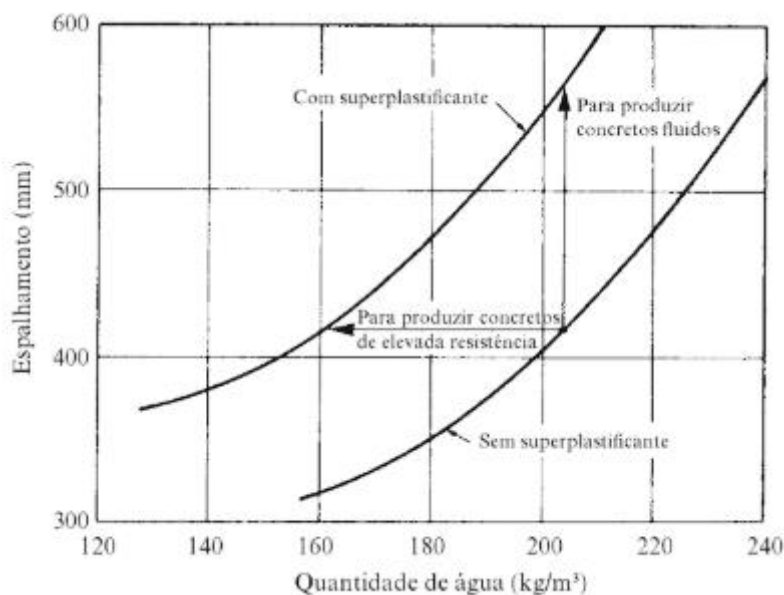


Figura 19 - Relação entre a quantidade de água no concreto e consistência obtida (Fonte: Neville, 2016).

O instante ótimo para a adição do aditivo superplastificante é considerado como o período de dormência sem o aditivo, proporcionando uma maior trabalhabilidade inicial e menor velocidade de perda de trabalhabilidade. Esse instante deve ser determinado por ensaios, dependendo também das propriedades do cimento. O impedimento para a reaglutinação das partículas do cimento dura apenas enquanto todas as moléculas de aditivo estiverem disponíveis para cobrir as de cimento. Porém, como parte das moléculas de superplastificante se aprisiona junto a massa hidratada de cimento ou reage com C_3A , o teor de aditivo se reduz, tornando insuficiente, fazendo com que a trabalhabilidade se reduza com o tempo. A Figura 20 apresenta uma representação da perda de trabalhabilidade de concreto com e sem aditivo, com um mesmo abatimento inicial, mostrando que a perda ocorre mais rapidamente no concreto com superplastificante (NEVILLE, 2016).

Devido a isso, Neville (2016) apresenta a solução de se adicionar o aditivo à mistura em dois ou três momentos, sendo viável se um caminhão-betoneira for utilizado para a entrega do concreto à obra. Os resultados obtidos dessa solução são apresentados na Figura 21, em que foi evidente o retorno da trabalhabilidade da mistura com o acréscimo de aditivo com o tempo.

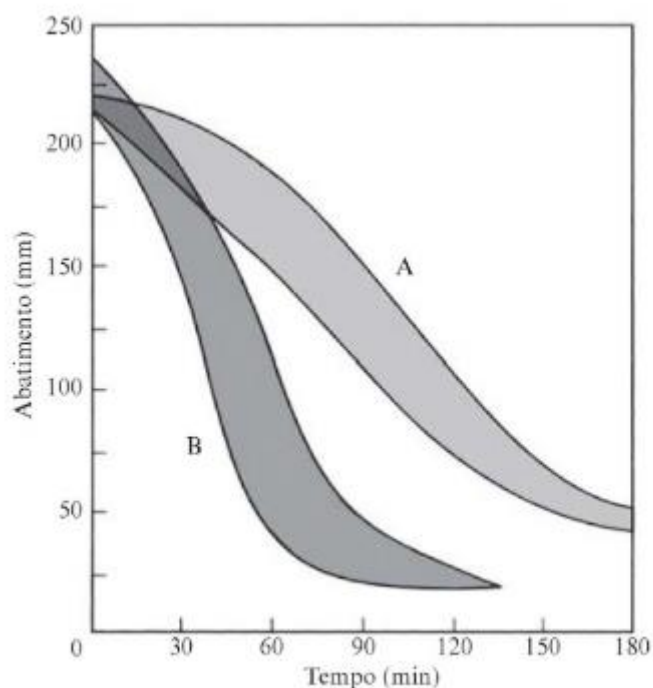


Figura 20 - Perda de abatimento no decorrer do tempo. Mistura (A): sem aditivo, relação a/c de 0,58; Mistura (B): com aditivo, relação a/c de 0,47 (Fonte: Neville, 2016).

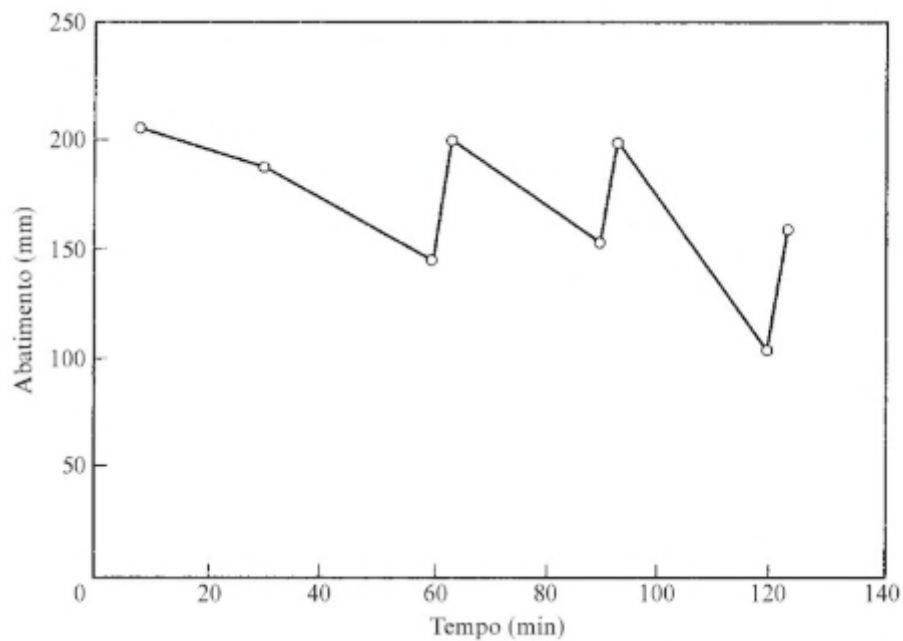


Figura 21 – Influência de repetidas dosagens de aditivo superplastificante à base de naftaleno na consistência do concreto (Fonte: Neville, 2016).

2.7 Dosagem do concreto – Método ABCP

Segundo Helene (2005), o estudo de dosagem do concreto de cimento Portland, ou traço do concreto, é importante para se encontrar a melhor proporção de cada material que constitui o concreto. Essa proporção expressa no traço, pode ser obtida em massa ou em volume, sendo a primeira mais preferível e mais rigorosa.

O método da ABCP foi publicado em 1984 pela Associação Brasileira de Cimento Portland como um Estudo Técnico titulado “Parâmetros de Dosagem do concreto”, pelo Eng. Públio Penna Firme Rodrigues (revisado em 1995). Este método é baseado e adaptado do texto da norma ACI 211.1-81, para agregados graúdos britados e areia de rio que se enquadrem na norma NBR 7211:1983, ou seja, um método com considerações, valores e resultados experimentais relacionados aos materiais mais utilizados em várias regiões do Brasil. (BOGGIO, 2000).

A dosagem do concreto definido pela ABCP é obtida por algumas etapas:

- Caracterização dos materiais;
- Definição da resistência de dosagem (f_{cj});
- Definição da relação água/cimento;
- Determinação do consumo de água;
- Determinação do consumo de cimento;

- Determinação do consumo de agregado graúdo;
- Determinação do consumo de agregado miúdo;
- Apresentação do traço.

1. Caracterização dos materiais

Esta etapa é a etapa na qual todos os materiais devem ser caracterizados para que a dosagem seja realizada especificamente para esses materiais.

- Cimento: é necessária sua definição com relação ao tipo que será utilizado, a massa específica e sua resistência aos 28 dias.

- Agregado Graúdo: a análise granulométrica deve ser feita conforme a norma “Agregados – Determinação da composição granulométrica” NBR 7217:1987, obtendo, com isso também, a dimensão máxima do agregado. A massa unitária compactada do agregado graúdo é obtida a partir da norma “Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios” NBR NM 45:2006, e a massa específica é determinada pela norma “Agregado Graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água” NBR NM 53:2003.

- Agregado Miúdo: assim como o agregado graúdo, a composição granulométrica deve ser feita também conforme a norma NBR 7217:1987, obtendo também o seu módulo de finura. A massa específica deve ser obtida a partir da norma “Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente” NBR NM 52:2003.

2. Definição da Resistência da dosagem

A resistência da dosagem é considerada conforme o projeto a ser seguido e majorada por uma equação que leva em consideração as condições de exposição e execução do concreto. A equação de obtenção dessa resistência, segundo a norma “Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento” NBR 12655:2015, está representada a seguir:

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65.Sd$$

Onde,

f_{cj} = Resistência média à compressão do concreto, prevista para a idade de j dias, em megapascals;

f_{ck} = Resistência característica do concreto à compressão, em megapascals;

S_d = Desvio-padrão da dosagem, em megapascals.

As condições de execução do concreto, bem como o desvio padrão para cada, estão representadas a seguir:

- a) Condição A: O cimento e os agregados são medidos em massa, já a água de amassamento pode ser medida em massa ou volume com dispositivo dosador e corrigida em função da umidade dos agregados. É aplicável para classes de concreto C10 até C80 e o desvio-padrão utilizado para esta condição é de 4 MPa.
- b) Condição B: O cimento é medido em massa, a água em volume, assim como os agregados. A umidade do agregado miúdo é corrigida pelo menos três vezes durante a mesma concretagem e o volume é corrigido através da curva de inchamento estabelecida especificamente para o material utilizado. É aplicável para classes de concreto C10 até C20 e o desvio-padrão utilizado para esta condição é de 5,5 MPa.
- c) Condição C: O cimento é medido em massa, os agregados são medidos em volume. A água de amassamento é também medida em volume e sua quantidade é corrigida em função da umidade dos agregados e da determinação da consistência do concreto. As classes de concreto aplicáveis para esta condição são somente os de classe C10 e C15 e o desvio-padrão utilizado para esta condição é de 7 MPa.

A classe do concreto é definida de acordo com a resistência característica do concreto e está representada conforme a Figura 12 a seguir:

Classe	C10	C15	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50	C55	C60	C70	C80
f_{ck} (Mpa)	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80

Figura 22 - Classes do concreto (Fonte: Banduk, 2005).

Após a escolha da condição de preparo do concreto, é encontrada a resistência esperada e prevista para o concreto (f_{cj}) em MPa.

3. Definição da relação água/cimento

A definição da relação água/cimento é dada por meio da curva de Abrams do cimento e em função da resistência característica obtida conforme o tópico anterior.

A curva de Abrams é construída a partir de informações a respeito do tipo de cimento e materiais a serem efetivamente utilizados, porém, quando isso não for possível, pode-se utilizar curvas já prontas, desenvolvidas no departamento de Cimento e Concreto (DECIM) da ABCP (BUCHER, 1989), por meio de traços experimentais de concretos, produzidos com cimentos de diferentes marcas, tipos e classes, e com agregado graúdo britado de origem granítica, e agregado miúdo como sendo areia de rio. A curva obtida, com a qual pode-se obter a relação água/cimento, está representada na Figura 23 a seguir:

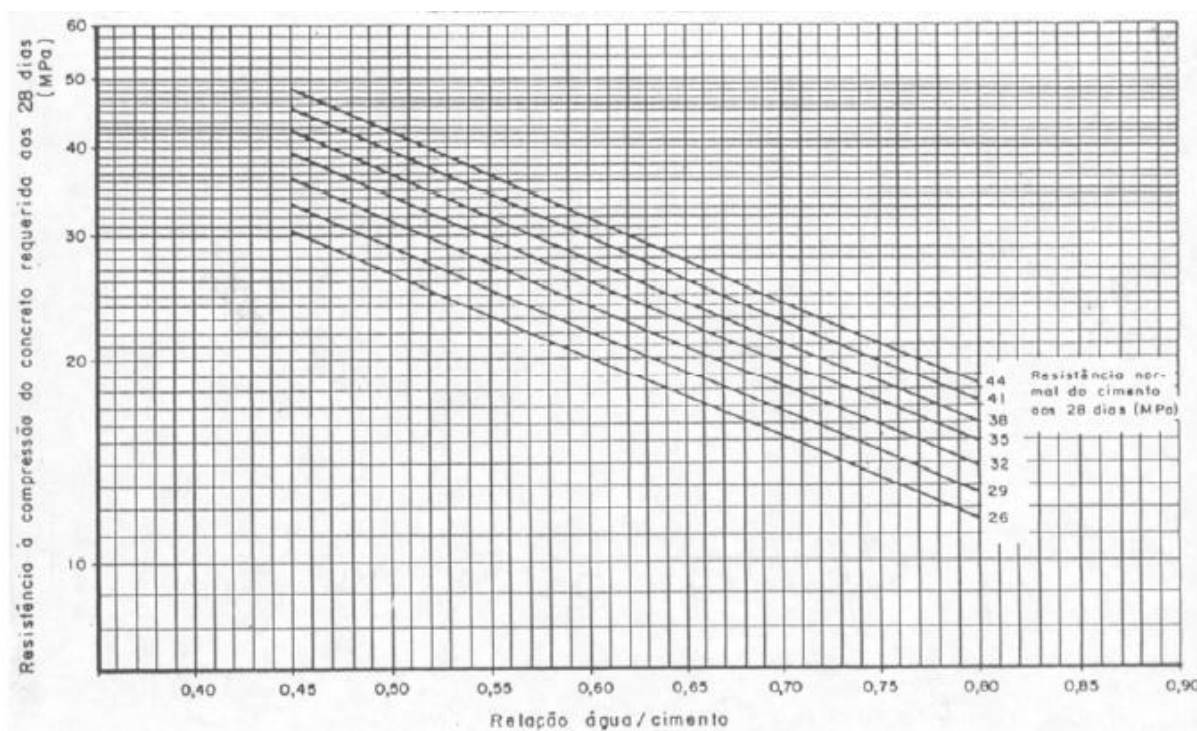


Figura 23 - curva de determinação da relação a/c em função das resistências do concreto e cimento aos 28 dias (Fonte: Bucher, 1989).

4. Determinação do consumo de água

Para a determinação do consumo de água, estimado por metro cúbico de cimento, ou seja, a quantidade de água necessária para um concreto de determinada consistência, é obtida em função principalmente das características dos agregados e consumo de cimento.

ABATIMENTO DO TRONCO DO CONE	DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA DO AGREGADO GRAÚDO (Φ_{max})				
	9,5mm	19mm	25mm	32mm	38mm
40 a 60mm	220 l/m ³	195 l/m ³	190 l/m ³	185 l/m ³	180 l/m ³
60 a 80mm	225 l/m ³	200 l/m ³	195 l/m ³	190 l/m ³	185 l/m ³
80 a 100mm	230 l/m ³	205 l/m ³	200 l/m ³	200 l/m ³	190 l/m ³

OBSERVAÇÕES:

- 1 – Os valores acima são recomendados para concretos confeccionados com agregado graúdo britado (basalto), agregado miúdo (areia de rio), consumo de cimento por metro cúbico de concreto da ordem de 300kg/m³ e abatimento, medido pelo tronco de cone, entre 4mm a 100mm;
- 2 – Quando usado seixo rolado como agregado graúdo, os valores do consumo de água podem ser reduzidos de 5% a 10%;
- 3 – As areias pertencentes à zona 1 de NBR 7211 (muito fina), podem gerar aumentos de até 10% no consumo de água por metro cúbico de concreto.

Figura 24 - Estimativa do consumo de água por volume de concreto (m³), em função do diâmetro máximo do agregado graúdo e do abatimento do concreto (Fonte: Rodrigues, 1998).

5. Determinação do consumo de cimento

O consumo de cimento depende diretamente do consumo de água, sendo assim, a partir da relação água/cimento, e consumo de água estimado, é possível calcular o consumo de cimento em metro cúbico:

$$C = \frac{Ca}{a/c}$$

Em que,

C = Consumo de cimento (kg/m³);

Ca = Consumo de água (l/m³);

A/c = Relação de água cimento.

6. Determinação do consumo de agregado graúdo

A determinação do consumo de agregado graúdo depende diretamente do volume compactado por metro cúbico de concreto e massa unitária compactada do agregado graúdo, obtida por meio de ensaio.

O volume compactado é obtido em função da dimensão máxima do mesmo, encontrado pela composição granulométrica do material, e pelo módulo de finura do agregado miúdo, obtido também da mesma forma, conforme a Figura 25.

MÓDULO DE FINURA DA AREIA	DIMENSÃO MÁXIMA CARACTERÍSTICA DO AGREGADO GRAÚDO (Φ_{max})				
	9,5mm	19mm	25mm	32mm	38mm
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

OBSERVAÇÃO:
1 – Os valores acima foram obtidos experimentalmente na Associação Brasileira de Cimento Portland.

Figura 25 - Volume compactado seco de agregado graúdo por metro cúbico de concreto (Fonte: Rodrigues, 1998).

A partir da obtenção do volume de agregado graúdo, pode-se encontrar o seu consumo:

$$Cb = Vb \times Mu$$

Onde,

Cb = Consumo de agregado graúdo (kg/m^3);

Vb = Volume compactado por m^3 de concreto;

Mu = Massa unitária compactada do agregado graúdo (kg/m^3).

7. Determinação do consumo de agregado miúdo

Por último, o consumo de agregado miúdo é obtido diretamente pelo seu volume, dentro do volume total da mistura e massa específica do agregado miúdo. Para encontrar o volume do agregado miúdo, faz-se a diferença entre a soma dos valores absolutos dos demais materiais já calculados e o volume de $1 m^3$ de concreto, como a seguir:

$$Vm = 1 - \left(\frac{C}{\rho c} + \frac{Cb}{\rho b} + \frac{Ca}{\rho a} \right)$$

Sendo,

Vm = Volume do agregado miúdo por m^3 de concreto;

ρc = Massa específica do cimento;

ρb = Massa específica do agregado graúdo;

ρ_a = Massa específica da água.

Com o volume do agregado miúdo, tem-se que:

$$C_m = \rho_m \times V_m$$

Em que,

C_m = Consumo do agregado miúdo (kg/m^3);

ρ_m = Massa específica do agregado miúdo (kg/m^3);

V_m = Volume do agregado miúdo por m^3 de concreto.

8. Apresentação do Traço

Obtendo-se todos os consumos estimados dos materiais, pode-se representar as proporções encontradas por meio do traço, indicando-se a relação quantitativa de cada material com relação ao cimento.

Portanto,

$$\text{Traço} = \frac{C}{C} : \frac{C_m}{C} : \frac{C_b}{C} : \frac{C_a}{C}$$

Após a determinação do traço teórico, realiza-se o traço experimental a fim de verificar os requerimentos de trabalhabilidade e desempenho exigidos para a mistura. O concreto deverá apresentar consistência de tal maneira que não exista segregação e sua exsudação não seja elevada, para que se tenha um bom acabamento (BOGGIO, 2000).

Ainda segundo o autor, este método da ABCP alerta para que se tenha o cuidado de utilizar, no laboratório, equipamentos similares aos equipamentos da obra para que se evitem importantes diferenças nas condições de trabalhabilidade obtidas nas duas situações. Também se recomenda que a água de amassamento, estimada conforme apresentado, não seja incluída totalmente de uma vez na mistura, mas sim de forma gradual para que se possa observar a consistência desejada por ensaios de abatimento.

2.8 Ensaio no Concreto em estado fresco

O ensaio do concreto em estado fresco é essencial para se obter a consistência do concreto para análise de sua trabalhabilidade.

A trabalhabilidade é definida como sendo uma propriedade do concreto fresco que identifica a possibilidade de utilização da mistura para determinadas finalidades sem perder a homogeneidade na transportação e disposição do concreto no local desejado (PETRUCCI, 1965).

Um concreto de difícil lançamento e adensamento terá tanto durabilidade, resistência e aparência inapropriadas, quanto um aumento no seu custo de manipulação. De igual modo, as misturas que apresentam maior dificuldade de acabamento, são as que apresentam elevada segregação e exsudação, gerando um concreto menos durável com um custo mais elevado. Sendo assim, a análise do concreto fresco quanto a sua trabalhabilidade é muito importante pois pode afetar tanto o custo quanto a qualidade do concreto (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Segundo o ACI 116R-90 (ACI, 1994b), a trabalhabilidade determina a homogeneidade do concreto e a capacidade de se misturar, lançar, compactar e finalizar o acabamento do concreto.

O ACI 544.3R (ACI, 1993) afirma que há três formas de se avaliar a trabalhabilidade e consistência do concreto convencional. O primeiro é pelo método tradicional pelo abatimento de cone, o segundo pelo cone invertido, onde o concreto é submetido a vibração e o terceiro método é o método VeBe para concretos mais secos.

2.9 Ensaio no Concreto em estado Endurecido

As propriedades e características do concreto endurecido dependem da relação água/cimento, reações de hidratação da pasta de cimento e água (nas condições de atividade química do cimento, fator água/cimento e cura do concreto) e da máxima compacidade que pode ser adquirida (em função dos equipamentos e procedimentos no adensamento) (VASCONCELLOS, 1977).

2.9.1 Ensaio de Resistência à compressão axial

O ensaio de resistência à compressão axial permite verificar a perda ou o ganho desta resistência nos corpos de prova cilíndricos das misturas, onde a ruptura do concreto é ocasionada pelo colapso interno das ligações, as vezes não ocorrendo ruptura externa, mas se

rompendo devido ao aumento de solicitações, gerando deformações internas em que o concreto não suporta (JACINTHO; GIONGO, 2005).

A resistência a compressão axial é tradicionalmente uma propriedade fundamental do concreto por ser considerada simples e segura de se determinar, possibilitando indicar, de forma geral, o estado e qualidade do material (NEVILLE, 1997). Esta propriedade é sensível para que, se houver variação em seus resultados, seja possível detectar modificações na uniformidade, natureza e proporção dos materiais que constituem a mistura (HELENE; TERZIAN, 1992).

Segundo Boggio (2000), o uso da resistência à compressão como um parâmetro representativo do estado e qualidade do concreto se deu pelo motivo de que os ensaios para obtenção desta propriedade, através das prensas de carga axial, são simples e rápidos, além de apresentarem um custo reduzido. Esses testes de compressão, no Brasil, são realizados conforme a norma brasileira NBR 5739 (ABNT, 1994a), sobre corpos de prova cilíndricos moldados e colocados em cura até a idade estabelecida anteriormente, em temperatura e umidade específicas, assim como em quase todo o mundo.

2.9.2 Ensaio de Resistência à tração por compressão diametral

Este ensaio é um ensaio brasileiro desenvolvido pelo Professor Lobo Carneiro, cuja determinação da resistência à tração no concreto-cimento é obtida indiretamente através da compressão diametral (CARNEIRO, 1943).

As duas forças de compressão concentradas e aplicadas diametralmente opostas geram tensões de tração, ao longo do diâmetro solicitado, uniformes e perpendiculares a este diâmetro. Este ensaio se tornou popular devido a facilidade e rapidez de execução, e também ao fato de se poder utilizar o mesmo corpo de prova cilíndrico e mesmo equipamento. (FALCÃO; SOARES, 2002).

O ensaio é realizado conforme a norma NBR 7222:2010 “Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos”, cuja determinação da resistência à tração é obtida a partir da seguinte relação:

$$f_{ct,sup} = \frac{2F}{\pi dl}$$

Em que,

$f_{ct} (sup)$: resistência à tração por compressão diametral, expressa por três algarismos significativos, em megapascals (MPa);

F : força máxima obtida no ensaio, em newtons (N);

d: diâmetro do corpo de provas, em milímetros (mm);

l: comprimento do corpo de prova, em milímetros (mm).

Há ainda correlações para obtenção de resistência à entre os diferentes ensaios, definido pela NBR 6118:2003 “Projeto de estruturas de concreto – Procedimento”.

As relações importantes em função da resistência à tração direta e à tração na flexão (ensaio realizado em corpos de prova prismáticos conforme a norma NBR 12142:2010), definidos conforme a seguir:

$$f_{ct} = 0,9 \times f_{ct,sup} \quad \text{E} \quad f_{ct} = 0,7 \times f_{ct,f}$$

Onde,

f_{ct}: resistência à tração direta no concreto, em megapascal (MPa);

f_{ct} (f) : resistência à tração na flexão do concreto, em megapascal (MPa);

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentado toda a metodologia e premissas consideradas para a execução da presente pesquisa.

3.1 Programa Experimental

Este trabalho visa analisar o desempenho estrutural do concreto para pavimentação quando reforçado com fibras de aço e substituindo gradativamente a areia natural por areia de brita como agregado miúdo em sua mistura. Segundo as normas que regem os ensaios, para cada traço, deve-se analisar o comportamento concreto tanto fresco quanto endurecido. Para isso, foram definidas as etapas que seriam seguidas para a execução do projeto, conforme descrito a seguir.

3.1.1 Etapa 1 – Caracterização e Especificação dos Materiais

Todos ensaios foram realizados no laboratório do curso de Engenharia Civil da UFRJ, Campus Macaé.

O trabalho teve início com a caracterização dos materiais a serem utilizados nos traços. Os ensaios de caracterização para obtenção dos dados necessários referente ao material foram realizados tanto nos agregados miúdos (areia natural e areia de brita) quanto no agregado graúdo. Já o cimento, fibras de aço e aditivo não foram ensaiados, obtendo-se os seus dados pelo fabricante, conforme apresentado adiante.

3.1.2 Agregados Miúdos

Como já apresentado, foram utilizados dois tipos de agregados miúdos nessa pesquisa: a areia natural e areia de brita, nos quais foram realizados ensaios e os resultados de suas caracterizações foram obtidos conforme apresentados a seguir.

1. Areia Natural

A areia utilizada foi obtida na cidade de Macaé, Rio de Janeiro. Para essa pesquisa realizou-se ensaios para a obtenção de sua composição granulométrica conforme os

procedimentos da norma NBR NM 7217:1987 “Agregados - Determinação da composição granulométrica”, obtendo também seu módulo de finura e diâmetro máximo. Para determinação da massa específica, conforme Figura 26, foram realizados os procedimentos de ensaio como detalhado na norma NBR NM 52:2003 “Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente”. O resumo das características obtidas por ensaios deste agregado é apresentado na Tabela 1.

Observa-se que a dimensão máxima das partículas da areia natural foi de 2,36 mm, sendo que grande parte da amostra possui dimensões menores que 1,18 mm (cerca de 85% da amostra).



Figura 26 - Ensaio de determinação de massa específica da areia natural.

Tabela 1 - Resumo de características da areia natural.

Características	VALORES ENCONTRADOS			Norma aplicada
	Abertura Peneiras (mm)	Retido Individual (g)	% Retida Acumulada	
	6,3	0	0	
	4,75	0,227	0,20%	

	VALORES ENCONTRADOS			
Composição	2,36	2,437	2,40%	NBR NM
Granulométrica	1,18	13,252	14,30%	248
	0,6	28,935	40,20%	
	0,3	42,974	78,70%	
	0,15	22,649	99,00%	
	Fundo	1,063	100%	
Dimensão Máxima (mm)	2,36			NBR NM
Módulo de Finura	2,35			248
Massa Específica (g/cm ³)	2,63			NBR NM 53

A composição granulométrica foi obtida por Silva (2019, em preparação).

2. Areia de Brita

A areia de brita utilizada foi disponibilizada pela empresa Jundiá Mineração do grupo São Marcos da cidade de Macaé, Rio de Janeiro.

O material provém dos resíduos do processo de britagem de pedreiras compostas por rochas do tipo granito-gnaiss oriundas da pedreira de extração local.

Os ensaios de caracterização realizados para a areia de brita foram os mesmos ensaios da areia natural, pela NBR 7217:1987 e NBR NM 52:2003, conforme Figura 27.



Figura 27 - Ensaio de determinação da massa específica da areia de brita.

A areia de brita apresentou todas as características mostradas na Tabela 2 abaixo. Observa-se que a dimensão máxima das partículas da areia de brita foi de 1,18 mm, sendo que grande parte da amostra possui dimensões menores que 0,6 mm (cerca de 85% da amostra). De imediato, observa-se que a areia de brita possui dimensões menores que a granulometria da areia natural. A análise da massa específica apontou que a massa específica da areia de brita é maior que a da areia natural.

Tabela 2- Resumo das características obtidas para a areia de brita.

	VALORES ENCONTRADOS			Norma aplicada
	Abertura Peneiras (mm)	Retido Individual (g)	% Retida Acumulada	
Composição Granulométrica	6,3	0	0,00%	NBR NM 248
	4,75	0	0,00%	
	2,36	0,667	0,60%	
	1,18	2,138	2,40%	
	0,6	15,562	16,00%	
	0,3	30,166	42,30%	

	0,15	29,855	68,30%	
	Fundo	36,389	100,00%	
Dimensão Máxima (mm)		1,18		NBR NM 248
Módulo de Finura		1,29		
Massa Específica (g/cm ³)		2,703		NBR NM 53

O ensaio de microscopia da areia de brita foi também obtida, no intuito de identificar a forma apresentada pelos grãos deste agregado, o qual foi possível observar que apresenta formato anguloso, conforme ilustrado na imagem a seguir.



Figura 28 - Microscopia da Areia de Brita.

Outras microscopias também foram realizadas no concreto já endurecido e curado, antes e após o seu rompimento, a fim de visualizar a interação apresentada entre os materiais integrantes de cada traço do concreto.

3.1.3 Agregado Graúdo

A brita utilizada como agregado graúdo foi a brita do tipo 0, obtida na cidade de Macaé, Rio de Janeiro. Foram ensaiadas amostras da brita para obtenção das características do

agregado. Ensaio de composição granulométrica foram realizados conforme NBR 7217:1987, e massa unitária compactada do agregado graúdo foi obtida pela NBR NM 45:2006, como demonstrado na Figura 29. A massa específica também foi determinada conforme NBR NM 53:2003.



Figura 29 - Ensaio de Massa unitária compactada do agregado graúdo.

Na Tabela 3 a seguir, encontram-se todas características da brita 0 obtidas pelos ensaios realizados. Observa-se que a dimensão máxima do agregado graúdo é de 9,52mm, abaixo de 19mm, conforme orientado pelo ACI (1993 apud CHODOUNSKY; VIECILI, 2007) para concretos reforçados com fibras de aço. Contendo uma amostra de aproximadamente 85% de seus grãos com dimensões entre 9,52mm e 2,36mm.

Tabela 3 - Resumo das características obtidas do agregado graúdo.

Características	VALORES ENCONTRADOS			Norma aplicada
	Abertura Peneiras (mm)	Retido Individual (g)	% Retida Acumulada	
	25,400	0,00	0,00%	NBR NM 248
	19,100	0,00	0,00%	
	9,520	8,75	5,80%	
	6,700	34,44	28,80%	
	4,750	34,15	51,58%	

	VALORES ENCONTRADOS			
Composição	3,350	33,46	73,89%	
Granulométrica	2,360	15,23	84,05%	
	2,000	4,14	86,81%	
	1,700	2,85	88,72%	
	1,180	4,11	91,46%	
	0,850	1,92	92,74%	
	0,600	1,94	94,03%	
	0,425	1,79	95,23%	
	0,300	1,62	96,31%	
	0,212	1,46	97,28%	
	0,150	1,28	98,14%	
	0,106	0,70	98,60%	
	0,075	1,48	99,59%	
	0,053	0,61	100,00%	
	<0,053	0,00	100,00%	
Dimensão Máxima (mm)	9,520			NBR NM 248
Módulo de Finura	5,21			NBR NM 248
Massa Específica (g/cm ³)	2,630			NBR NM 53
Massa Unitária (g/cm ³)	1,526			NBR NM 45

Após a obtenção dos dados de cada agregado, foi realizado um gráfico contendo a curva granulométrica da areia natural, da areia de brita e da brita 0, conforme mostrado no Gráfico 1.

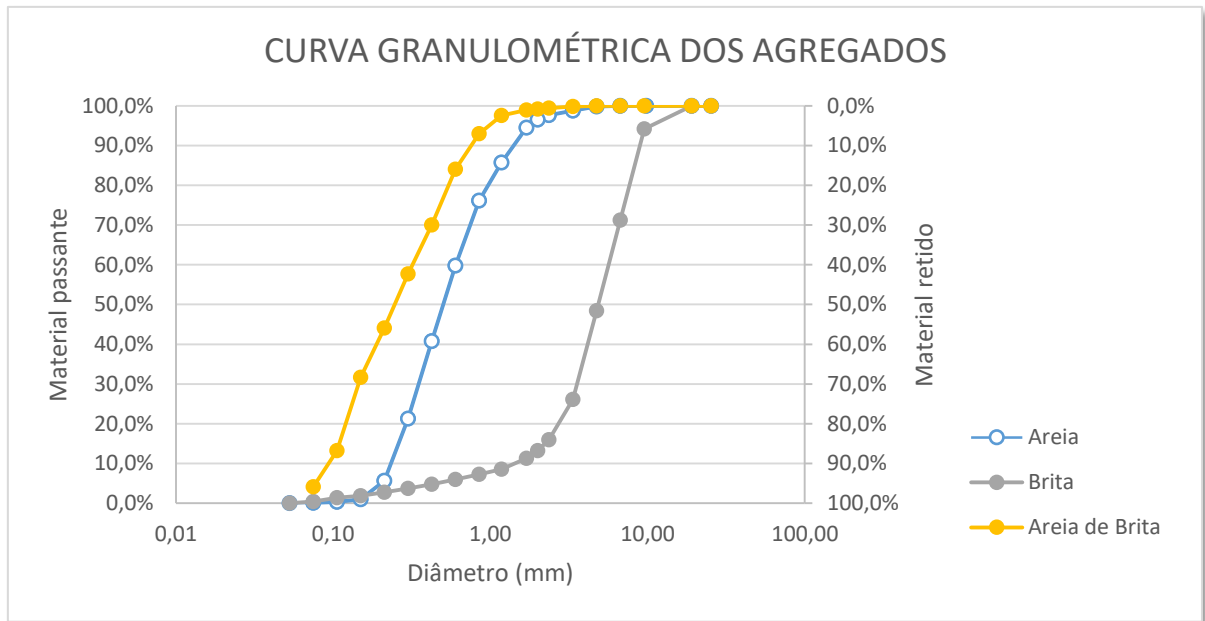


Gráfico 1 - Curva granulométrica dos agregados.

3.1.4 Cimento Portland

O cimento utilizado na pesquisa foi o cimento do tipo CII-E 32 com adição de escória, da fábrica CRH, cujas especificações estão de acordo com as exigências prescritas na norma NBR 16697:2018 “Cimento Portland - Requisitos”, sendo sua massa específica de 3100 kg/m³.

3.1.5 Fibras de Aço

As fibras de aço foram disponibilizadas pela empresa Maccaferri, em unidades soltas, do tipo de ancoragem de ganchos para melhor aderência e resistência aos esforços de tração e consequente melhora no desprendimento de fibras da matriz do concreto. Essas fibras passaram por todo controle tecnológico de qualidade e processos da empresa, devendo-se atender à norma NBR 15530:07 “Fibras de aço para concreto–Especificações”. E segundo a empresa fabricante, as fibras de aço, da linha Wirand, são produzidas, modeladas e cortadas através da estampagem de arames de aço de baixo teor de carbono, trefilado a frio, atendendo tanto a norma brasileira, quanto às normas ASTM A 820:02, ASTM C 1116:03, DIN 1045, UNI 11037, EM 14889-1.

Todas as informações técnicas referentes às fibras são disponibilizadas pelo fabricante. Na Figura 26, encontra-se a apresentação das fibras utilizadas e na Figura 31, as especificações técnicas das fibras de aço disponibilizadas pela empresa.



Figura 30 - Fibras de aço utilizadas no concreto

Propriedades Físicas		FF1
Relação L/d (comprimento / diâmetro)	-	50
Tolerância do valor individual da relação L/d	%	15
Tolerância do valor médio da relação L/d	%	7.5
Diâmetro	mm	1.00
Tolerância do valor individual do diâmetro	%	10
Tolerância do valor médio do diâmetro	%	5
Comprimento	mm	50
Tolerância do valor individual do comprimento	%	5
Tolerância do valor médio do comprimento	%	5

Propriedades Mecânicas		FF1
Resistência à tração do aço	MPa	>1100
Deformação na ruptura	%	<4
Módulo elástico	MPa	210000

Aplicação		FF1
Campos de aplicação indicados		pavimentos e pré-fabricados
Número de fibras por quilo.		3 244

Figura 31 - Características técnicas das fibras de aço utilizadas (Fonte: Ficha técnica de fibras de aço, Wirand).

3.1.6 Aditivo

O aditivo utilizado nesta pesquisa foi o superplastificante ADVA CAST, 585 da marca ADVA, do tipo redutor de água de alto desempenho (Figura 32), que atende às especificações da norma NBR 11768:2011 “Aditivos para Concreto de Cimento Portland-Requisitos”.

As principais características estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Características do aditivo superplastificante utilizado na pesquisa.

Tipo	Nome	Densidade (g/cm³)	Doses Recomendadas (%)
Superplastificante	ADVA CAST - 585	1,06	0,4% a 1,0%

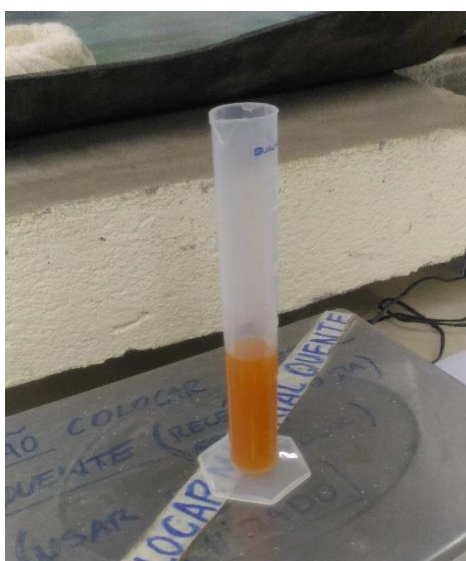


Figura 32 - Aditivo utilizado na pesquisa.

3.1.7 Etapa 2 – Definição dos Traços

A partir de todos os dados característicos dos materiais, a segunda etapa consistiu na realização de teste de traços para definição do traço ideal de referência a ser realizado, e determinação das proporções de cada componente acrescentado posteriormente ao traço. Definiu-se nesta etapa, os volumes dos materiais para mistura em suas diferentes porcentagens, objetivando-se sempre alcançar os valores regulamentados pelo Manual DNIT para Pavimentos Rígidos (2005). Conforme este Manual, a relação água/cimento deve-se variar de 0,40 a 0,55 para se obter uma resistência à compressão maior que 30MPa. Além disso, buscou-se obter uma trabalhabilidade que permitisse a adição posterior de fibras de aço e areia de brita, mantendo-se uma boa consistência, não seca, num limite de 20mm, pois abaixo desse valor, deve ser

realizado outro ensaio, o ensaio Índice de Vebe, conforme recomendado pela norma do DNIT 054:2004 PRO.

A dosagem do concreto seguirá o método adotado pela ABCP e será definido o teor de fibras de aço a ser utilizado. Como resultado desta etapa, ter-se-á os diferentes cenários de mistura de concreto com fibras de aço e areia de brita para se prosseguir com suas avaliações.

3.1.7.1 Dosagem do Concreto

Os cálculos para definição do traço, conforme o método da ABCP, estão apresentados conforme a seguir.

➤ Definição da resistência

Após a caracterização dos materiais, a dosagem do concreto pôde ser calculada partindo-se de uma resistência característica de 24 Mpa, como condição B de execução dispondo de 5,5 Mpa de desvio padrão. Teve-se a escolha do desvio padrão médio para garantir que com devido controle de pesagem dos materiais e de execução da mistura, o concreto chegue a uma resistência final maior que 30Mpa, conforme cálculo a seguir:

$$f_{cj} = 24 + 1,65 * 5,5 = 33,075 \text{ MPa}$$

➤ Relação Água/Cimento

A partir disso e pela curva de Abrams, foi encontrada a relação água/cimento da mistura de 0,49.

➤ Determinação do consumo de água

Como a dimensão máxima da brita é de 9,52mm e o abatimento de cone foi estabelecido entre 40 e 60mm, o consumo de água encontrado foi de 220 l/m³.

➤ Determinação do consumo de cimento

A partir do consumo de água e relação água/cimento, encontra-se o consumo de cimento:

$$C = \frac{220}{0,49} = 448,98 \text{ kg/m}^3$$

➤ Determinação do consumo de agregado graúdo

Com o módulo de finura da areia sendo de 2,35, aproxima-se o mesmo para 2,4 para consulta em tabela. Também com a dimensão máxima do agregado graúdo sendo de 9,5mm, obtém-se o volume compactado de agregado graúdo: 0,585 por metro cúbico de volume de concreto. A massa unitária da brita, encontrada por meio de ensaio foi de 1526 kg/m³ e assim, o consumo de agregado graúdo pode ser encontrado.

$$Cb = 0,585 * 1526 = 892,71 \text{ kg/m}^3$$

➤ Determinação do consumo de agregado miúdo

A partir das massas específicas aparentes encontradas em cada ensaio dos materiais, pode-se obter o volume da areia.

$$Vm = 1 - \left(\frac{448,98}{3100} + \frac{892,71}{2624} + \frac{220}{998} \right) = 0,2945$$

E, assim, com a massa específica da areia de 2630 kg/m³, tem-se o consumo da areia,

$$Cm = 2630 * 0,2945 = 774,58 \text{ kg/m}^3$$

➤ Apresentação do traço da mistura

Portanto, pode-se apresentar o traço obtido a partir do cálculo do método da ABCP para se iniciar a execução das misturas a partir do traço de referência, conforme a seguir:

$$\text{Traço} = \frac{448,98}{448,98} : \frac{774,58}{448,98} : \frac{892,71}{448,98} : \frac{220,00}{448,98} = 1 : 1,73 : 1,98 : 0,49$$

O traço apresentado acima é dado em massa (cimento: areia: brita: água), com adição de aditivo plastificante de 0,30% sobre a massa do cimento.

3.1.7.2 Dosagem das fibras de aço

A adição das fibras de aço no concreto foi feita baseada na consideração de Mehta e Monteiro (2004) em que na utilização do concreto reforçado com fibras de aço, a concentração de fibras de aço deve ser baixa, menor que 1% para redução das fissuras e retração do concreto por apresentar grande superfície exposta.

Adotou-se então, a concentração de 35 kg/m³ de fibras de aço, o que corresponde a 0,44% em volume. Algumas pesquisas apresentam ótimos resultados para porcentagens maiores, como a de Guimarães (2010), por exemplo, que apresentou ótimos resultados para teores de 0,8%, o que, neste trabalho, equivaleria a aproximadamente 65 kg/m³. Porém, devido ao acréscimo de areia de brita nos traços, que também reduz a trabalhabilidade, uma grande concentração de fibras de aço na mistura poderiam gerar um concreto de pouca trabalhabilidade, além de aumentar o custo com o material e operação final do concreto.

Portanto, o teor de fibras de aço utilizado na mistura foi de 0,44% em volume, equivalendo a um consumo de 35kg/m³, acrescentados em todos os traços, exceto ao traço T0, de concreto simples.

3.1.8 Etapa 3 –Execução dos traços de concreto

3.1.8.1 Traços definidos para estudo

Após a escolha, caracterização dos materiais e definiu-se os traços a serem seguidos na pesquisa, e iniciou-se a execução dos traços de concreto em datas estipuladas para que os ensaios pudessem acontecer com 7 e 28 dias de cura. Ou seja, esta etapa consistiu na execução do concreto de cada traço na betoneira (sendo um traço por betoneira). O volume total de cada traço correspondeu-se a 14 corpos de prova cilíndricos de dimensão 10x20cm.

As porcentagens de areia de brita adicionadas gradualmente ao concreto com fibras de aço foram de: 25%, 50% e 100%.

Em suma, os cinco traços determinados para serem executados na pesquisa foram definidos conforme a seguir:

- T0: Traço de Referência, concreto simples, com 0,3% de aditivo químico superplastificante;
- T1: Traço de Referência com 0,3% de aditivo e adição de 35 kg/m³ de fibras de aço;
- T2: Traço de Referência com 0,2% de aditivo, 35kg/m³ de fibras de aço, com 75% de areia natural e 25% de areia de brita;
- T3: Mesmo traço T2 com 50% de areia natural e 50% de areia de brita;
- T4: Mesmo traço T2 com 100% de areia de brita.

Tabela 5 - Traços e porcentagens de dosagens.

TIPOS DE TRAÇOS	TRAÇO REFERÊNCIA	ADITIVO (%)	FIBRAS DE AÇO (g)	AREIA NATURAL (kg)	AREIA DE BRITA (kg)
T0		0,30%	0,00	17,04	0,00
T1		0,30%	769,70	17,04	0,00
T2	1 : 1,73 : 1,98 : 0,49	0,20%	769,70	12,78	4,26
T3		0,20%	769,70	8,52	8,52
T4		0,20%	769,70	0,00	17,04

Quando se executou o traço de 25% de areia de brita, foi necessário reduzir a porcentagem de aditivo utilizada na mistura, de 0,3% para 0,2% devido a consistência do concreto ter atingido um valor alto de abatimento de cone, acreditando-se haver alguma relação limite de uso do teor de aditivo combinado com os materiais da presente pesquisa.

É importante também apresentar que a mistura dos materiais na massa de concreto ocorreu na seguinte sequência:

- 50% do agregado graúdo;
- 50% da água de amassamento;
- 50% do agregado graúdo;
- 100% do cimento;
- 100% do agregado miúdo;

- 50% da água de amassamento;
- 100% do aditivo superplastificante.

Para os traços compostos de fibras de aço, a adição dos mesmos ocorre ao final da completa e homogênea mistura. O lançamento das fibras ocorre manualmente e uniformemente distribuídas em toda massa na betoneira em funcionamento, para se evitar o aparecimento de ouriços formados pela aglomeração de fibras de aço causando pontos de fragilidade e baixa resistência. Após a mistura completa dos materiais, conforme apresentado na imagem a seguir, foram feitos os ensaios de consistência conforme a etapa a ser apresentada adiante.



Figura 33 - Mistura do concreto na betoneira.

3.1.9 Etapa 4 – Ensaio no concreto em estado fresco

A cada traço executado em betoneira, realizou-se o ensaio de abatimento de cone no concreto fresco, conforme a norma NBR NM 67:1998 “Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone”, mostrado pela imagem seguinte.

Após isto, foi realizada a moldagem dos 12 corpos de prova em moldes metálicos cilíndricos de dimensões 10x20cm. Os quais foram adensados manualmente conforme a norma NBR 5738:2015 “Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova”, seguindo também as normas NBR12821:2009 “Preparação de concreto em laboratório – Procedimento”, e ABNT NM 33:1998 “Concreto – Amostragem de concreto fresco”, representado pela Figura 35.



Figura 34 - Ensaio de abatimento de cone.



Figura 35 - Representação de adensamento de corpos de prova testes.

3.1.10 Etapa 5 – Ensaio no concreto em estado endurecido

A etapa final deste estudo consiste na realização dos ensaios nos corpos de prova após 7 e 28 dias de cura, conforme a seguir:

3.1.10.1 Ensaio de resistência à compressão axial

Conforme regulamentado na NBR 5739:2007 “Concreto – Ensaio de compressão de corpos cilíndricos”, realizado pela prensa hidráulica de capacidade total de carga de 1000kN.

Os corpos de prova foram dispostos verticalmente na prensa, conforme imagem a seguir:



Figura 36 - Corpos de prova dispostos na prensa hidráulica para compressão axial.

3.1.10.2 Ensaio de resistência à tração indireta, por compressão diametral

Devido à ausência de equipamentos adequados para ensaio de resistência à tração direta, foi realizado como alternativa, o ensaio seguindo a norma NBR 7222:2010 “Concreto e

argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos”.

Neste ensaio, os corpos de prova foram dispostos horizontalmente na prensa hidráulica, onde foram colocados de forma a centralizá-los para não ficarem fora do eixo central do corpo de prova, utilizando-se, para isso, nível de bolha, conforme imagem a seguir.



Figura 37 - Corpo de prova disposto para ensaio à compressão diametral.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados todos os resultados obtidos referentes a todos os itens da pesquisa analisando-os conforme sua funcionalidade na finalização como um todo do presente trabalho.

4.1 Resultados dos ensaios do concreto fresco

Os ensaios de abatimento de cone foram realizados em todos os traços e seus resultados estão apresentados na tabela a seguir:

Tabela 6 - Resultados de abatimentos de cone obtidos em cada traço.

Tipos de traços	Traço Referência	Aditivo (%)	Fibra de Aço (kg/m³)	Areia de Brita (%)	Abatimento de Cone (mm)
T0	1 : 1,73 : 1,98 : 0,49	0,30%	0,00	0,00	190,00
T1		0,30%	35	0,00	110,00
T2		0,20%	35	25%	85,00
T3		0,20%	35	50%	100,00
T4		0,20%	35	100%	55,00

A representação gráfica (Gráfico 2) dos resultados obtidos para consistência de cada traço é mostrada conforme a seguir:

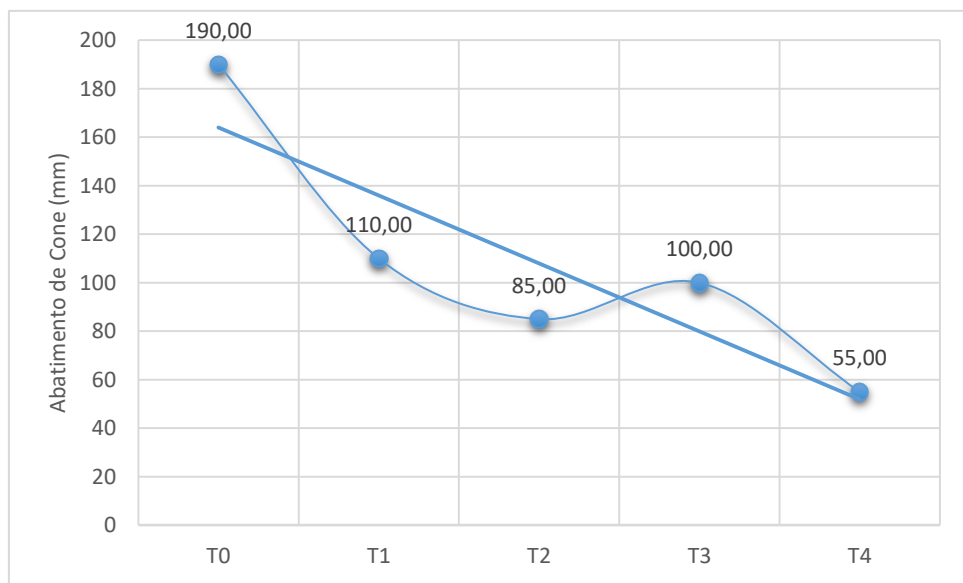


Gráfico 2 - Consistência do concreto em cada traço - Abatimento de cone.

Pode-se observar uma redução da consistência do concreto fresco conforme realizou-se o aumento da porcentagem de areia de brita, devido a absorção de água pela areia de brita, como apontado na revisão bibliográfica (MENOSSI, 2004), com exceção para o traço T3, em que houve um pequeno aumento de sua consistência, comparado ao traço T2.

No traço T4, observou-se um concreto com uma fluidez reduzida e dificuldade no seu adensamento quando comparado aos traços anteriores, cuja trabalhabilidade reduzia conforme o tempo se passava. Este efeito foi também apontado por Neville (2016) em ensaios com concretos com aditivos superplastificantes. Fato intensificado pela presença da areia de brita e fibras de aço, que gerou um aumento em sua área superficial de molhagem e, assim, uma maior demanda de água foi requerida para melhorar a consistência da mistura.

Esta ocorrência gera um problema de assentamento do material no molde e conseqüente não preenchimento de vazios, ocasionando em espaços dentro do molde sem massa da mistura, surgindo assim, pontos de fragilidade no concreto, conforme apresentado na Figura 38.



Figura 38 - Corpo de prova contendo pontos de fragilidade.

4.2 Resultados dos ensaios do concreto endurecido

Os resultados destes ensaios têm por objetivo analisar se a substituição gradual da areia de brita pela areia natural no concreto reforçado com fibras de aço, analisando se esta composição tende a manter, aumentar ou reduzir as propriedades mecânicas importantes para o concreto de pavimentação.

4.2.1 Ensaio de resistência a compressão axial

A resistência à compressão axial foi analisada para todos os traços, em 7 e 28 dias, rompendo-se os 6 corpos de prova conforme a norma referente ao ensaio. As tabelas apresentando o valor obtido de resistência para cada corpo de prova em cada traço em seus tempos de cura diferentes, estão representados a seguir, contendo sua média obtida, bem como seus desvios padrão e coeficiente de variação dos valores obtidos.

Tabela 7 - Resistências à compressão obtidas para o traço T0.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – TRAÇO T0

Tempo de Cura (dias)	Corpos de Prova	Força Atingida (tf)	Resistência Atingida (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
7	CP1	22,54	28,15	29,40	1,12	3,82
	CP2	24,29	30,34			
	CP3	23,78	29,70			
28	CP4	31,4	39,2	39,40	0,72	1,82
	CP5	32,13	40,1			
	CP6	31	38,7			

Tabela 8 - Resistências à compressão obtidas para o traço T1.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – TRAÇO T1

Tempo de Cura (dias)	Corpos de Prova	Força Atingida (tf)	Resistência atingida (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
7	CP1	26,43	33,01	34,10	0,94	2,76
	CP2	27,56	34,42			
	CP3	27,86	34,80			
28	CP4	32,95	41,16	42,40	1,23	2,90
	CP5	34,92	43,62			
	CP6	34,00	42,47			

Tabela 9 - Resistências à compressão obtidas para o traço T2.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – TRAÇO T2

Tempo de Cura (dias)	Corpos de Prova	Força Atingida (tf)	Resistência atingida (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
7	CP1	20,48	25,58	26,60	1,15	4,31
	CP2	22,29	27,84			
	CP3	21,12	26,38			
28	CP4	32,63	40,76	41,10	2,07	5,03
	CP5	31,39	39,21			
	CP6	34,67	43,30			

Tabela 10 - Resistências à compressão obtidas para o traço T3.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – TRAÇO T3

Tempo de Cura (dias)	Corpos de Prova	Força Atingida (tf)	Resistência atingida (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
7	CP1	19,85	24,79	24,40	0,49	2,02
	CP2	19,11	23,87			
	CP3	19,72	24,63			
28	CP4	34,09	42,58	41,90	0,82	1,97
	CP5	32,80	40,97			
	CP6	33,68	42,07			

Tabela 11 - Resistências à compressão obtidas para o traço T4.

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO – TRAÇO T4

Tempo de Cura (dias)	Corpos de Prova	Força Atingida (tf)	Resistência atingida (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
7	CP1	19,70	24,61	23,5	1,60	6,81
	CP2	17,35	21,67			
	CP3	19,41	24,24			
28	CP4	28,01	34,99	32,9	3,77	11,44
	CP5	28,17	35,19			
	CP6	22,87	28,57			

A partir dessas tabelas de resistências à compressão atingidas por cada corpo de prova, de cada traço, pode-se observar uma grande variação de dados nos resultados do traço T4, isto ocorreu devido à rápida perda de trabalhabilidade desta mistura, gerando brocas e pontos de fragilidade que reduzem a resistência do concreto e impedem um bom adensamento e distribuição uniforme das fibras de aço e demais componentes do traço, obtendo-se assim, corpos de prova com resistências discrepantes entre si.

A Tabela 12 apresenta o resumo das médias de todos os traços para os 7 e 28 dias de realização dos ensaios nos corpos de prova.

Tabela 12 - Resistência Média à compressão de cada traço.

Tipos de traços	Fibra de Aço (kg/m ³)	Areia de Brita (%)	Resistência Média à Compressão aos 7 dias (MPa)	Resistência Média à Compressão aos 28 dias (MPa)
T0	0,00	0,00	29,40	39,40
T1	35	0,00	34,10	42,40
T2	35	25%	26,60	41,10
T3	35	50%	24,40	41,90
T4	35	100%	23,50	32,90

No Gráfico 3, em seguida, encontra-se a representação gráfica das resistências obtidas nos ensaios em cada traço.

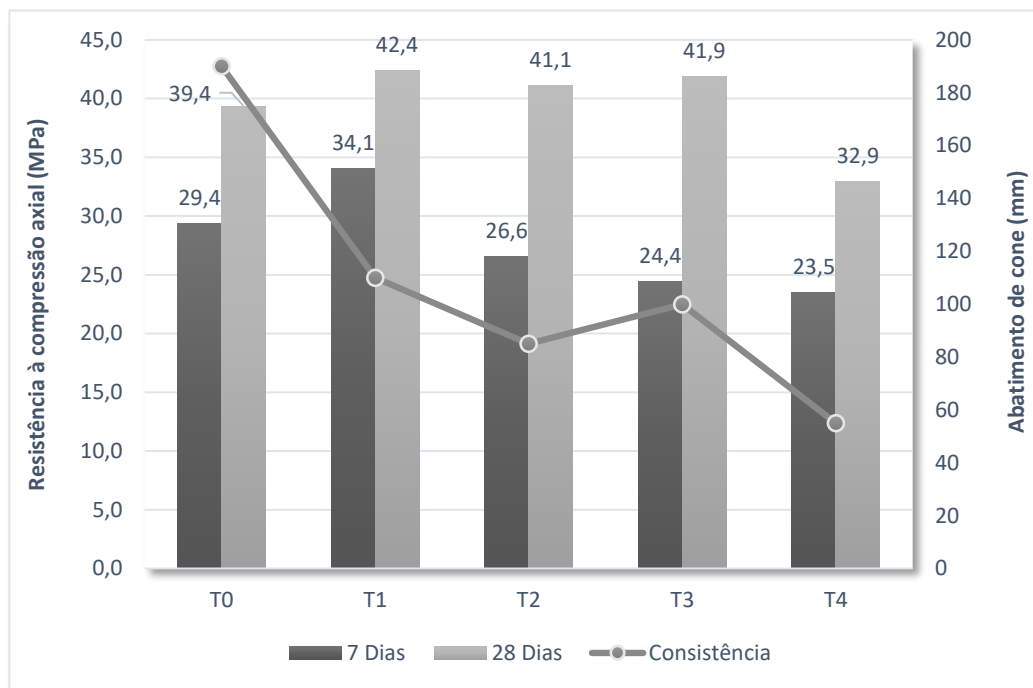


Gráfico 3 - Resultados de resistência à compressão axial e consistência de cada traço.

Observa-se que aos 7 dias de cura, o traço com maior resistência à compressão axial foi o traço T1 composto de fibras de aço, sem areia de brita, como esperado por alguns autores, apresentando um acréscimo de 15,98% de resistência. Estudos se dividem quanto à conclusão ao aumento de resistência à compressão no concreto reforçado com fibras de aço. Alguns autores afirmam não haver relação de aumento de resistência à compressão neste tipo de concreto, porém, as fibras atuam como pontes de transferência de tensões pelas fissuras, tanto para esforços aplicados de tração, quanto de cisalhamento como ocorre nos ensaios de compressão, além de aumentar a tenacidade, o consumo energético após a fissuração (FIGUEIREDO, 2000).

O traço de referência, T0, composto por areia natural, sem nenhuma adição, apresentou uma resistência à compressão maior que todos os traços: T2, T3 e T4, que apresentavam porcentagens de areia de brita em sua composição, sofrendo uma redução de resistência de 20,06% do traço T0 para o T4. Resultados diferentemente obtidos com relação à algumas bibliografias, como Menossi (2004) e André (2017), que em suas pesquisas, obtiveram

concretos com adição de areia de brita, de resistência à compressão, aos 7 dias, maior do que a obtida em concretos convencionais, com areia natural.

Aos 28 dias, os traços atingiram resistências maiores e todos ultrapassaram 30Mpa, resistência mínima orientada pelo Manual DNIT para pavimentos rígidos, além de, também, terem ultrapassado a resistência esperada pelo cálculo do método de dosagem ABCP, de 33,075Mpa.

O traço que apresentou maior resistência foi o traço T1, com 42,40Mpa, um acréscimo de 7,61% em relação ao traço de referência T0. Logo em seguida, com a resistência de 41,90Mpa foi do traço T3, de concreto composto de 50% de areia de brita, apresentando alta resistência, com 6,34% de resistência a mais que o traço de referência.

Todos os traços T1, T2 e T3, que apresentam adições de fibras de aço e porcentagens de areia de brita, apresentaram um aumento na resistência em relação ao traço de referência T0, de 39,40MPa, com exceção do traço T4, com 100% de areia de brita, que apresentou uma redução de 16,49% de sua resistência à compressão em relação a do traço de referência, cujo valor não atingiu ao esperado, de 33,075MPa.

Segundo estudos, como de Moscatelli (2011) e ainda de Figueiredo (2000), o uso de fibras de aço, aumentou a resistência à compressão do concreto (utilizando areia natural), o que foi evidente nestes resultados, com relação ao concreto simples (T0), exceto nos resultados do traço T4. Ainda, estudos em concreto de areia de brita, como apresentado por Menossi (2004), a resistência à compressão aumentou com relação ao concreto com areia natural. Portanto, o esperado seria a resistência à compressão aumentar ou se manter, com o uso da areia de brita, porém, devido à perda de trabalhabilidade ocasionada pelo incremento maior de areia de brita, juntamente com as fibras de aço, como já apresentado, o concreto apresentou vazios de ar (pela dificuldade de adensamento), que reduzem a aderência entre os componentes, principalmente, entre os agregados e a fibra de aço, perdendo o atrito e reduzindo a resistência ao cisalhamento, o que ocasionou a ruptura mais rápida e redução da resistência, mesmo que em pouca porcentagem.

O Gráfico 3 está associado às resistências obtidas juntamente com os resultados de consistência do concreto. Essas duas propriedades não estão diretamente relacionadas, podendo-se observar que, mesmo a resistência se elevando no traço T1, a consistência deste, foi menor do que o apresentado pelo traço T0, cuja resistência é menor. Porém, nos traços de areia de brita, a trabalhabilidade tende a reduzir com o aumento da porcentagem deste agregado, tendendo a reduzir também a resistência do concreto (havendo exceções, como apresentado pelo traço T3). Tal resultado pode ser relacionado à absorção de água que aumenta para adições

de areia de brita para os traços T2, T3 e T4, e também ao aumento da área de superfície de molhagem, com adição de fibras de aço e areia de brita. Sendo assim, a água precisa ocupar maior espaço e assim, a sua demanda é maior, reduzindo a trabalhabilidade. O traço T0, mesmo apresentando a mesma quantidade de água dos outros traços, por também apresentar adição de aditivo superplastificante em sua composição, obteve um valor de abatimento de cone maior, e a segunda menor resistência. Para melhorar a mistura, se poderia ter reduzido a quantidade de água em sua composição, pois o aditivo superplastificante possibilita a redução da relação água/cimento do concreto, e assim, talvez a resistência poderia aumentar, devido a essa redução de água. Além disso, é interessante observar que para as duas maiores resistências obtidas para este ensaio, o resultado do ensaio de abatimento de cone foi aproximadamente o mesmo para os dois traços, em T1 e T3. Podendo ser explicado devido a uma melhor homogeneidade da mistura dos traços, possibilitando um reforço em toda a região do corpo de prova e permitindo a distribuição das tensões de maneira mais uniforme e eficiente.

Outra perspectiva a respeito da redução de resistência e trabalhabilidade para o traço T4 é com relação a textura e formato dos grãos de areia de brita. Conforme apresentado no Item 2.6.3.2, a respeito da areia de brita, as rochas de granito gnaisse de composição de quartzo-feldspato, que é a rocha de origem deste agregado miúdo utilizado na pesquisa, apresentam grandes porcentagens de muscovita e biotita, que são minerais de aspecto lamelares. A biotita, é um mineral cuja superfície é lisa e a sua presença no concreto podem gerar uma redução tanto na trabalhabilidade, quanto na resistência à compressão do concreto, devido à baixa interação entre este agregado e a pasta de concreto.

A Figura 39, a seguir, apresenta os corpos de prova rompidos por compressão axial.



Figura 39 - Dois corpos de prova do traço T1 à esquerda, e os dois outros do traço T2, todos rompidos à compressão axial.

É possível observar a diferença na ruptura gerada em cada traço. No traço T1 composto por areia natural e fibras de aço, a ruptura ocorreu com poucas fissuras, já no traço T2, composto por fibras de aço e 25% de areia de brita em sua composição, a ruptura ocorreu de forma mais cisalhada, com várias fissuras e desprendimento de fibras. A aderência entre o agregado e a pasta de cimento é um importante fator de resistência do concreto (NEVILLE, 1997).

Uma foto microscópica foi tirada do concreto para apresentar a interação dos componentes do concreto. A microscopia tirada, por um equipamento de lente microscópica, no corpo de prova do traço T2 está apresentada na Figura 40.



(a)



(b)

Figura 40 – Microscopia do concreto após a ruptura e desprendimento das fibras de aço em (a) e (b).

4.2.2 Ensaio de resistência a compressão diametral

A resistência à tração indireta ou compressão diametral foi analisada para todos os traços, em 7 e 28 dias, rompendo-se os 6 corpos de prova conforme a norma referente ao ensaio. As tabelas apresentando o valor obtido de resistência para cada corpo de prova em cada traço em seus tempos de cura diferentes, estão representados a seguir, contendo sua média obtida, bem como seus desvios padrão e coeficiente de variação dos valores obtidos.

Tabela 13 - Resistências à tração obtidas para o traço T0.

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO – TRAÇO T0

Tempo de Cura (dias)	Corpos de Prova	Força Atingida (tf)	Resistência Atingida (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de Variação (%)
7	CP1	8,67	2,71	2,15	0,52	24,32
	CP2	5,34	1,67			
	CP3	6,67	2,08			
28	CP4	11,92	3,72	3,61	0,15	4,22
	CP5	11,80	3,68			
	CP6	11,02	3,44			

Tabela 14 - Resistências à tração obtidas para o traço T1.

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO – TRAÇO T1

Tempo de Cura (dias)	Corpos de Prova	Força Atingida (tf)	Resistência Atingida (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de Variação (%)
7	CP1	12,03	3,76	3,69	0,13	3,48
	CP2	11,36	3,55			
	CP3	12,11	3,78			
28	CP4	15,08	4,71	4,77	0,10	2,17
	CP5	15,66	4,89			
	CP6	15,09	4,71			

Tabela 15 - Resistências à tração obtidas para o traço T2.

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO – TRAÇO T2

Tempo de Cura (dias)	Corpos de Prova	Força Atingida (tf)	Resistência Atingida (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
7	CP1	10,46	3,27	3,20	0,06	1,87
	CP2	10,19	3,18			
	CP3	10,09	3,15			
28	CP4	12,99	4,05	4,43	0,38	8,57
	CP5	14,14	4,41			
	CP6	15,42	4,81			

Tabela 16 – Resistências à tração obtidas para o traço T3.

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO – TRAÇO T3

Tempo de Cura (dias)	Corpos de Prova	Força Atingida (tf)	Resistência Atingida (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
7	CP1	10,51	3,28	3,02	0,26	8,46
	CP2	8,87	2,77			
	CP3	9,69	3,02			
28	CP4	12,61	3,94	4,67	0,79	16,90
	CP5	14,65	4,57			
	CP6	17,64	5,51			

Tabela 17 - Resistências à tração obtidas para o traço T4.

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO – TRAÇO T4

Tempo de Cura (dias)	Corpos de Prova	Força Atingida (tf)	Resistência Atingida (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coefficiente de Variação (%)
7	CP1	8,72	2,72	2,65	0,32	11,95
	CP2	7,38	2,30			
	CP3	9,37	2,92			
28	CP4	14,24	4,45	4,01	0,55	13,61
	CP5	13,39	4,18			
	CP6	10,88	3,40			

A partir destes resultados obtidos, pode-se verificar altos valores para os coeficientes de variação, indicando uma grande discrepância entre os resultados encontrados para cada corpo de prova. Isto pode ser explicado pela falta do equipamento correto para os corpos de prova de dimensões 10x20cm, sendo necessário a adaptação do equipamento existente para o ensaio, o que pôde gerar falhas na disposição do corpo de prova, sofrendo esforços fora do eixo central da peça e diferenças nas resistências finais.

Tabela 18 - Resistência Média à Tração de cada traço.

Tipos de traços	Fibra de Aço (kg/m ³)	Areia de Brita (%)	Resistência Média à Tração aos 7 dias (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Resistência Média à Tração aos 28 dias (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
T0	0,00	0,00	2,15	0,52	3,61	0,15
T1	35,00	0,00	3,69	0,13	4,77	0,10
T2	35,00	25,00%	3,20	0,06	4,43	0,38
T3	35,00	50,00%	3,02	0,26	4,67	0,79
T4	35,00	100,00%	2,65	0,32	4,01	0,55

Uma representação gráfica dos resultados obtidos são mostrados no Gráfico 4 a seguir:

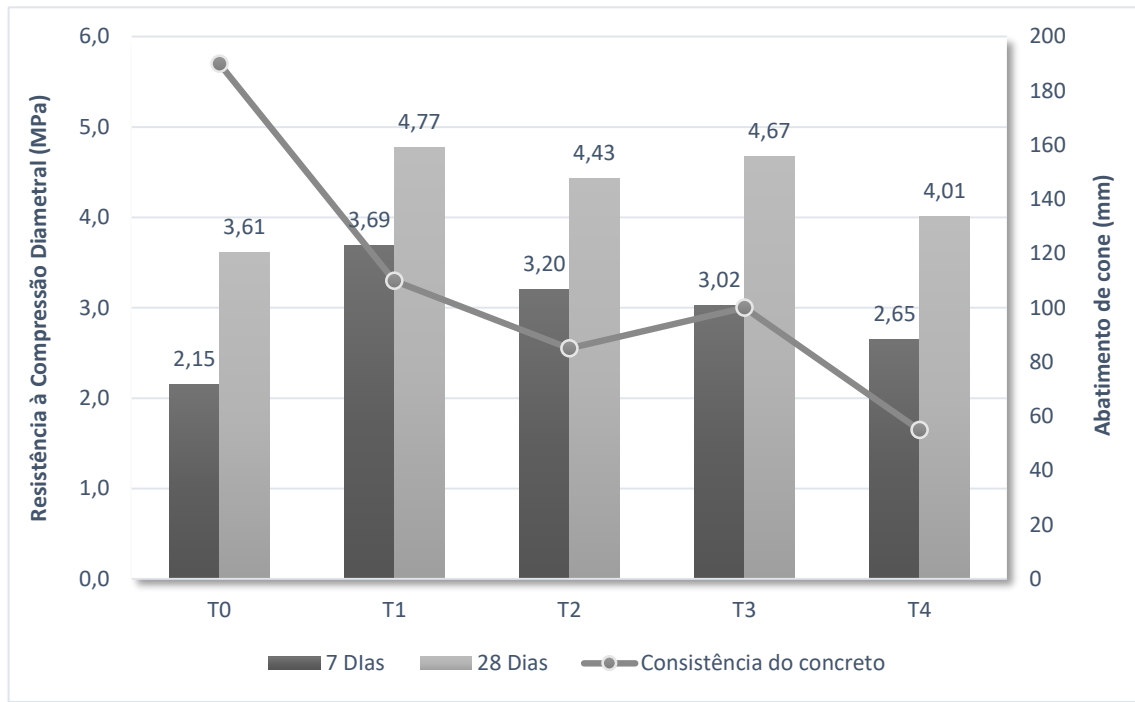


Gráfico 4 - Resultados de resistências à compressão diametral e consistências de cada traço.

Nestes resultados de resistência à tração obtidos, nos 7 dias, o melhor valor também foi o resultado do traço de concreto com fibras de aço (T1), com um ganho de 71,63% de resistência à tração. Todos os outros traços com fibras de aço e porcentagens de areia de brita (T2, T3 e T4) alcançaram valores de resistência maiores que o traço de referência (T0), sendo o menor ganho o da resistência do traço T4, com um aumento de apenas 23,25%.

Aos 28 dias, a resistência à tração do traço T1 continuou sendo o maior resultado obtido, de 4,77MPa, tendo um ganho de resistência de 32,13%, ficando pouco mais acima do traço T3, com 4,67MPa, que considerando o desvio padrão, há uma pouca diferença entre esses valores obtidos. Este último apresentou um ganho de 29,36% em resistência com relação ao traço de referência.

Pode-se observar com esses resultados, que o aumento da resistência à tração no concreto, com a utilização das fibras de aço, foram bem maiores do que o aumento da resistência à compressão, como esperado pela bibliografia, devido a capacidade resistente pós-fissuração da fibra de aço no concreto. Segundo Figueiredo (2000), a adição de fibras de aço geram um aumento muito significativo na resistência à tração do concreto, sendo um dos principais objetivos de sua adição. Alguns estudos, como o de Nunes (2006, apud Figueiredo, 2000) pôde

obter um ganho de 67% a 104% na resistência à tração, adicionando-se um teor maior de fibras de aço, de 2%, de 35mm de comprimento e esbeltez 65, verificando ainda que o aumento da dimensão máxima do agregado de 12,5 para 19mm gerou uma redução dessa resistência.

Considerando o desvio padrão apresentado para cada média obtida de resistência à tração, pode-se observar que os valores não houveram grandes discrepâncias, porém, pode-se analisar o maior valor obtido de tração, para o traço T1 devido a maior resistência ao arrancamento do concreto com fibras de aço contendo areia natural. O traço T4, apresentando espaços vazios, devido ao mal adensamento e distribuição das fibras, ocasionou uma redução da resistência ao arrancamento das fibras.

Nos ensaios de compressão diametral realizados foi possível observar outro aspecto importante quanto a capacidade resistente do concreto. Para os ensaios em que continham fibras de aço em sua composição, conforme a velocidade da força aplicada pela máquina era aumentada, a força resistente do concreto demonstrada no visor aumentava, porém chegando a certos valores, ocorria redução e, logo em seguida, o aumento novamente, havendo essa oscilação até a ruptura total do corpo de prova. Este acontecimento se deve devido a característica pseudo-dúctil pela qual as fibras de aço atribuem ao concreto, em que, conforme Figueiredo (2000), atuam como pontes de ligação impedindo a propagação das fissuras. Desta forma, quando uma fissura era gerada, a força aplicada pela máquina se reduzia pois a fissura era gerada, porém, logo em seguida as tensões eram absorvidas pelas fibras de aço atuando como pontes de ligação entre as fissuras. Este fato foi evidenciado até que a tensão aplicada se tornou maior que a tensão resistente do concreto e das fibras, acarretando na ruptura total do corpo de prova. Este fato não foi verificado no concreto de referência (T0), pois ele não apresenta grandes resistências à tração, sofrendo uma ruptura frágil, sem oscilações.

As figuras 41 e 42 mostram a diferença entre a ruptura do concreto simples e a do concreto reforçado com fibras de aço, respectivamente. Pode-se verificar que o corpo de prova de concreto simples se desprende em duas partes, sem haver um aviso prévio, diferentemente do corpo de prova de concreto com fibras de aço, que se rompe mantendo a união entre os componentes, reduzindo a possibilidade de acidentes devido a ruptura estrutural.



Figura 41 - Concreto simples, T0, rompido a compressão diametral.



Figura 42 - Concreto com fibras de aço, T1, rompido a compressão diametral.

O concreto composto por fibras de aço e areia de brita, T2, apresentou uma diferente configuração após o seu rompimento à compressão diametral. Houve uma abertura maior em suas fissuras centrais, como apresentado na Figura 43.



Figura 43 - Concreto do traço T2 após rompimento à compressão diametral.

Este ocorrido pode ser explicado em decorrência da interação entre os componentes do concreto, com a presença da areia de brita, conforme explicado anteriormente, reduzindo a resistência ao arrancamento das fibras de aço.

Segundo Bastos (2002), os agregados com grãos em formato de agulha ou disco, geram um concreto de menor trabalhabilidade, requerendo uma maior pasta de cimento. Assim, com a presença das fibras de aço, que, também reduzem a trabalhabilidade, pode-se ter sido necessário um maior volume de pasta de cimento na composição para unir todas as partículas e componentes do concreto e possibilitar uma maior aderência.

Assim como no gráfico para resistências à compressão axial e consistência do concreto, o Gráfico 4 apresenta a relação entre as resistências à compressão diametral e a consistência do concreto. É interessante observar que, assim como observado na mesma representação gráfica para compressão axial, nos traços das duas maiores resistências obtidas para tração indireta, o ensaio de abatimento de cone também se aproximou em seus valores encontrados, nos traços T1 e T3.

É importante salientar que para o estudo de pavimentos, a resistência à tração analisada é a tração à flexão, porém, devido à falta de equipamento apropriado em laboratório, o ensaio de resistência à tração indireta foi executado, por compressão diametral. Porém, os valores podem ser estimados indiretamente através do cálculo de correlação apresentado anteriormente no Item 2.9.2, encontrando os seguintes valores de resistência à tração direta e à tração na flexão:

Tabela 19 - Resistências à Tração direta e à Tração na Flexão obtidos por correlações.

Tipos de traços	Resistência à Tração Direta (MPa)	Resistência à Tração na Flexão (MPa)
T0	3,15	2,28
T1	4,29	3,00
T2	3,98	2,79
T3	4,20	2,94
T4	3,61	2,52

Conforme o Manual do DNIT de Pavimentos Rígidos (2005), para o concreto de pavimentos rígidos, os resultados de resistência à tração na flexão devem apresentar no mínimo 4,5 MPa, ou para o caso de pavimentos estruturalmente armados, a resistência analisada é à compressão, de 30MPa. Portanto, segundo os dados obtidos indiretamente nesta pesquisa, por correlações, os traços apresentados não alcançam o mínimo de resistência à tração na flexão estipulado pelo DNIT, sendo assim, ainda teria que haver cálculos para acréscimo de estrutura armada na pavimentação. Porém, pode-se efetuar o aumento do teor de fibras de aço no traço para crescimento da resistência à tração na flexão, no intuito de reduzir a armação em barras de aço, o qual torna o processo executivo de pavimentação mais lento do que se fosse realizado apenas em concreto reforçado com fibras de aço.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são relatadas todas as principais conclusões encontradas a respeito do comportamento e características observadas nas misturas de concreto analisadas, bem como a apresentação de sugestões para futuros trabalhos que poderão decorrer deste, para aprimoramento do estudo nesta área.

5.1 Conclusões

Diante da situação atual das rodovias brasileiras, é notória a importância da análise quanto à viabilidade de utilização da pavimentação rígida, cuja durabilidade e vida útil é superior à pavimentação flexível, mais utilizada no Brasil. O estudo dos materiais empregados na pavimentação rígida deve acompanhar essa análise, no intuito de otimizar processos, reduzir custos de implantação e melhorar o desempenho e a durabilidade dos pavimentos através dos estudos da tecnologia dos materiais e aproveitamento de resíduos, buscando o desenvolvimento da sustentabilidade nesta área.

No presente trabalho, o estudo foi conduzido no intuito de analisar as características e desempenho do concreto reforçado com fibras de aço, utilizando-se graduais teores de areia de brita.

A partir dos resultados obtidos de abatimento de cone, foi possível observar que, como esperado, a utilização de areia de brita e fibras de aço reduziram a consistência do concreto, gerando maior demanda de água. A utilização do aditivo superplastificante foi um componente importante no concreto para melhorar essa problemática. Porém, no traço de substituição de 100% da areia natural pela areia de brita, a redução da trabalhabilidade foi significativa: apesar de não apresentar consistência seca, possuía baixa fluidez e uma perda rápida de sua trabalhabilidade, dificultando o adensamento manual da mistura. Isto pode dificultar a distribuição e lançamento do concreto no local da obra, além de facilitar a aglomeração de fibras de aço em certas regiões, o que reduz o desempenho das fibras, gerando pontos de fragilidade. Apesar disso, o traço de 50% de areia de brita apresentou boa trabalhabilidade. Essa trabalhabilidade deve ser definida em projeto conforme o tipo de equipamento para lançamento do concreto. Porém, em termos de pesquisa, pôde-se analisar essa propriedade como sendo boa ou não, relacionando-a à facilidade de adensamento e disposição do concreto nos moldes de corpos de prova, como ocorreu neste traço.

Com relação a resistência à compressão axial, as fibras de aço apresentaram um aumento de até aproximadamente 16% no traço T1, com relação ao concreto sem fibras de aço (T0) já nos primeiros 7 dias de cura, e quase 8% de acréscimo aos 28 dias. Dentre os resultados obtidos nos traços de areia de brita, o traço T3, contendo 50% de areia de brita, foi o que apresentou maior resistência. Considerando-se o desvio padrão de 1,23MPa calculado para o traço T1 aos 28 dias (Tabela 8), pode-se dizer que, aproximadamente, as resistências se equiparam, sendo 42,40MPa para o traço T1 e 41,90MPa para o traço T3, apresentando um ótimo resultado de desempenho para a substituição da areia natural pela areia de brita.

Ao analisar a resistência à tração, por compressão diametral, as fibras de aço apresentaram a sua característica como armadura tridimensional, como esperado e estudado em bibliografias, de inibir e dificultar o aparecimento de fissuras, redistribuindo as tensões e apresentando características dúcteis. Já o concreto sem fibras de aço se rompeu de imediato, se desprendendo em duas partes. O traço que apresentou maior resistência à compressão diametral foi o traço T1, com ganho de quase 72% de sua resistência aos 7 dias de cura, chegando a 4,77Mpa aos 28 dias, representando um ganho de aproximadamente 32% com relação ao concreto simples (T0). Já o traço contendo areia de brita e fibras de aço, que apresentou o melhor resultado foi o traço T3 novamente, chegando a 4,67MPa, o que representa uma grande aproximação com o traço T1, considerando o seu desvio padrão. Apresentando assim, um eficiente resultado para 50% de areia de brita no concreto para também os ensaios de resistência à compressão diametral.

A tabela a seguir sintetiza os resultados obtidos e aqui discutidos. A porcentagem apresentada refere-se ao acréscimo ou perda de resistência comparados ao traço T0.

Traço	7 dias				28 dias			
	Compressão Axial (MPa)	%	Tração Indireta (MPa)	%	Compressão Axial (MPa)	%	Tração Indireta (MPa)	%
T0	29,40	0	2,15	0	39,40	0	3,61	0
T1	34,10	15,98	3,69	71,63	42,40	7,61	4,77	32,13
T2	26,60	-9,52	3,20	48,84	41,10	4,31	4,43	22,71
T3	24,40	-17,01	3,02	40,46	41,90	6,34	4,67	29,36
T4	23,50	-20,06	2,65	23,25	32,90	-16,49	4,01	11,08

Em suma, a partir dos resultados obtidos, foi possível comprovar a eficiência das fibras de aço, que, com o teor utilizado, gerou aumentos relevantes tanto na resistência à compressão quanto na resistência à tração do concreto. Outra propriedade muito importante incorporada ao concreto foi o controle de fissuração. A sua capacidade resistente, mesmo após as fissurações internas, atuou impedindo o desprendimento de placas de concreto após a sua ruptura, como ocorre na ruptura do concreto convencional.

A utilização da areia de brita tem como principal benefício a redução dos impactos ambientais gerados pela exploração desordenada da areia natural nos leitos dos rios, dando finalidade à um rejeito antes não utilizado. As resistências à compressão e à tração apresentaram algumas reduções em certas porcentagens, porém a sua utilização no concreto com fibras de aço mostrou resultados que impulsionam maiores pesquisas a seu respeito. Foi também observado que a areia de brita reduz a resistência inicial do concreto, tanto para compressão quanto para tração, podendo não ser indicada a sua utilização para os casos onde se deseja resistência inicial, como por exemplo para a abertura da pista ao tráfego antes da completa cura do concreto.

A análise da resistência à tração é feita a partir da resistência à tração na flexão, porém, devido à falta de equipamento apropriado, foi utilizado a compressão diametral, com isso, os resultados obtidos indiretamente para obtenção dos valores de resistências à tração na flexão, não alcançaram o mínimo apresentado pelo Manual DNIT de Pavimentação Rígida (2005), sendo 4,5MPa. Porém, para próximos estudos pode-se aumentar o teor de fibras de aço para se alcançar esse resultado.

Por fim, pode-se concluir que a utilização de areia de brita na composição do concreto com fibras de aço para pavimentação é uma alternativa promissora, considerando seu baixo custo, além de sustentável, mantendo o desempenho do concreto para porcentagens certas, como foi para esta pesquisa, com 50% de areia de brita. Sendo assim, o intuito desta pesquisa é influenciar estudos aprofundados para essa composição de concreto para pavimentação, aprimorando-o para que o seu uso seja viável tanto economicamente quanto estruturalmente para se haver melhorias nas rodovias e estradas brasileiras.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Para dar continuidade a este estudo, sugere-se:

- Estudar a influência da granulometria, textura, formato dos grãos e origem dos agregados, bem como utilizar equipamentos para identificação da composição dessas rochas;
- Estudar o custo total do concreto reforçado com fibras de aço composto de areia de brita para a pavimentação e análise de viabilidade econômica e financeira, abordando-se os custos e benefícios da utilização;
- Estudar o módulo de elasticidade deste concreto, a tração na flexão, e a tração por compressão diametral utilizando-se aparelho para dimensões de 10x20cm;
- Estudar o incremento de variadas e diferentes porcentagens de areia de brita, no intuito de encontrar pontos ótimos de sua utilização;
- Estudar diferentes teores de aditivo para melhorar a trabalhabilidade nas maiores porcentagens de areia de brita, encontrando pontos ótimos de porcentagem de aditivo;
- Estudar outros teores de fibras de aço no concreto com areia de brita e análise de seu desempenho;
- Estudar esta composição de concreto utilizando-se areia de brita que decorreu de maiores processos de tratamento.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, 2012, **Relatório Técnico 01 – Análise da Cadeia Produtiva de Agregados Minerais para Obras de Construção Civil e Infraestrutura**, Brasília, Brasil.

ALMEIDA, Marconi Oliveira de. **Estudo da tenacidade e proposta de nova configuração do ensaio de flexão em placas para os concretos reforçados com fibras de aço**. 1999. 212 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

ALMEIDA, S.L.M. e SAMPAIO, J.A.; **Obtenção de Areia Artificial com Base em Finos de Pedreiras**. Areia e Pedra, n.20, p.32-36, dezembro de 2002.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 116 R-90: Cement and concrete terminology: ACI manual of concrete practice**. Detroit, 1994b: Part 1: materials and general properties of concrete.

ANDRÉ, Flávio Pereira. **Dosagem Científica de Concretos Usando Areia de Brita com BétonlabPro® 3**. 2017. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **“Governar é abrir estradas”. O concreto pavimentando os caminhos na formação de um novo país**. 1. Ed. São Paulo: ABCP, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND; **Curso de tecnologia de pavimentos de concreto, Módulo 2 – Projeto e dimensionamento dos pavimentos**. [S.l.:s.n.], [2010].

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND; **Estradas de concreto: Este é o caminho do futuro**, [200?]. Disponível em: <http://viasconcretas.com.br/wp-content/uploads/2013/02/Folheto_Estradas_Concreto.pdf>. Acesso em: 1 nov. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5732:1991 **Cimento Portland comum - Especificação**. Rio de Janeiro. 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5738:2003 **Concreto - Procedimento para Moldagem e Cura de Corpos-de-Prova - Método de Ensaio**. ABNT/MB 2. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5739/2007 - **Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos – Método de Ensaio**. ABNT/MB 3. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118/2007 - **Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos – Método de Ensaio**. ABNT/MB 3. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7211:2009. **Agregados para Concreto – Especificação**. ABNT/EB 4. Rio de Janeiro. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7217:1987. **Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7222:2011. **Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. NBR 9479:2006. **Argamassa e concreto-Câmaras úmidas e tanques para cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. NBR 11768:2011. **Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 12142:2010. **Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos.** Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 12655:2015. **Concreto de cimento Portland -Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento.** Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 12821:2009. **Preparação de concreto em laboratório-Procedimento.** Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16697:2018. **Cimento Portland - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15530: 2007. **Fibras de aço para concreto–Especificações.** Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 33:1998 **Concreto – Amostragem de concreto fresco.** Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 52:2003 **Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 53:2009 **Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** NM 53:2009. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR NM 67:2009 **Concreto–Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone.** Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM 248:2003 **Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NM 45:2006 **Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2006.

BANDUK, Ragueb Chauki. **Apostila de Materiais de Construção II**. Universidade Presbiteriana Mackenzie. Escola de Engenharia. Engenharia Civil. 2005.

BALBO, José T. **Pavimentos de concreto**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. p. 58.
Disponível em:
<https://books.google.com.br/books/about/Pavimentos_de_concreto.html?id=iFzUDAAAQB-AJ&printsec=frontcover&source=kp_read_button&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false>.
Acesso em 11 dez. 2018, 19:54.

BENTUR, A., MINDESS, S. **Fiber reinforced cementitious composites**. 2nd Edition, Modern Concrete Technology Series, 2007.

BIANCHI, Flavia Regina; BRITO, Isis RT; CASTRO, Veronica AB. **Estudo comparativo entre pavimento rígido e flexível**. Associação de Ensino Superior Unificado do Centro Leste. Serra, ES, 2008.

BOGGIO, A. J. **Estudo comparativo de métodos de dosagem de concretos de cimento Portland**. 2000. Dissertação (Mestrado). UFRGS, Porto Alegre, 2000.

BONAVETTI, V.L.; IRASSAR, E.F. **The effect of stone dust content in sand**. **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 3, p. 580-590, jan. 1994.

BUCHER, H. R. E. **Estimativa da resistência à compressão de concretos executados com cimento nacional em função da relação a/c**. São Paulo: ABCP, 1989.

CALLISTER Jr, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução**. 5a ed. LTC Editora. p.589, 2002.

CARNEIRO, F. L. **Um Novo Método para Determinação da Resistência à Tração dos Concretos**. Comunicação, 5. Reunião Associação Brasileira de Normas Técnicas, Publ. Inst. Nac. Tecnol. Rio De Janeiro, 1943.

CECCATO M.R. **Estudo da trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras de aço**. Dissertação USP – 1998.

CEPURITIS, R., 2014, **New Type of Crushed Sand to Replace Natural Sand in Concrete Production, Results: Minerals & Aggregates**, n. 2, pp 38-43.

CERVO, T. C., 2004. **Estudo da resistência à fadiga de concretos de cimento Portland para pavimentação**. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 220 p., São Paulo.

CHODOUNSKY, Marcel Aranha; VIECILI, Fábio André. **Pisos industriais de concreto: aspectos teóricos e executivos**. São Paulo: Reggenza, 2007. 373 p.

COLPO, Gracieli Bordin. **Uso de fibras de aço em concreto para pavimentos**. 2011. Disponível em: <http://dspace.unipampa.edu.br:8080/jspui/bitstream/rii/1619/1/Uso%20de%20fibras%20de%20a%C3%A7o%20em%20concreto%20para%20pavimentos.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2018.

CONCRETE INNOVATION CENTER – COIN, 2009, **Production and Utilization of Manufactured Sand**, Oslo, Noruega, 2009.

CONFEDERACAO NACIONAL DE TRANSPORTE – CNT. **Pesquisa Rodoviária 2018 - Relatório Gerencial**. Brasília: CNT 2018. Disponível em: <http://cms.pesquisarodovias.cnt.org.br//Relatorio%20Geral/Pesquisa%20CNT%20de%20Rodovias%202018%20-%20web%20-%20baixa.pdf>> Acesso em 07 dez. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. 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.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES DNIT 054/2004 PRO – **Pavimento Rígido – Estudo de traço de concreto e ensaios de caracterização de materiais – Procedimento**. 2004. Rio de Janeiro.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2006.

DO NASCIMENTO, Felipe Bomfim Cavalcante. **CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS DE AÇO**. Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-ALAGOAS, v. 3, n. 1, p. 43-56, 2015.

DI PACE, Guillermo; BECKER, Edgardo. **COSTO DE PAVIMENTOS URBANOS A LO LARGO DE SU VIDA ÚTIL**, 1997.

EDGINGTON, J., HANNANT, D. J., WILLIAMS, R. I. T., 1974, **Steel fiber reinforced concrete**, Building Research Establishment, Garston, Watford.

FALCÃO, M.F.B.; SOARES, J.B. **Considerações sobre o ensaio de compressão diametral no estudo de materiais de pavimentação**. In: CONGRESSO DE ENSINO E PESQUISA EM TRANSPORTES, 26., 2002, Natal. Anais... Natal: ANPET, v. 1, p. 169-81.

FIGUEIREDO, Antonio Domingues de. **Concreto com Fibras**. Ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005, Capítulo 38, p. 1195-1225, 2005.

FIGUEIREDO, Antonio Domingues de. **Concreto com fibras de aço**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. PCC USP. ISSN 0103-9830, 70p, 2000.

FIGUEIREDO, Antonio Domingues de. **Concreto Reforçado com Fibras**. Concreto: Ciência e Tecnologia. IBRACON. Volume 2, 2011.

FIGUEIREDO, Antonio Domingues de. **Concreto Reforçado com Fibras**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2011.

FILHO, José Moacir de Mendonça; ROCHA, Eider Gomes de Azevedo. **Estudo Comparativo entre Pavimentos Flexível e Rígido na Pavimentação Rodoviária**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 03, Ed. 06, Vol. 02, pp. 146-163, junho de 2018. ISSN:2448-0959.

FREITAS, Rodrigo Bezerra de; CARVALHO, Mailson Castelão de. **Pavimento de Concreto e seus Benefícios em Rodovias: Uma Revisão Bibliográfica**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 03, Ed. 01, Vol. 02, pp. 21-33, janeiro de 2018. ISSN:2448-0959.

GUIMARÃES, Diego. **Pisos industriais em concreto: determinação de teores ótimos de fibras de aço e polipropileno em ensaios mecânicos**. Diplomação – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

HOLANDA, K.M.A.; PINHEIRO, L.M. **Desempenho Estrutural do Concreto reforçado com fibras de aço**, REIBRAC 43, IBRACON, 18 –ago. 2001.

HELENE, Paulo. **Concreto, Ensino, Pesquisa e Realizações**, Volume I – Ibracon, 2005. ISAÍÁ G.C. – “Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações”. Ed. IBRACON. São Paulo. 2005. 2v, 1579p.

HELENE, R. R. L.; TERZIAN, P. R. **Manual de dosagem e controle do concreto**. Brasília, PINI, 1992.

JACINTHO, A. E. P. G. de A.; GIONGO, J. S. **Resistência mecânica do concreto**. In: ISAIA, Geraldo C. (Ed). Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005. cap. 20.

KLAIBER, F.W; LEE, D.Y. **Effects of air content, water-cement ratio and aggregate type on the flexural fatigue strength of plain concrete**. ACI Journal, Special Publication, 1982, v.75, nº 5, pp. 111-132.

LOPES, M. M. **Substituição parcial de armaduras de flexão em vigas de concreto**. 2005. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro.

MEDEIROS, A. **Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras**. Tese de Doutorado, PUC – RJ: 201 p.; Rio de Janeiro, Brasil; 2012.

MESQUITA, José Carlos Lobato. **Pavimento Rígido como Alternativa Econômica Para Pavimentação Rodoviária - Estudo de Caso – Rodovia BR-262, Miranda- Morro do Azeite - MS**. 2001. 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, 2001.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 1ª Edição São Paulo: Editora Pini LTDA, 2008.

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

MENDES, S. E. da S. **Estudo experimental de concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba**. 2002. 146 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, 2002. Disponível em: <<http://www.ppgcc.ufpr.br/dissertacoes/d0010.pdf>>. Acesso em 12 nov. 2013, 20:30.

MENOSSI, Rômulo Tadeu. **Utilização do pó de pedra basáltica em substituição à areia natural do concreto**. São Paulo, 2004.

Ministério de Minas e Energia – Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, 2009, **Relatório Técnico 31 – Perfil de Areia para a Construção Civil**, Brasília, Brasil.

MOSCATELLI, Ivo. **Fibras de aço em concreto de cimento Portland aplicados a pavimento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas –UNICAMP, Campinas - São Paulo, 2011.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. São Paulo: PINI, 1997.

NEVILLE, A. M., 2012, **Properties of Concrete**, 5 ed., Prentice Hall.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do Concreto-5ª Edição**. Bookman Editora, 2016.

PETRUCCI, E. **Concreto de cimento Portland**. 13. Ed. rev. São Paulo: Globo, 1995.

PETRUCCI, E. G.R. **Concreto de cimento Portland**. 13. Ed. São Paulo: Globo, 1998.

PINTO, Tarcísio de Paula. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. 1999. 189F. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 1999.

Reportagem. **Areia artificial reduz impacto ambiental de construção civil**. Jornal da Ciência, 03 de fevereiro de 2003.

RIBEIRO, Maurício M.; BARRA, Breno A.; MOREIRA, Fábio C. **Comparações entre pavimentos flexíveis e rígidos, abordando responsabilidades, aspectos técnicos e custos**. Belém, 2000.

RODRIGUES, Publio Penna Firme. **Parâmetros de Dosagem do Concreto**. ET-67. 3 ed. São Paulo: IBRACON - Associação Brasileira de Cimento Portland, 1998.

SANTANA, Ederley Nunes de. **Pavimento de concreto: a evolução das rodovias brasileiras**. 2008. 58 p. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Civil – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de Sergipe, Sergipe, 2008.

SHIMOSAKA, Tobias Jun. **Influência do teor de diferentes tipos de fibras de aço em concretos auto adensáveis**. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.

SILVA, José Eudes Marinho; CARNEIRO, Luiz Antônio Vieira. **Pavimentos de Concreto: Histórico, Tipos e Modelos de Fadiga**. 2014. 20 f. Seção de Engenharia de Fortificação e Construção, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro – RJ, 2014.

SILVA, L. S.; DEMETRIO, J. C. C.; DEMETRIO, F. J. C. **Concreto Sustentável: Substituição da Areia Natural por Pó de Brita para Confecção de Concreto Simples**. Universidade Estadual do Maranhão, UEMA, São Luís-MA, 2015.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO – SNIC **50 anos: História do cimento no Brasil**. Rio de Janeiro: SNIC, 2003.

TAYLOR, Gordon & PATTEN, Jeff. **Effects of Pavement Structure on Vehicle Fuel Consumption**. Centre for Surface Transportation Technology (CSTT), National Research Council of Canada (NRC). Ontario, Canadá, 2006.

VASCONCELLOS, J. M. C. **Fundamentos da dosagem racional dos concretos**. Palestra proferida durante a sessão da Seção regional de Pernambuco do IBRACON em 30/11/1997, São Paulo.

VIEIRA, Marcelo Dadamo. **Avaliação do uso de fibras de aço corrugado junto a matriz do concreto**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, 2014.

WATANABE, P. S. **Concretos especiais: propriedades, materiais e aplicações**. Bauru, 2008. 192f. Relatório final de pesquisa (Bolsa de Iniciação Científica FAPESP) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2008.

WILLIAMSON, G. R. **The effect of steel fibers on the compressive strength of concrete**. **Fiber Reinforced Concrete**, American Concrete Institute, Detroit, MI, 1974, p.195-207. (ACI SP-44).

WEIDMANN D. F., 2008, **Contribuição ao Estudo da Influência da Forma e da Composição Granulométrica de Agregados Miúdos de Britagem nas Propriedades do**

Concreto de Cimento Portland, Tese de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 273 p.