

**FACULDADE DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS – FATECS
CURSO: ENGENHARIA CIVIL**

FILIFE DE OLIVEIRA CURVO

MATRÍCULA: 2096640/3

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA/ECONÔMICA DA
UTILIZAÇÃO DE RCD COMO AGREGADOS APLICADOS A
PAVIMENTOS RÍGIDOS**

FILIPPE DE OLIVEIRA CURVO

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA/ECONÔMICA DA
UTILIZAÇÃO DE RCD COMO AGREGADOS APLICADOS A
PAVIMENTOS RÍGIDOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
(TCC) apresentado como um dos
requisitos para a conclusão do curso
de Engenharia Civil do UniCEUB -
Centro Universitário de Brasília

Orientador: Maruska Tatiana N. S.
Bueno, D.Sc.

Brasília
2014

FILIPPE DE OLIVEIRA CURVO

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA/ECONÔMICA DA
UTILIZAÇÃO DE RCD COMO AGREGADOS APLICADOS A
PAVIMENTOS RÍGIDOS**

Trabalho de Conclusão Curso (TCC)
apresentado como um dos requisitos
para a conclusão do curso de
Engenharia Civil do UniCEUB - Centro
Universitário de Brasília

Orientador: Maruska Tatiana N. S.
Bueno, D.Sc

Brasília, 24 de Junho de 2014.

Banca Examinadora

Eng^a. Civil: Maruska Tatiana N. S. Bueno, D.Sc
Orientadora

Eng^o. Civil: Jairo Furtado Nogueira, M.Sc.
Examinador Interno

Eng^o. Civil: Luiz Heleno Albuquerque Filho, D.Sc
Examinador Externo

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, evitando qualquer esquecimento, agradeço a todos que ajudaram, de maneira direta ou indireta, no desenvolvimento da pesquisa, e:

À professora Maruska Tatiana Nascimento da Silva pela orientação no trabalho e por se colocar a disposição para eventuais esclarecimentos;

Ao técnico do laboratório de materiais de construção do UniCeub, Vanilson por ajudar nos ensaios realizados;

À empresa Areia Bela Vista, por fornecer o material reciclado para o estudo de viabilidade técnica;

À empresa Engemix pelo fornecimento dos materiais convencionais para a confecção do concreto convencional.

À todos os meus colegas de curso que me acompanharam durante toda a graduação e, em especial, aos colegas Guilherme Borsato, Raíra Michahelles, Patrícia Freitas, entre outros que estiveram comigo durante o curso;

Ao futuro colega de profissão Darley, que ajudou-me nos ensaios realizados nesta pesquisa, comparando resultados;

À Família por todo apoio e incentivo que tive durante toda a graduação;

Aos amigos por me ajudarem, mesmo que de forma indireta, no desenvolvimento do trabalho;

E, em especial, ao Vinícius Resende, por toda a orientação e ajuda, além do incentivo para o desenvolvimento do projeto.

RESUMO

Tendo em vista o grande avanço na área da construção civil e o número elevado da geração de resíduos deste setor, o trabalho a seguir propõe a reutilização desses resíduos de forma a amenizar os impactos causados pela não destinação dos mesmos. Uma das formas da reutilização é como agregados reciclados para confecção de um novo concreto. Sendo assim, os resíduos que interessam na pesquisa são os ditos “cinzas”, provenientes de demolição das estruturas de concreto armado. Propõe-se a utilização destes agregados reciclados na confecção de um traço aplicado a pavimentos rígidos, tendo em vista os benefícios deste tipo de pavimento quando comparado ao pavimento flexível, inclusive benefícios voltados à sustentabilidade, como a maior autonomia dos veículos. Com essa especificidade, serão analisados os traços criados por NOGUEIRA (2013) e MEDEIROS (2014) verificando se todos os requisitos para a utilização de RCD como agregado é viável. Constatou-se que as principais características são sim atendidas, como, por exemplo, a resistência à tração na compressão, que chegou aos 4,83 MPa, enquanto o que normalmente é solicitado em projeto é a resistência de 4 ou 4,5 MPa. Para a análise de viabilidade financeira, uma composição retirada do Sistema de Custos Rodoviários do DNIT e os preços dos agregados miúdo e graúdo foram substituídos pelos preços dos agregados, e o resultado foi o aumento de 2,42%, o que não impede a sua utilização, tendo em vista os benefícios que sua utilização traria. Evidentemente se faz necessário a criação de um traço próprio para pavimentos rígidos para que, não só as resistências, mas também outros parâmetros como o abatimento e o teor de cimento sejam atendidos conforme as normas regentes deste tipo de pavimento.

Palavras-chave: Concreto. RCD. Pavimento Rígido. Sustentabilidade.

ABSTRACT

In view of the great advances in the construction and the large number of waste generation in this sector, the following work proposes the reuse of such wastes so as to mitigate the impacts caused by the non-allocation thereof. One form of reuse is recycled as aggregate for making a new concrete. Thus, the residues that are interested in the research said "ashes", from demolition of reinforced concrete structures. Proposes the use of recycled aggregates in making a stroke applied to rigid pavements, considering the benefits of this type of flooring when compared to flexible pavement, including benefits focused on sustainability, such as greater autonomy for vehicles. With this specificity, the traces created by NOGUEIRA (2013) and MEDEIROS (2014) verifying that all requirements for the use of the RCD is feasible as aggregate will be analyzed. It was found that the main features are answered yes, for example, the tensile strength in compression, which reached 4.83 MPa, while what is usually requested in design is the resistance of 4 or 4.5 MPa. For the financial feasibility analysis, a composition withdrawn from the Road System DNIT costs and prices of fine and coarse aggregates were replaced by the prices of aggregates, and the result was an increase of 2.42%, which does not prevent its use in view of the benefits that their use would bring. Of course creating a dash for hard to own that not only resistance but also other parameters such as the reduction and cement content are met according to the regents this type of flooring floors standards is required.

Keywords: Concrete. Aggregates. Sustainability.

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Esquema de distribuição de esforços - pavimento rígido x flexível.....	6
Figura 2. Localização Areia Bela Vista.....	27
Figura 3. Triturador de pequena capacidade	28
Figura 4. Peneiras utilizadas na análise granulométrica	30
Figura 5. Esquema de ensaio de resistência à tração na flexão	36
Figura 6. Seções transversais do pavimento do Setor Policial	38
Figura 7. Granulometria do RCD em brita.....	40
Figura 8. Granulometria da areia reciclada	41
Figura 9. Frasco de Chapman	45

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Granulometria agregado graúdo	11
Tabela 2. Zonas de determinação dos agregados miúdos.....	12
Tabela 3. Características que necessitam de controle tecnológico	15
Tabela 4. Massa mínima para análise granulométrica	29
Tabela 5. Peneiras séries normal e intermediária	30
Tabela 6. Massa mínima para realização de ensaio de determinação de material fino	32
Tabela 7. Massa mínima dos intervalos granulométricos - Teor de Argila em Torrões.....	32
Tabela 8. Aberturas para peneiramento via úmida.....	33
Tabela 9. Dimensões mínimas para determinação da massa unitária solta seca.....	34
Tabela 10. Massa mínima da amostra - índice de forma.....	35
Tabela 11. Custo dos materiais por m ³ de concreto.....	38
Tabela 12. Limites de utilização do agregado miúdo em traços de concreto.....	42
Tabela 13. Resultados absorção de água.....	43
Tabela 14. Determinação índice de forma	44
Tabela 15. Determinação massa unitária solta seca	44
Tabela 16. Correlação para determinação da tração na flexão	47
Tabela 17. Custo de materiais por m ³ de concreto.....	48
Tabela 18. Custo de materiais por m ³ de concreto reciclado.....	49

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 1. Determinação massa específica por frasco de chapman	34
Equação 2. Equação para determinação do índice de forma - paquímetro	35
Equação 3. Relação entre F_{ct} e F_{ck}	37
Equação 4. Relação entre F_{ct} e $F_{ct,f}$	37
Equação 5. Determinação massa específica por frasco de chapman	46
Equação 6. Relação entre F_{ct} e F_{ck}	46
Equação 7. Relação entre F_{ct} e $F_{ct,f}$	46

ÍNDICE DE SIMBOLOS

Fck	Resistência a compressão axial
Fct,f	Resistência a tração na flexão
MPa	Mega Pascal
CO2	Dióxido de Carbono
Kg.....	Quilograma
mm	Milímetro
cm.....	Centímetro
m.....	Metro
%	Por cento
R\$	Reais

ÍNDICE DE ABREVIações

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
RCD	Resíduo da Construção e Demolição
EUA	Estados Unidos da América
CAD	Concreto de Alto Desempenho
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
NBR	Norma Brasileira
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
NM	Norma Mercosur
SICRO	Sistema de Custos Rodoviários
ARI	Alta Resistência Inicial

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2.OBJETIVOS.....	3
2.1. Objetivo geral.....	3
2.2. Objetivos específicos	3
3.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1. Breve histórico do pavimento rígido no Brasil e no mundo.....	4
3.2. Características e benefícios do pavimento rígido.....	6
3.3. Estudo do concreto aplicado a pavimentos rígidos	7
3.4. Estudos dos traços aplicados a pavimentos rígidos	9
3.5. Ensaio de caracterização do concreto e seus componentes	9
3.5.1.Cimento portland.....	10
3.5.2.Agregado graúdo	10
3.5.3.Agregado miúdo.....	12
3.5.4.Água	13
3.5.5.Aditivos	13
3.6. Controle tecnológico	14
3.7. Conceito de sustentabilidade	16
3.7.1.Resíduos da construção e demolição	17
3.7.1.1.RCD – Classe A.....	17
3.7.1.2.RCD – Classe B.....	18
3.7.1.3.RCD – Classe C.....	18
3.7.1.4.RCD – Classe D.....	18
3.8. Concreto com agregados reciclados.....	19
3.8.1.Reação álcali-agregado	20
3.8.2.Consistência do concreto com agregado reciclado	21
3.8.3.Resistência a compressão do concreto com agregado reciclado	22
3.8.4.Módulo de elasticidade do concreto com agregado reciclado	23
3.8.5.Durabilidade do concreto com agregado reciclado.....	24
4.METODOLOGIA	26
4.1. Materiais	26
4.1.1.Caracterização dos materiais e do concreto	28
4.1.1.1.Análise granulométrica.....	29
4.1.1.2.Absorção de Água	31
4.1.1.3.Determinação do material fino	31
4.1.1.4.Teor de argila em torrões e materiais friáveis.....	32
4.1.1.5.Determinação da massa unitária solta seca.....	33
4.1.1.6.Determinação da massa específica por frasco de chapman	34
4.1.1.7.Determinação do índice de forma pelo método de paquímetro	35
4.1.1.8.Determinação da resistência à tração na flexão.....	36
4.2. Projeto de pavimento rígido para a análise de viabilidade econômica.....	37
5.APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	39

5.1. Análise granulométrica.....	39
5.2. Absorção de água.....	42
5.3. Índice de forma pelo método do paquímetro	43
5.4. Massa unitária solta seca.....	44
5.5. Determinação da massa específica por meio do frasco de chapman.....	45
5.6. Resistência à tração na flexão	46
5.7. Análise econômica da utilização de RCD como agregado	48
6. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	50

1. INTRODUÇÃO

Tendo em vista o amplo sentido da sustentabilidade, o qual diz que deve-se conciliar aspectos sociais, econômicos e ambientais, quando aplicamos esse conceito, esses aspectos devem ser analisados e atendidos. (AGOPYAN e JOHN, 2011)

A estrutura de um pavimento consiste em: subleito, camada de regularização, reforço do subleito, sub-base, base e revestimento. A diferença básica entre os dois principais tipos de pavimentos, flexíveis e rígidos, é que no primeiro os esforços são absorvidos praticamente por igual por todas as camadas constituintes do pavimento e todas essas sofrem deformação. No pavimento rígido, devido à alta resistência de seu revestimento, os esforços são absorvidos quase integralmente por esta camada. (BIANCHI E BRITO, 2008)

Por ter seus esforços absorvidos pelo seu revestimento, na maioria dos casos, a utilização do pavimento rígido diminui o número de manutenções e operações tapa-buracos, sua utilização no lugar do pavimento flexível faz com que o quesito ambiental seja atendido, tendo em vista que essa diminuição acarreta uma diminuição em congestionamentos e, conseqüentemente, na emissão de CO². Com a utilização de resíduos da construção e demolição, o quesito ambiental estaria perfeitamente atendido.

A utilização dos RCD ainda não ultrapassa o âmbito técnico-científico, fazendo com que a reciclagem desses materiais ainda não ocorra em proporções que trariam maiores benefícios. (VIEIRA e MOLIN, 2004)

Tendo em vista que as propriedades exatas dos agregados reciclados não são conhecidas, diferentemente dos agregados convencionalmente usados, é elementar que o produto final também apresenta variabilidades em algumas de suas propriedades. O conhecimento dessas propriedades é tão importante quanto o conhecimento das propriedades do agregado, tendo em vista que é a partir do entendimento das relações existentes entre esses dados que se pode proporcionar a forma mais adequada e confiável de utilizar um produto com agregados reciclados. (TENÓRIO, 2007)

Para atingir o parâmetro econômico da sustentabilidade, deve-se estudar o quanto diferente são os valores da utilização de um concreto convencional e reciclado. Caso o valor por m³ de concreto reciclado seja muito mais alto que do concreto convencional, a utilização de RCD como agregado não seria viável. Ou seja, para seguir, rigorosamente, o conceito de sustentabilidade, esse valor não deve ser muito maior que o preço por m³ de um concreto convencional.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é estudar a viabilidade técnica da utilização de um concreto sustentável para a utilização em pavimentos rígidos, e ainda criar um comparativo de custo entre um traço convencional e um sustentável aplicado a uma obra real com pavimento rígido.

2.2. Objetivos específicos

Este trabalho apresenta os seguintes objetivos específicos:

- Apresentar alguns benefícios do pavimento rígido em comparação ao flexível;
- Caracterizar o RCD de acordo com as normas técnicas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas);
- Analisar o traço de concreto sustentável obtido por meio de estudos, além de observar a possibilidade de sua utilização em pavimentos rígidos;
- Analisar o custo por m³ do concreto sustentável e compará-lo ao de um concreto convencional;
- Analisar os benefícios técnicos e econômicos do concreto sustentável aplicado especificamente no projeto de pavimento rígido do Setor Policial de Brasília-DF para uma verificação real de aplicação em obra.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Breve histórico do pavimento rígido no Brasil e no mundo

Entende-se por pavimento uma estrutura construída após a terraplenagem com o objetivo de resistir e distribuir os esforços verticais produzidos pela fadiga, melhorar as condições de rolamento no ponto de vista de conforto e segurança, e resistir aos esforços horizontais nele causados, tornando o pavimento mais durável.

Com origem em Bellafontaine, Ohio, esse tipo de pavimentação conquistou parte do mercado internacional, sendo utilizado em diversos países do mundo.

Iniciando pela Europa, nota-se a presença do pavimento rígido em países como Alemanha e Itália. Esse, segundo Balbo (2009), entre 1934 e 1940, tinha como objetivo a execução de 6,4 mil km de pavimento rígido, sendo que foram executados cerca de 1,6 mil km. Alguns trechos que merecem destaque são: Munich-Stuttgart; Stuttgart-Frankfurt; Frankfurt-Dortmund, entre outros. Na década em estudo o pavimento rígido alemão apresentava algumas particularidades, tais como:

- Sua base era construída com areia branca fina ou pedregulho bastante arenoso, com 20cm de espessura e compactados;
- Suas placas apresentavam espessuras de 20cm ou 25cm, sendo que nos acostamentos essas espessuras eram de 18cm e eram recobertas com 7cm de revestimento em mistura asfáltica, tendo em vista o contraste com a faixa de rolamento;
- Concreto apresentava abatimento zero (concreto seco);
- Consumo de cimento entre 300 e 350kg/m³;
- Resistência a compressão axial igual a 40Mpa, em média.

A Suíça também foi uma grande escola quanto a esse tipo de pavimentação. Há indícios e fontes que afirmam que a primeira estrada em pavimento de concreto construída na Suíça teria sido em 1909 (em Rorschach) e estaria em funcionamento até a década de 60. O Sucesso da durabilidade dessas rodovias deve-se à combinação de alguns fatores como o rigoroso controle de qualidade realizado e a manutenção periódica das estradas ao longo de sua utilização. Até 1964 haviam

sido executados na Suíça cerca de 9 milhões de metros quadrados de estradas em pavimento rígido.

Também tendo suas particularidades, o pavimento de concreto na Suíça possuía, até meados de 1960, as seguintes características:

- Base em mistura cimentada de pedregulhos graduados e consumo de cimento de 80 a 100kg/m³;
- Utilizavam-se Aditivos Incorporadores de Ar para o controle de sais de degelo;
- Consumo de cimento aproximadamente igual a 350kg/m³;e
- Resistência a Tração na Flexão: 4MPa na 1ª. Camada e 5MPa na 2ª. Camada.

Um dos maiores utilizadores desse tipo do pavimento rígido, os Estados Unidos tinha executado até o ano de 1925 cerca de 70 mil km de rodovias em concreto, um número consideravelmente alto em comparação com os de países europeus e até mesmo o Brasil. Em 1999 a Associação Rodoviária apontava a porcentagem, em extensão de rodovias, de 20% em concreto nos EUA.

Também utilizado no Brasil, esse tipo de pavimento vem em crescente no mercado nacional. Utilizado, também, em mercados cativos, como Pátios de aeroportos, pátios portuários, etc., a primeira estrada de concreto foi executada entre Riacho Grande e Cubatão, no período de 1925 a 1926, com uma extensão de aproximadamente 8km. Outros exemplos que merecem destaques são a estrada da Serra Petrópolis, no Rio de Janeiro, com uma extensão de 23km, sendo ela integralmente em concreto e executada a partir do ano de 1927. Além desta, destaca-se a BR-232 entre Recife e Caruaru, com extensão de aproximadamente 120km, que teve início das obras em 1938. (BALBO,2009)

A primeira autoestrada brasileira teve sua execução iniciada em 22 de abril de 1939, em concreto, ligando São Paulo à Baixada Santista, num trecho de 62km, inteira em pista dupla, com 6m de largura cada. No início, tentou-se utilizar a tecnologia utilizada na Alemanha, com placas de 20cm de espessura sobre base de areia compactada, sendo que as Barras de Transferência entre as placas seriam substituídas por vigotas de concreto devido à escassez de aço. Porém, não estudaram suficientemente as condições e particularidades do local, como a

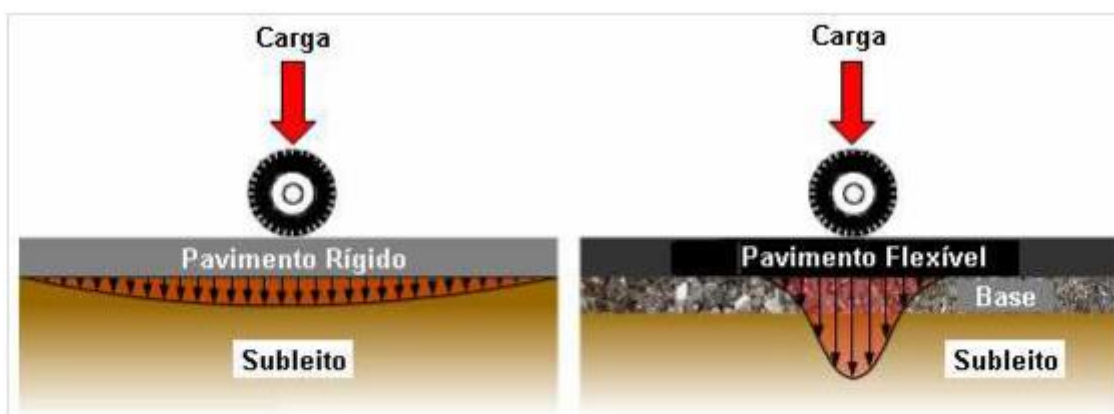
declividade, índices pluviométricos e drenagem. Sendo assim, após 6 meses do término da obra, as placas começaram a apresentar rupturas transversais devido aos fatores citados que fizeram que a camada de base de areia fosse rapidamente lavada e carregada. Até hoje as placas originais encontram-se sobre espessas camadas de mistura asfáltica que cobriram o pavimento original. (BALBO, 2009)

3.2. Características e benefícios do pavimento rígido

A estrutura de um pavimento consiste em: subleito (terreno natural), camada de regularização (que corrige erros do subleito), reforço do subleito (quando necessário), sub-base (camada complementar), base (suporte estrutural) e revestimento (capa de rolamento). A diferença básica entre os dois principais tipos de pavimentos, flexíveis e rígidos, é que no primeiro os esforços são absorvidos praticamente por igual por todas as camadas constituintes do pavimento e todas essas sofrem deformação. No pavimento rígido, devido à alta resistência de seu revestimento, os esforços são absorvidos quase integralmente por esta camada. (BIANCHI E BRITO, 2008)

A Figura 1 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta as distribuições de esforços nas fundações dos pavimentos rígidos e flexíveis, respectivamente.

Figura 1. Esquema de distribuição de esforços - pavimento rígido x flexível



Fonte: <http://edificacoes13.blogspot.com.br>

O pavimento de concreto vem conquistando importância dentre os sistemas de transportes terrestres, infraestrutura e mobilidade urbana. Tudo isso por ter qualidades importantes.

Inicialmente, por se tratar de um produto impermeável, o pavimento rígido requer uma manutenção em maiores intervalos de tempo e menor demanda de operações tapa-buracos causados por chuvas, diferentemente do pavimento flexível. Em meio urbano essa baixa necessidade de manutenção e operações corretivas diminui o congestionamento e, portanto, a emissão de CO² para atmosfera, proveniente dos automóveis parados, o que acarreta uma redução do efeito estufa, fazendo com que a utilização deste tipo de pavimento enquadre-se nos conceitos de sustentabilidade.

O pavimento rígido, também, causa um menor desgaste do automóvel além de trazer segurança para o usuário, tendo em vista que esse tipo de pavimento reduz a ocorrência de aquaplanagem, fenômeno da falta de contato entre os pneus e a pista quando se passa por uma lâmina de água ou fluido.

3.3. Estudo do concreto aplicado a pavimentos rígidos

Durabilidade e resistência são as principais características que o pavimento rígido apresenta como qualidade. Com uma vida útil de até três vezes maior que a do pavimento flexível, o pavimento rígido torna-se uma opção viável no ramo. Para isso, o concreto utilizado na sua execução deve apresentar uma variação volumétrica abaixo do normal e uma trabalhabilidade que permita o equipamento espalhar, adensar e dar o acabamento adequado ao pavimento. Um consumo de cimento maior ou igual a 320 kg/m³ é essencial para garantir a maior durabilidade do concreto.

O concreto utilizado deve apresentar resistência característica à tração na flexão definida no projeto, que é igual a aproximadamente 4,5MPa, ou, no caso de pavimentos estruturalmente armados, uma resistência à compressão axial de, aproximadamente 30MPa. Esses valores dependem das especificações de projeto.

Os concretos de alto desempenho (CAD), denominados assim por apresentarem vantagens com relação ao concreto convencional. Vantagens estas, pois, em sua composição, empregam-se, geralmente, cimentos de maior finura e adições minerais, o que aumenta a impermeabilidade do concreto e, conseqüentemente, sua durabilidade. Essas adições minerais são materiais silicosos finamente moídos, adicionados ao concreto em quantidades relativamente grandes, geralmente na faixa de 20,0 a 100,0% da massa de cimento Portland. (MEHTA, 1994)

A Sílica ativa, mineral mais comum a ser adicionado ao concreto de alto desempenho, apresenta distribuição granulométrica, comparando ao cimento Portland, duas ordens de grandeza mais finas. Sendo assim, a sílica ativa preenche os vazios da zona de transição do material cimentício/agregado. Ao mesmo tempo reage com a água e a portlandita disponível, aumentando a resistência do concreto. (TÉCHNE, 2002)

Esse mineral também, conjuntamente com um agente redutor de água, é capaz de produzir elevadas resistências, tanto nos primeiros dias, quanto nas idades elevadas. Isso se dá devido uma ligeira aceleração na hidratação do cimento e pela reação pozolânica.

Os principais benefícios do emprego de adições minerais no concreto incluem melhora da resistência à fissuração térmica devido ao calor de hidratação mais baixo, aumento das resistências e da impermeabilidade por refinamento dos poros, e uma durabilidade maior ataques químicos. (DO NASCIMENTO SILVA, 2010)

Aplicados a pavimentos rígidos, o uso do CAD foi motivado pela possibilidade de elaboração de misturas que ocasionassem uma rápida liberação do tráfego, com uso de cimento de acelerado ganho de resistência. Tendo em vista que a espera do ganho de resistência sempre foi tida como um empecilho para a escolha do pavimento de concreto. Outro fator que favorece a utilização do CAD é a resistência à tração na flexão, sendo muito superior do que os convencionais 4,5Mpa, o que possibilita menores espessuras da placa de concreto.

Independente do concreto utilizado neste pavimento é fundamental o estudo do traço, onde é visto o conteúdo de água, o tipo de cimento a ser utilizado, bem como sua eficácia, e outros pontos como o método de cura, aditivos utilizados e a temperatura dos materiais componentes. O estudo e a escolha adequada dos materiais permitem, finalmente, a verificação do concreto em seu estado fresco e endurecido.

3.4. Estudos dos traços aplicados a pavimentos rígidos

Existem muitos métodos para obter um traço do concreto que atenda aos requisitos de resistência, trabalhabilidade, durabilidade e, até mesmo, economia. Nesses métodos, aspectos como forma de transporte, lançamento e adensamento são levados em consideração para que se obtenha o produto ideal.

Por ter-se uma alta variabilidade dos materiais empregados em diferentes regiões, não se devem generalizar esses métodos para escolha do traço. Sendo assim, um traço obtido em certo local necessitará de correções para ter o mesmo resultado técnico de outro local.

Para obter um traço apropriado para execução de pavimento rígido, observa-se que os principais aspectos para sua definição são a relação água-cimento; o teor de argamassa e o teor de água, que refletem na durabilidade, resistência e trabalhabilidade da mistura final.

Geralmente, um pavimento de concreto simples executado com formas fixas, considerando a limitação da dimensão máxima característica do agregado em 50mm e o Slump em 7cm, constatou-se na maioria dos casos que o teor de argamassa varia de 44% a 50% e o teor de água ficando entre 7,5% e 8,5%.

3.5. Ensaio de caracterização do concreto e seus componentes

Além da necessidade do traço, para que se obtenha um produto indicado para realização de pavimento rígido, devem-se ensaiar os materiais constituintes do concreto e utilizar somente os que forem considerados satisfatórios, seguindo as

normas regentes. A Norma DNIT054/2004 – Estudos de Traços de Concreto e Ensaio de Caracterização de Materiais determina quais ensaios devem ser realizados para a caracterização de cada um dos componentes do concreto.

Estes ensaios são realizados em fontes que, pressupõe-se, terem sido analisadas em ensaios de caracterização de material e foram consideradas adequadas.

3.5.1. Cimento portland

Cimento Portland pode ser definido como um pó de característica aglomerante, que endurece quando misturado com água. É composto por clínquer e adições, que são misturadas ao clínquer na sua fase de moagem. São essas adições que definem os tipos de cimento. Na forma de concreto, este material torna-se uma pedra artificial de formas e volumes que variam de acordo com a necessidade da obra. (DNIT, 2005)

Por possuir tais características, a sua mistura com agregados e água, compõem o concreto, que é o produto mais consumido na área da construção civil.

Para o Cimento Portland os seguintes ensaios devem ser realizados:

- Finura na Peneira Nº200 (NBR 11579);
- Área Blaine (NBR NM 76);
- Tempo de Pega (NBR 11581);
- Resistência à Compressão (NBR 7215).

3.5.2. Agregado graúdo

Os agregados graúdos são materiais granulares sem forma e volume definidos. Podem ser as pedras britadas ou cascalhos. A NBR 7211:2009 define como agregado graúdo o pedregulho, britas provenientes de rocha ou a mistura de ambos que passam pela peneira de 152mm e são retidos na peneira de 4,8mm, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1. Granulometria agregado graúdo

Graduação	Porcentagem retida acumulada, em peso, nas peneiras de abertura nominal, em mm, de												
	152	76	64	50	38	32	25	19	12,5	9,5	6,3	4,8	2,4
0	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0-10	-	80-100	95-100
1	-	-	-	-	-	-	0	0-10	-	80-100	92-100	95-100	-
2	-	-	-	-	-	0	0-25	75-100	90-100	95-100	-	-	-
3	-	-	-	0	0-30	75-100	87-100	95-100	-	-	-	-	-
4	-	0	0-30	75-100	90-100	95-100	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: NBR 7211:2009.

Para os agregados graúdos, a NBR 7211:2009 define que, para concretos cuja aparência é importante, limite máximo de torrões de argila e materiais friáveis, em porcentagem, deve ser igual a 1,0. Em concretos submetidos a desgastes superficiais, esse limite é igual a 2,0. E nos demais casos, igual a 3,0. Ainda regido pela NBR 7211, o teor de material pulverulento não deve ser maior que 1,0. O índice de forma dos grãos não deve ser superior a 3. E o Abrasão Los Angeles deve ser inferior a 50%.

Esses agregados são obtidos de materiais rochosos diversos, podendo ser consolidados ou granulares, fragmentados naturalmente ou industrialmente.

No caso do agregado graúdo, os ensaios necessários para sua aplicação e controle em pavimentos rígidos são:

- Análise Granulométrica e Módulo de Finura (NBR 7217);
- Teor de Argila em Torrões e Materiais Friáveis (NBR 7218);
- Teor de Materiais Pulverulentos (NBR 7219);
- Massa unitária solta seca (NBR 7251);
- Absorção de Água e Massa Específica (NBR 9937);
- Determinação do Índice de Forma pelo Método do Paquímetro (NBR 7809);
- Determinação de Abrasão de Los Angeles (NBR NM 51).

3.5.3. Agregado miúdo

Assim como os agregados graúdos, os miúdos também são materiais granulares sem forma e volume definidos. Podem ser produtos da moagem de rocha ou obtidos em sua forma natural. A NBR 7211 define como agregado miúdo todos os materiais, naturais ou produtos da moagem, que passam pela peneira 4,8mm e ficam retidos na peneira 0,075mm, como mostrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, sendo que seu módulo de finura, cuja granulometria cumpre qualquer uma das zonas indicadas na Tabela 2 não deve variar mais que 0,2 para o material de mesma origem.

Tabela 2. Zonas de determinação dos agregados miúdos

Peneira ABNT	Porcentagem, em peso, retida acumulada na peneira ABNT, para a			
	Zona 1 (Muito fina)	Zona 2 (Fina)	Zona 3 (Média)	Zona 4 (Grossa)
9,5mm	0	0	0	0
6,3mm	0 a 3	0 a 7	0 a 7	0 a 7
4,8mm	0 a 5	0 a 10	0 a 11	0 a 12
2,4mm	0 a 5	0 a 15	0 a 25	5 a 40
1,2mm	0 a 10	0 a 25	10 a 45	30 a 70
0,6mm	0 a 20	21 a 40	41 a 65	66 a 85
0,3mm	50 a 85	60 a 88	70 a 92	80 a 95
0,15mm	85 a 100	90 a 100	90 a 100	90 a 100

Fonte: NBR 7211:2009.

No caso dos agregados miúdos, as faixas de utilização, baseadas na NBR 7211:2009, também, são que sua granulometria deve obedecer a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, sendo que seu módulo de finura, cuja granulometria cumpre qualquer uma das zonas indicadas na tabela citada, não deve variar em mais do que 0,2 para o material de mesma origem. O limite máximo, em porcentagem, de torrões de argila e materiais friáveis é de 1,5. O índice máximo de materiais pulverulentos, em concretos submetidos a desgastes superficiais, é 3,0 e nos demais concretos 5,0.

Aplicáveis ao agregado miúdo, os seguintes ensaios se fazem necessários:

- Análise Granulométrica e Módulo de Finura (NBR 7217);
- Teor de Argila em Torrões e Materiais Friáveis (NBR 7218);
- Teor de Materiais Pulverulentos (NBR 7219);
- Impurezas Orgânicas Húmicas (NBR NM 49);
- Massa unitária solta seca (NBR 7251);
- Massa Específica por meio do Frasco de Chapman (NBR 9776);
- Absorção de Água (NBR NM 30);
- Determinação de teor de partículas leves (NBR 9936);
- Determinação do Teor de Cloretos e Sulfatos Solúveis (NBR 9917).

3.5.4. Água

Fundamental devido a sua reação com o cimento, tornando-o um ligante que adquire resistência ao passar dos dias, quase todos os tipos de água podem ser utilizados no traço do concreto, com exceção da água do mar, pelo grande teor de sal presente na mesma. Quando se utiliza água de rejeitos industriais alguns cuidados são necessários para a utilização desta.

O teor de água no concreto é medido pelo fator água-cimento. Isso tendo em vista que esses materiais são fatores determinantes da trabalhabilidade e resistência do produto final, o concreto.

Para a obtenção do traço ideal, devem-se realizar os seguintes ensaios para a Água utilizada:

- Água para Amassamento de Concreto – Ensaio Comparativos (DNIT 037/2004-ME);
- Água para Amassamento de Concreto – Ensaio Químicos (DNIT 036/2004-ME).

3.5.5. Aditivos

Aditivos são produtos não plenamente indispensáveis à mistura do concreto, mas que quando inserida nela geram alguma característica ao concreto ou reforça uma já existente. Os principais aditivos utilizados são os de retardadores ou

aceleradores de pega, impermeabilizantes, plastificantes, para ganho de resistência inicial, entre outros.

Por se tratarem de produtos não essenciais para a finalidade, os aditivos devem ser utilizados seguindo a risca as recomendações dos fornecedores, tendo em vista que seu uso indiscriminado pode causar alguma alteração nas características do concreto.

No caso dos aditivos, os ensaios são:

- Ensaio de Verificação da Uniformidade e Equivalência (NBR 10908);
- Aditivos para Concreto – Verificação do Desempenho (NBR 12317).

3.6. Controle tecnológico

Os concretos necessitam de um rigoroso controle tecnológico para que seu desempenho seja satisfatório quando aplicado a um revestimento ou bases de pavimento. Tendo em vista que o seu comportamento aplicado a pavimentos rígidos não se restringe a resistência em projeto, a não realização de alguns ensaios podem ocasionar falhas funcionais ou estruturais do concreto, algumas podendo ser evidenciadas precocemente. A Tabela 3 explicitada por Balbo (2009) apresenta as características vinculadas aos concretos de pavimentos que exigem esses controles.

Tabela 3. Características que necessitam de controle tecnológico

Estado do concreto	Características	Motivo de Controle	Consequências deletérias possíveis
Fresco	Trabalhabilidade	Compatibilidade com o processo construtivo	Inúmeras imperfeições estruturais e mesmo geométricas
	Segregação/exsudação	Qualidade superficial	Lamelação, textura inadequada
	Retração plástica	Evitar fissuras de superfície	Degradação estrutural
Endurecido	Retração de secagem	Evitar fissuras de contração não programadas	Ruptura precoce
	Resistência estática	Adequação ao projeto estrutural	Ruptura precoce
	Módulo de elasticidade	Adequação ao projeto estrutural	Estados de tensão não previstos
	Resistência à fadiga	Adequação ao projeto estrutural	Ruptura precoce
	Porosidade/permeabilidade	Percolação de água	Empenamento higrométrico, reação álcali-agregados, corrosão de armaduras
	Expansão térmica	Efeitos relacionados a cargas ambientais	Empenamento não controlado
	Abrasividade	Qualidade superficial	Perda de qualidade funcional

Fonte: BALBO, J. T. Pavimentos de Concreto

Nem todos os controles podem ser realizados em todas as obras, por questões de tecnologia disponível, da ausência de especificação adequada ou de prazos e custos fora dos padrões da obra. Exemplificando, o ensaio de fadiga apresenta alguns contratempos que os deixam inviáveis, principalmente em obras de vias urbanas: são lentos, exigem tratamento estatístico específico, além de técnicos e equipamentos especializados. Por outro lado, esses controles tornam-se imprescindíveis para outras obras de grande porte, como autoestradas, pátios de aeroportos e longos corredores de ônibus.

Entretanto, em casos de obras com menores volumes e responsabilidades, se faz necessária, pela ausência da possibilidade de estudo aprofundado dessas características, a análise de resultados de estudos anteriores. Os riscos são menores quando se utiliza materiais componentes do concreto muito próximo aos que serão tomados como referência e para o qual existem estudos mais aprofundados. Embora empírico, reconhece-se que no atual nível de disseminação

do conhecimento sobre esse assunto no Brasil, a maioria dos requisitos tidos como fundamentais de controle ainda não tem respaldo normativo oficial (não se controlam parâmetros como módulo de elasticidade e o coeficiente de expansão térmica), ou não se tem meios tecnológicos disponíveis para tais testes. Fica claro, após isso, que não se trata de uma falta de tradição local e sim de uma disparidade tecnológica no que tange aos modernos meios de controles disponíveis no Brasil e nos países mais evoluídos no quesito tecnologia. (BALBO, 2009)

Na execução do pavimento rígido devem ser realizados os controles tecnológicos do concreto e dos seus materiais componentes. Um dos controles de maior relevância é o de resistência à tração na flexão estabelecida em projeto, devido ao grau de dificuldade dos ensaios para a obtenção desta.

Tendo em vista essa dificuldade citada, costuma-se correlacionar a resistência a tração na flexão com a resistência a compressão axial, devido a sua facilidade. Entretanto, essa correlação depende de alguns fatores, dos quais podemos destacar as características petrográficas do agregado graúdo e sua aderência com a pasta de cimento, que é fator subordinado da textura superficial, porosidade superficial, forma do agregado. Pinheiro (2004), após realização de muitos ensaios, estabeleceu correlações entre os diferentes tipos de ensaios à tração com o ensaio a compressão axial.

3.7. Conceito de sustentabilidade

Sustentabilidade é o termo que define as ações realizadas pelo homem com o objetivo de suprir suas necessidades, porém com o pensamento de garantir o mesmo para as gerações futuras. Ou seja, buscar o desenvolvimento sem agredir o meio ambiente e usando os recursos que a mesma oferece de modo que eles se mantenham para o futuro. (AGOPYAN e JOHN, 2011)

Tendo em vista que a construção civil é um dos maiores geradores de resíduos e o ramo que mais utiliza os recursos naturais, a sustentabilidade tornou-se fator chave em decisões técnicas, gerenciais e, até mesmo, políticas.

Com o objetivo de amenizar o impacto causado pela construção civil, algumas soluções começaram a ser tomadas como a reutilização dos resíduos gerados pelo ramo, de maneira que passa a ser uma solução da destinação dos resíduos, ou até mesmo inovações tecnológicas para a diminuição da emissão de CO² na fabricação do concreto.

Estuda-se e utiliza-se, também, a obtenção de traços de concreto com a utilização dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD). Estes são utilizados no lugar dos agregados graúdos. E no lugar dos miúdos, utiliza-se a areia reciclada, que é o RCD triturado em menores granulações.

3.7.1. Resíduos da construção e demolição

A resolução 307 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) define Resíduo da Construção Civil, ou Resíduo de Construção e demolição os materiais oriundos de construção, demolição ou reforma ou os resultantes da preparação e escavação de terrenos. São exemplos de RCD: tijolos, blocos cerâmicos, concreto, metais, rochas, solos, madeiras, resinas, tintas, argamassa, forros, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica, entre outros materiais que são considerados entulhos de obra. (CONAMA, 2002)

3.7.1.1. RCD – Classe A

São os resíduos que podem ser reutilizados como agregados, graúdos ou miúdos, tais como:

- De construção, demolição, reforma e reparos de pavimentação ou outras obras de infraestrutura, até mesmo solos oriundos da terraplenagem;
- De construção, demolição, reforma e reparos de edificações: materiais cerâmicos (blocos, telhas, etc.), concreto e argamassa;
- De processo de fabricação ou demolição de peças pré-moldadas de concreto (blocos, tubos, manilhas, entre outros) produzidas em canteiros de obra.

Essa classe de resíduos deve ser destinada, segundo a mesma resolução em estudo, a reutilização ou reciclagem na forma de agregados, ou encaminhados a áreas de aterros de resíduos da construção civil, sendo dispostos de modo a permitir a sua reutilização ou reciclagem futura.

3.7.1.2. RCD – Classe B

São os resíduos consideráveis recicláveis para outras destinações, como: plásticos, papéis, madeiras, metais, vidros e gesso.

A Classe B dos RCD deverão ser reutilizados, reciclados ou encaminhados a áreas de armazenamento temporário, sendo dispostos de modo a permitir a sua reutilização ou reciclagem futura.

3.7.1.3. RCD – Classe C

São resíduos para os quais não foram criadas tecnologias capazes de tratar esses materiais e os deixarem aceitáveis para sua reutilização.

Estes deverão ser armazenados, transportados e destinados em conformidade com as normas específicas.

3.7.1.4. RCD – Classe D

São resíduos perigosos que são provenientes do processo de construção. Entre esses materiais, destacam-se tintas, óleos, solventes, telhas que contenham amianto em sua composição, bem como qualquer material que seja prejudicial à saúde que forem consequências de reformas ou demolições de edifícios com determinadas utilizações.

Essa classe de RCD, seguindo o exemplo da classe C, deverá ser armazenada, transportada e destinada de acordo com a suas normas específicas.

3.8. Concreto com agregados reciclados

Por ser uma das atividades mais poluentes, cerca de 25% dos resíduos sólidos lhos são provenientes, a construção civil está numa crescente em relação à pesquisa na área de sustentabilidade, visando a redução do impacto causado pelas obras e indústrias responsáveis pelo abastecimento deste ramo. Sendo assim, a indústria do concreto, sendo o material mais utilizado, também vem adquirindo uma maturidade com relação ao impacto causado pela produção das matérias primas e obtenção do produto final. A indústria do concreto conseguiu alguns resultados significativos, conseguindo traços que necessitem de menores quantidades de materiais componentes e, até mesmo, que reduzam a emissão de CO².

Tendo em vista que a questão da preservação ambiental passou de um obstáculo para ser fundamental no desenvolvimento técnico nas soluções de projeto em geral, começou-se a buscar alternativas para que isso seja, de fato, posto em prática. Sendo a construção civil um ramo muito agressivo ao meio ambiente, justamente por ter seu material principal como um dos mais consumidos do mundo e ter, durante a produção dos seus componentes, vários aspectos prejudiciais, surgem como solução, pelo menos amenizadora do problema, a utilização dos resíduos da construção e demolição como componentes do concreto.

O RCD seria a origem dos agregados graúdos e miúdos na mistura do concreto, substituindo a areia e a brita. Para os graúdos temos a utilização de RCD Classe A em granulações semelhantes às das britas utilizadas convencionalmente nas misturas. Para os miúdos, temos os mesmos RCD Classe A, porém triturados em menores granulações.

No Brasil esse assunto não ultrapassa muito o âmbito técnico-científico. A reciclagem desses materiais ainda não ocorre em proporções que trariam grandes resultados, exceto pela intensa reciclagem das indústrias de cimento e aço. Por outro lado, é notável o aumento das discussões do que se fazer com os entulhos depositados inadequadamente, como reaproveita-los ou descartá-los. Esse tipo de discussão vem crescendo e tendo cada vez mais uma importância próxima àquela que se deve ter. (VIEIRA E MOLIN, 2004)

Por consequência do não conhecimento das propriedades exatas dos agregados reciclados, diferentemente dos agregados convencionalmente usados, é

elementar que o produto final também apresenta variabilidades em algumas de suas propriedades. O conhecimento dessas propriedades é tão importante quanto o conhecimento das propriedades do agregado, tendo em vista que é a partir do entendimento das relações existentes entre esses dados que se pode proporcionar a forma mais adequada e confiável de utilizar um produto com agregados reciclados. (TENÓRIO, 2007).

3.8.1. Reação álcali-agregado

A reação álcali-agregado é um processo químico entre alguns constituintes do agregado e hidróxidos alcalinos provenientes do cimento, água de amassamento, agregados, agentes externos, entre outros fatores, que estão dissolvidos na solução dos poros do concreto. A reação se dá na interação entre os materiais citados e pode manifestar-se de algumas maneiras, tais como:

- Expansões;
- Movimentações Diferenciais nas Peças;
- Fissuras;
- Exsudação do gel formado pela reação, com conseqüente diminuição das resistências à tração e compressão.

As reações, atualmente, são divididas em 3 tipos:

- Reação álcali-sílica: envolve a presença de sílica amorfa ou certos tipos de vidros naturais e artificiais;
- Reação álcali-silicato: é da mesma natureza da álcali-sílica, porém ocorre de maneira mais lenta, envolvendo alguns silicatos e, fundamentalmente, há a presença de quartzo deformado e minerais expansivos;
- Reação álcali-carbonato: ocorre entre calcários e as soluções alcalinas presentes nos poros do concreto.

A melhor maneira de se evitar reações dessa natureza é o estudo prévio dos agregados a serem utilizados, e, também, o estudo do conjunto agregado-

aglomerante. Porém, mesmo com a ocorrência das reações mesmo com os estudos feitos, existem métodos para diminuir as influências deletérias da reação para que a estrutura onde se teve o material aplicado não sofra maiores danos.

Tendo em vista o objetivo de se ter um concreto sustentável com a substituição dos agregados naturais pelos reciclados, esse estudo prévio torna-se imprescindível para a sua aplicação, já que o material utilizado é de pouco conhecimento tecnológico.

3.8.2. Consistência do concreto com agregado reciclado

Observa-se que a consistência do concreto com a utilização de agregados reciclados é, geralmente, menor do que o mesmo traço de um concreto convencional. Essa propriedade pode ser afetada por alguns fatores:

- Consumo de água;
- Consumo de cimento;
- Relação água/cimento, relação agregado/cimento e consumo de cimento;
- Adições;
- Aditivos;
- Agregados.

No caso dos agregados reciclados, tendo uma maior presença de grãos mais finos, a forma mais lamelar dos grãos, bem como sua textura e porosidade (que tanto aumenta a rugosidade das partículas quanto permite ao agregado absorver parte da água da mistura) prejudicam a consistência do concreto. (TENÓRIO, 2007)

Apesar de apresentarem resultados que indicam baixa consistência, os concretos com utilização de agregados reciclados mostram-se, geralmente, trabalháveis e de fácil adensamento, concordando com a constatação de Leite (2001) de que o abatimento de cone é ineficaz para avaliar consistência de concretos reciclados.

3.8.3. Resistência à compressão do concreto com agregado reciclado

Tendo em vista que a porosidade é fator determinante na resistência final do concreto, e que a substituição dos agregados “naturais” é responsável pelo aumento da porosidade na mistura, temos uma resistência do concreto reciclado, teoricamente, abaixo do convencional. Entretanto, outras propriedades do concreto reciclado mostram-se relevantes e podem compensar essa baixa resistência. Ressalta-se, ainda, que os materiais que compõem o traço é fator determinante para o grau desta porosidade.

Em seu experimento, LEITE (2001) verificou que os principais fatores determinantes na resistência do concreto são:

- Relação água x cimento;
- Teor de substituição do agregado miúdo;
- Teor de substituição do agregado graúdo;
- Idade;
- A interação entre as relações citadas.

Considerando apenas os efeitos isolados do teor de substituição do agregado miúdo e do graúdo, LEITE (2001) observou que o valor da resistência à compressão é diretamente proporcional ao primeiro fator, e inversamente proporcional ao segundo. Ou seja, se tivermos um concreto com agregado miúdo reciclado e graúdo natural, esse produto apresenta maiores taxas de crescimento entre 28 e 91 dias. Foi observado, também, que para altas relações água x cimento o uso combinado de agregados reciclados graúdos e miúdos resultou em concretos de maiores resistências, sendo o resultado final diretamente proporcional ao teor de substituição dos agregados. Este comportamento a altas relações água x cimento certamente está relacionado à porosidade dos agregados reciclados, visto que:

- O agregado reciclado pode absorver parte da água da mistura, reduzindo assim a relação água x cimento efetiva, o que pode levar ao aumento da resistência mecânica da mistura;

- A mistura, em altas relações água x cimento, pode ser tão viscosa ao ponto de conseguir penetrar nos poros do agregado, resultando numa maior aderência entre as duas fases, o que é fator benéfico para a resistência final do concreto.

3.8.4. Módulo de elasticidade do concreto com agregado reciclado

Em semelhança a resistência a compressão, o módulo de elasticidade do concreto depende da porosidade de suas fases (pasta, agregado e zona de transição). No caso da substituição dos agregados, sua dimensão máxima, forma, textura superficial, granulometria e composição mineralógica influenciam, também, no módulo de elasticidade, porém de maneira menos determinante que a porosidade, por esta estar ligada à sua rigidez e resistência.

LEITE (2001), em seu experimento, apontou que alguns fatores são influentes sobre o módulo de elasticidade. São eles:

- Relação água x cimento;
- Teor de substituição do agregado graúdo;
- Interação teor de substituição agregado graúdo x teor de substituição agregado miúdo.

Os dois primeiros os fatores de maior influência. O módulo de elasticidade teve resultado inversamente proporcional a esses dois fatores, comprovando que o aumento da porosidade das fases do concreto influencia no módulo de elasticidade, deixando seu valor reduzido.

Da mesma forma, Gómez-Soberón(2002) verificou que a diminuição do módulo de elasticidade é subordinada ao aumento da porosidade do concreto, que é produto do aumento do fator de substituição dos agregados naturais pelos reciclados.

Logo, pode-se afirmar que a porosidade é fator determinante no módulo de elasticidade e, que o uso de agregados reciclados menos porosos, ou mais densos, permite concretos menos deformáveis, com maiores módulos de elasticidades.

Nesta pesquisa escolheu-se um concreto sustentável confeccionado com materiais reciclados provenientes de estruturas (vigas, pilares e lajes) em substituição ao agregado graúdo da mistura no citado concreto.

3.8.5. Durabilidade do concreto com agregado reciclado

Entende-se por durabilidade a capacidade do concreto de resistir a qualquer processo de deterioração, seja por agentes químicos, abrasão, ou ação de intempéries. A deterioração do concreto acontece pela ação de fatores externos ou até internos ao próprio material, como no caso da diferença entre os coeficientes de dilatação térmica do agregado e da pasta de cimento hidratada.

Apesar de serem tantos os fatores que influenciam na durabilidade do concreto, este fator depende muito de como os gases e líquidos podem adentrar e movimentar em seu interior. Sendo assim, um aspecto determinante para a durabilidade é a permeabilidade do concreto, bem como a capacidade de absorção, as quais são ligadas à porosidade.

Estudar e avaliar a porosidade do concreto, com o objetivo de conhecer sua durabilidade, é avaliar o quanto os fluídos penetram em sua composição. Para isso, analisa-se a quantidade de poros, seus tamanhos, sua conectividade e como se dá o movimento dos fluídos em seu interior, ou seja, a facilidade de escoamento. Alguns ensaios permitem quantificar a porosidade do concreto, são alguns deles:

- Determinação da absorção de água;
- Determinação do índice de vazios;
- Permeabilidade aos gases e líquidos.

Mesmo com a característica de densificação e da diminuição da microfissuração em razão de seu menor módulo de elasticidade permitir uma compatibilização de sua deformação com a pasta, o que levaria uma diminuição da movimentação dos fluidos no interior do compósito, a utilização do agregado reciclado aumentariam, em teoria, a capacidade dos agentes se movimentarem em

seu interior. Isso tendo em vista a maior porosidade em relação aos agregados naturais.

Pode-se concluir que, assim como a resistência à compressão e o módulo de elasticidade, a durabilidade do concreto é fator subordinado à porosidade do mesmo, que é resultado da mesma propriedade dos agregados utilizados. Para a fabricação de um produto menos penetrável e, por consequência, mais durável, pode ser obtido por meio da redução da utilização dos agregados reciclados ou através da redução da porosidade destes.

4. METODOLOGIA

Tendo em vista atender o objetivo citado neste trabalho, serão analisados os traços obtidos por Nogueira (2013) e Medeiros (2014) e será escolhido o traço com características que mais atendam as normas vigentes que regem a execução dos pavimentos rígidos.

Nogueira (2013) procurou concretos sustentáveis que tivessem características semelhantes às de um concreto convencional. Com esse objetivo, o autor adquiriu três traços com parâmetros que atendessem a aplicação proposta.

Na sua primeira mistura procurou um concreto mole com resistência a compressão axial de 30MPa. Na segunda mistura foi encontrado, também, um resultado mole, porém com menor resistência, 25MPa. Na última proposta, Nogueira (2013) confeccionou um concreto muito mole com resistência de 25MPa. Tendo em vista que o traço buscado era para aplicação estrutural, foi escolhido o primeiro, com fck de 30MPa para a realização dos ensaios e análise de resultados. Neste trabalho, analisaremos os resultados obtidos por Nogueira (2013), porém com o intuito de utilizá-lo no pavimento rígido.

Medeiros (2014), em sua pesquisa, validou os resultados obtidos por Nogueira (2013) e aditivou o citado concreto com groute, elevando o valor do fck e garantindo os 30 MPa necessários para um projeto de pavimento rígido real. Tal projeto será avaliado por meio de uma parceria com a empresa HASAAN engenharia, que trabalha com projetos rodoviários. A citada empresa forneceu alguns dados de projeto para auxiliarem na análise dos custos finais de pavimento rígido com materiais convencionais e com RCD.

4.1.Materiais

Tendo em vista o objetivo de seu trabalho, Nogueira (2013) fez um comparativo do concreto convencional com o reciclado, tendo no convencional a utilização do Cimento Portland II, areia rosa e brita nº1. Para o concreto sustentável, houve substituição do Cimento Portland II para o III (CP III de alto-forno), e dos

agregados graúdos e miúdos, utilizando agregado graúdo reciclado com diâmetros variando de 12,5mm a 19mm e areia reciclada.

Os agregados reciclados, materiais mais importantes para os objetivos propostos, foram adquiridos por meio de doação da Areia Bela Vista, localizada em Sobradinho II, como apresentado na Figura 2. A Areia Bela Vista adquire ou recebe materiais de maneira heterogênea, sendo ela a responsável pela separação do que vai ser reaproveitado para a geração dos agregados reciclados e os materiais que têm outras destinações. Todo o processo de separação, passando pelos britadores, retirada do aço proveniente do concreto armado, e fornecimento do material são de responsabilidade da empresa.

Figura 2. Localização Areia Bela Vista



Fonte: <https://www.google.com.br/maps/>

Tendo em vista a heterogeneidade do material a ser reciclado, após a separação de tudo que não for útil, como aço proveniente do concreto armado, o material é levado ao britador de mandíbulas, onde o produto final são pedras com granulometrias menores às iniciais e areia reciclada. Após isso, o processo consiste numa esteira magnetizada para a separação do aço que ainda estava contido em

pequenas porções. Feito isso, temos um produto homogêneo a ser triturado na granulometria desejada.

Para caracterização dos agregados, a pesquisa não necessitou de uma grande quantidade. Por isso, o triturador utilizado foi um manual de menor capacidade, como mostra a Figura 3.

Figura 3. Triturador de pequena capacidade



Fonte: Acervo pessoal.

4.1.1. Caracterização dos materiais e do concreto

Com os materiais obtidos em laboratório e com o objetivo de obter-se o maior número de características possíveis, foram realizados ensaios, principalmente nos agregados reciclados seguindo as normas regentes, a fim de se conhecer da melhor maneira o material a ser utilizado no traço sustentável.

Para ter um resultado mais real e até um parâmetro comparativo, os ensaios realizados serão os mesmos, em total ou em parte, dos realizados por Nogueira (2013). Tendo em vista que o material, laboratório, métodos e equipamentos a serem adotados e seguidos nos ensaios de análise granulométrica, absorção de água e determinação de material fino são semelhantes aos utilizados por Nogueira (2013), esses parâmetros serão referenciados de sua pesquisa.

Para obter um resultado de tração na flexão, analisar-se-á os traços ensaiados por Nogueira (2013) e Medeiros(2014) para, após coletados os seus resultados de compressão axial, correlacionar esses valores como sugere. PINHEIRO (2004)

4.1.1.1. Análise granulométrica

O ensaio de análise granulométrica foi realizado tanto com o RCD como para a areia reciclada com o intuito de determinar a dimensão máxima característica e seu correspondente módulo de finura. A norma regente é a NBR 7217:1987, que determina a massa mínima para realização do ensaio, como mostra a Tabela 4.

Tabela 4. Massa mínima para análise granulométrica

Dimensão máxima característica do agregado (mm)	Massa mínima da amostra de ensaio (kg)
< 4,8	0,5
6,3	3
> 9,5 e < 25	5
32 e 38	10
50	20
64 e 76	30

Fonte: NBR 7217:1987.

O ensaio consiste no peneiramento do material em estudo nas peneiras das séries normais e intermediárias, definidas em norma como mostrado na Tabela 5**Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Tabela 5. Peneiras séries normal e intermediária

PENEIRAS	
Série normal	Série intermediária
76mm	-
-	64mm
-	50mm
38mm	-
-	32mm
-	25mm
19mm	-
-	12,5mm
9,5mm	-
-	6,3mm
4,8mm	-
2,4mm	-
1,2mm	-
0,6mm	-
0,3mm	-
0,15mm	-

Fonte: NBR 7217:1987.

Após peneiradas, é determinado a massa retida em cada uma das peneiras. Figura 4 ilustra o material utilizado, bem como as duas séries de peneiras utilizadas no ensaio.

Figura 4. Peneiras utilizadas na análise granulométrica



Fonte: Acervo pessoal

4.1.1.2. Absorção de Água

Outro ensaio realizado foi o de absorção de água, que é fundamental ao se tratar de agregados reciclados. Quando se tem agregados naturais esse ensaio não é de tanta importância, tendo em vista que os índices de absorção de água são mínimos e às vezes desprezados devido à baixa porosidade do material em estudo. Diferentemente dos agregados naturais, os RCD devem ter esse ensaio tido com importante, justamente pela alta porosidade do agregado. A realização do ensaio torna-se imprescindível por poder evitar um traço com quantidade errada de água e todas as consequências que isso pode acarretar, como diferenças na trabalhabilidade ou, até mesmo, diferença no resultado de sua resistência. A norma regente para a determinação da taxa de absorção de água do agregado é a NBR NM30:2001.

O procedimento consiste em pesar o material nas condições seca, saturada e imersa em água. Transcorrido o período de um dia, os resultados são inseridos em fórmulas pré-estabelecidas pela norma que dará as massas específicas e também a porcentagem de água que o material absorve.

4.1.1.3. Determinação do material fino

Também de suma importância, por se tratar de um material não convencional, onde a utilização de componentes reciclados podem alterar propriedades importantes do produto final, a determinação de material pulverulento é regido pela NBR NM 46:2001. Essa determinação é fundamental, pois pode alterar na absorção de água e interferir nas características finais do traço do concreto.

A determinação do material mais fino que a abertura de 75 μ m é mais eficaz quando se faz o peneiramento úmido do agregado. Portanto, para se estabelecer o a porcentagem de massa desse material presente no agregado graúdo ou miúdo, esse ensaio se faz importante, pois, junto com a análise granulométrica, tem-se um resultado mais real da quantidade de material pulverulento no agregado a ser utilizado no traço de concreto.

A norma que rege esse experimento determina como mostrado na Tabela 6, a quantidade de agregado a ser utilizado no ensaio, sendo fator determinante a dimensão máxima nominal do agregado. A partir daí, a amostra é lavada usando água, e a água com o material suspenso deve ser passado na peneira 75µm. A perda de massa do material será a quantidade de material fino presente na amostra.

Tabela 6. Massa mínima para realização de ensaio de determinação de material fino

Dimensão máxima nominal (mm)	Massa mínima (g)
2,36	100
4,75	500
9,5	1000
19	2500
37,5 ou superior	5000

Fonte: NBR NM 46:2001.

4.1.1.4. Teor de argila em torrões e materiais friáveis

Regido pela NBR 7218:2010 esse ensaio consiste em determinar o teor de argila da amostra considerando os intervalos granulométricos e as massas mínimas por intervalo a serem ensaiados, como mostra a Tabela 7.

Tabela 7. Massa mínima dos intervalos granulométricos - Teor de Argila em Torrões

Intervalos granulométricos a serem ensaiados	Massa mínima de amostra para ensaio de cada intervalo granulométrico
mm	g
≥1,18 e <4,75	200
≥4,75 e <9,5	1000
≥9,5 e <19	2000
≥19 e <37,5	3000
≥37,5	5000

Fonte: NBR 7218:2010.

Após a determinação da granulometria do material, as amostras de cada intervalo devem ser dispostas em bandejas apropriadas, formando uma camada delgada. As amostras devem ser cobertas por água destilada, deionizada ou da rede de abastecimento e devem ficar, após isso, em repouso por 24 horas.

Transcorrido o período de 24 horas, identificar as partículas com presença de torrões de argila e/ou materiais friáveis e pressioná-las entre os dedos, fazendo com que esses torrões se desfaçam. Em seguida, a massa da amostra de cada intervalo granulométrico deve ser transferida para as peneiras, conforme mostrado na Tabela 8. As amostras devem ser peneiradas via úmida para a remoção das partículas de argila e materiais friáveis, agitando com cuidado a amostra com as mãos durante o fluxo de água.

Tabela 8. Aberturas para peneiramento via úmida

Intervalos granulométricos ensaiados	Abertura das peneiras
mm	
≥1,18 e <4,75	600μm
≥4,75 e <9,5	2,36mm
≥9,5 e <19	4,75mm
≥19 e <37,5	4,75mm
≥37,5	4,75mm

Fonte: NBR 7218:2010.

Após o peneiramento, as amostras devem ser secas em estufa a temperatura de 105°C até obter uma massa constante. Após o resfriamento, o teor de argila é obtido através da fórmula apresentada em norma.

4.1.1.5. Determinação da massa unitária solta seca

A definição da Massa Unitária Solta Seca consiste, regido pela NBR 7251:1982, em se lançar o agregado em um recipiente paralelepípedo, obedecendo a Tabela 9, com uma concha ou uma pá a uma altura de 10 a 12 cm do

topo do mesmo. A superfície do agregado é alisada com uma régua, no caso dos agregados miúdos. No caso dos grãos, a superfície é regularizada de modo a compensar as saliências e reentrâncias das pedras. Feito isso, o recipiente é pesado com o material nele contido e a massa do agregado solto é a diferença entre a massa do recipiente cheio e vazio.

Tabela 9. Dimensões mínimas para determinação da massa unitária solta seca

D máx. agregado (mm)	Dimensões mínimas		Volume mínimo (dm³)
	base (mm)	altura (mm)	
≤ 4,8	316 x 316	150	15
> 4,8 e ≤ 50	316 x 316	200	20
> 50	447 x 447	300	60

Fonte: NBR 7251:1982.

A massa unitária solta é a média de, pelo menos, 3 resultados obtidos, dividindo-se a massa do agregado pelo volume do recipiente.

4.1.1.6. Determinação da massa específica por frasco de chapman

A determinação da massa específica de um agregado miúdo através do Frasco de Chapman, regido pela NBR 9776:1987, consiste em um frasco de vidro composto por dois bulbos e de um gargalo graduado onde, nesse frasco, é despejada água até a marca de 200 cm³, deixando-o em repouso até que as partículas de água nas laterais do recipiente escorram por inteiro. Feito isso, 500g de agregado miúdo seco é introduzido no frasco, cuidadosamente, e este é agitado para que as bolhas de ar sejam eliminadas. A leitura do nível atingido pela água no gargalo do frasco indica o volume, em cm³, ocupado pelo conjunto água-agregado.

Ao final, a massa específica do agregado miúdo é expressa pela Equação 1.

Equação 1. Determinação massa específica por frasco de chapman

$$\gamma = \frac{500}{L-200}$$

Fonte: NBR 9776:1987.

Onde:

γ = massa específica do agregado miúdo; deve ser expressa em g/cm³;

L = leitura do frasco (volume ocupado pelo conjunto água-agregado miúdo).

4.1.1.7. Determinação do índice de forma pelo método de paquímetro

A NBR 7809:2005 determina que o Índice de Forma de um agregado é a média da relação entre o comprimento e a espessura dos grãos, ponderada pela quantidade de grãos de cada fração granulométrica que o compõe.

Após a determinação da massa mínima definida em norma e ilustrada na Tabela 10, cada fração granulométrica deve ser dividida em quatro partes, como estabelece a NM 27, até a obtenção do número de grãos obtidos na fórmula mostrada na Equação 2.

Tabela 10. Massa mínima da amostra - índice de forma

Fração Granulométrica (abertura da peneira)	Massa mínima da amostra inicial kg
≤ 19mm	5
> 19mm e ≤ 25mm	10
> 25mm e ≤ 37,5mm	15
> 37,5mm	20

Fonte: NBR 7809:2005.

Equação 2. Equação para determinação do índice de forma - paquímetro

$$N_i = \frac{200}{\sum_{i=1}^n F_i}$$

Fonte: NBR 9776:1987.

Onde:

200 é o número de grãos que necessários para a realização do ensaio;

N_i é o número de grãos a serem medidos na fração i;

F_i é a porcentagem de massa retida individual da fração i.

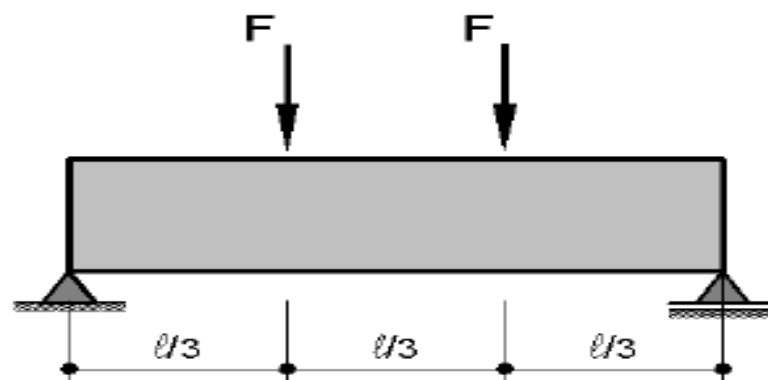
Feito isso, deve-se definir os comprimentos e espessuras dos grãos com auxílio do paquímetro e feita a relação entre esses fatores.

4.1.1.8. Determinação da resistência à tração na flexão

A fim de se ter o resultado de tração na flexão, um dos parâmetros de maior importância quando se fala de pavimentos rígidos, correlacionou-se estes valores com os resultados de compressão axial conforme sugerido por Pinheiro (2004). Esta correlação se deu, também, após a realização de diversos ensaios e da observação de uma interação entre os resultados.

Por ser um ensaio de maior dificuldade de execução, onde um corpo de prova prismático é submetido à flexão até a ruptura, com carregamentos em duas seções simétricas, como mostra a Figura 5, Pinheiro (2004) correlaciona as resistências do concreto.

Figura 5. Esquema de ensaio de resistência à tração na flexão



Fonte: PINHEIRO (2004) Estruturas de Concreto.

A resistência à tração na flexão ($F_{ct,f}$), enfim, é obtido através da seguinte correlação entre resistências: a partir da resistência a compressão axial chega-se no valor de resistência a tração direta (F_{ct}), a partir da Equação 3, e depois no de tração na flexão, utilizando a relação da Equação 4 **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Equação 3. Relação entre Fct e Fck

$$F_{ct} = 0,3 \times F_{ck}^{2/3}$$

Fonte: PINHEIRO (2004) Estruturas de Concreto.

Equação 4. Relação entre Fct e Fct,f

$$F_{ct} = 0,7 \times F_{ct,f}$$

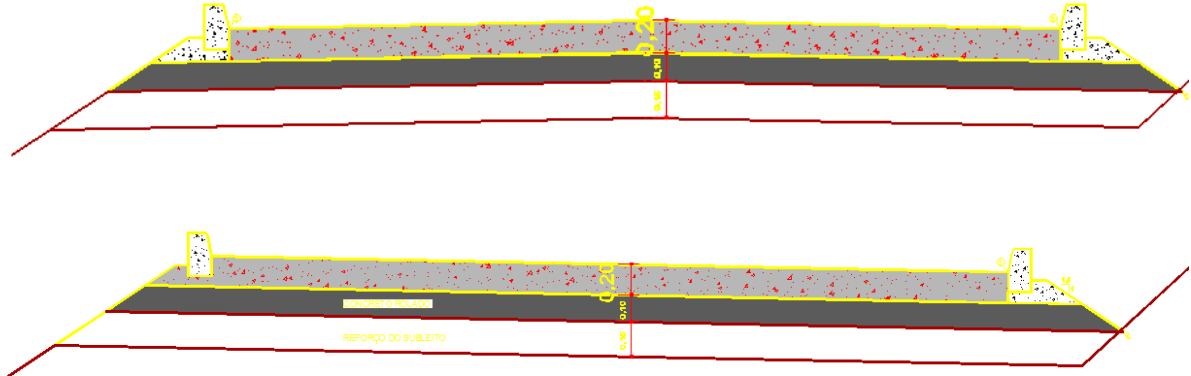
Fonte: PINHEIRO (2004) Estruturas de Concreto.

4.2. Projeto de pavimento rígido para a análise de viabilidade econômica

Para analisar e comparar o custo da execução de um pavimento rígido, foi escolhido o projeto do Setor Policial da cidade de Brasília-DF, realizado pela HASAAN Engenharia, para se ter um resultado real, conforme citado na metodologia desta pesquisa.

O projeto do trecho em estudo exige uma espessura de 20cm das placas de concreto, como consta nas seções exemplificadas na Figura 6. A partir do relatório elaborado pela HASAAN Engenharia, temos a área total de 2460m² onde serão executados o pavimento rígido. Sendo assim, podemos estimar um consumo de 492m³de concreto.

Figura 6. Seções transversais do pavimento do Setor Policial



Também fornecido pela HASAAN Engenharia, a composição do concreto que atende às especificações técnicas de seu projeto foi obtida do banco de dados do Sistema de Custos Rodoviários do DNIT (SICRO), conforme Tabela 11.

Tabela 11. Custo dos materiais por m³ de concreto

	Und	Quantidade	Valor unitário	Valor total
Cimento Portland CPII-32	kg	380	R\$ 0,33	R\$ 125,40
Aditivo Plastificante	kg	1,23	R\$ 3,85	R\$ 4,74
Areia Comercial	m ³	0,603	R\$ 57,23	R\$ 34,51
Brita Comercial	m ³	0,744	R\$ 61,12	R\$ 45,47
				R\$ 210,12

Fonte: SICRO - Janeiro/2014 - Distrito Federal.

Os agregados naturais presentes na composição do m³ do concreto têm preços de R\$57,23 e R\$61,12 respectivamente ao agregado miúdo e graúdo.

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste tópico serão apresentados os resultados obtidos através dos ensaios de caracterização dos RCD como agregados, verificando a possibilidade de sua utilização no traço do concreto.

Serão apresentados, também, os resultados obtidos por Nogueira (2013), que ensaiou o mesmo material e utilizou o mesmo laboratório. Também a partir dos resultados de Nogueira (2013), analisar-se-á o traço obtido por ele, mesmo que não feito especificamente para pavimentos rígidos, verificando se as características exigidas pelas normas regentes agregados para concreto são atendidas. Serão apresentados os custos dos agregados naturais e reciclados, analisando a viabilidade econômica da utilização de RCD como agregado. Para uma visão mais real do comparativo de custos, utilizaram-se esses valores aplicados no projeto do Setor Policial de Brasília, para, assim, ter-se a ideia de diferença percentual num projeto a ser executado.

Contemplando os ensaios de caracterização dos agregados:

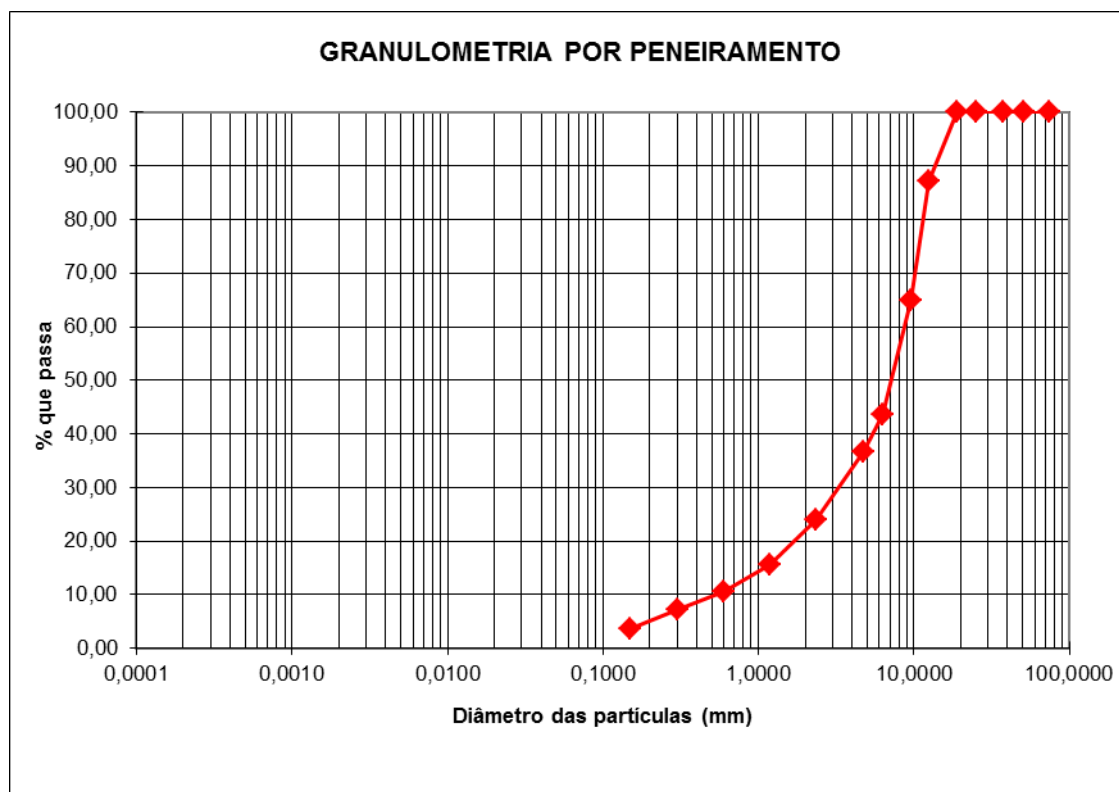
- Análise Granulométrica;
- Absorção de Água;
- Índice de Forma – Paquímetro;
- Massa Unitária Solta Seca;
- Massa Específica – Frasco de Chapman.

5.1. Análise granulométrica

O ensaio de análise granulométrica foi realizado com o RCD e com a areia reciclada, para, posteriormente, determinar a dimensão máxima característica e o correspondente módulo de finura.

Primeiramente foram realizados os ensaios com o RCD, a Figura 7 apresenta o percentual de material que passa pelas peneiras determinadas em norma regente. A quantidade de material ensaiado por Nogueira (2013) foi seguida pela norma NBR NM 248:2001, que se baseia na dimensão máxima característica do material. No caso do RCD a amostra é de 2000g.

Figura 7. Granulometria do RCD em brita



Fonte: NOGUEIRA (2013). Utilização de RCD na confecção de um concreto sustentável.

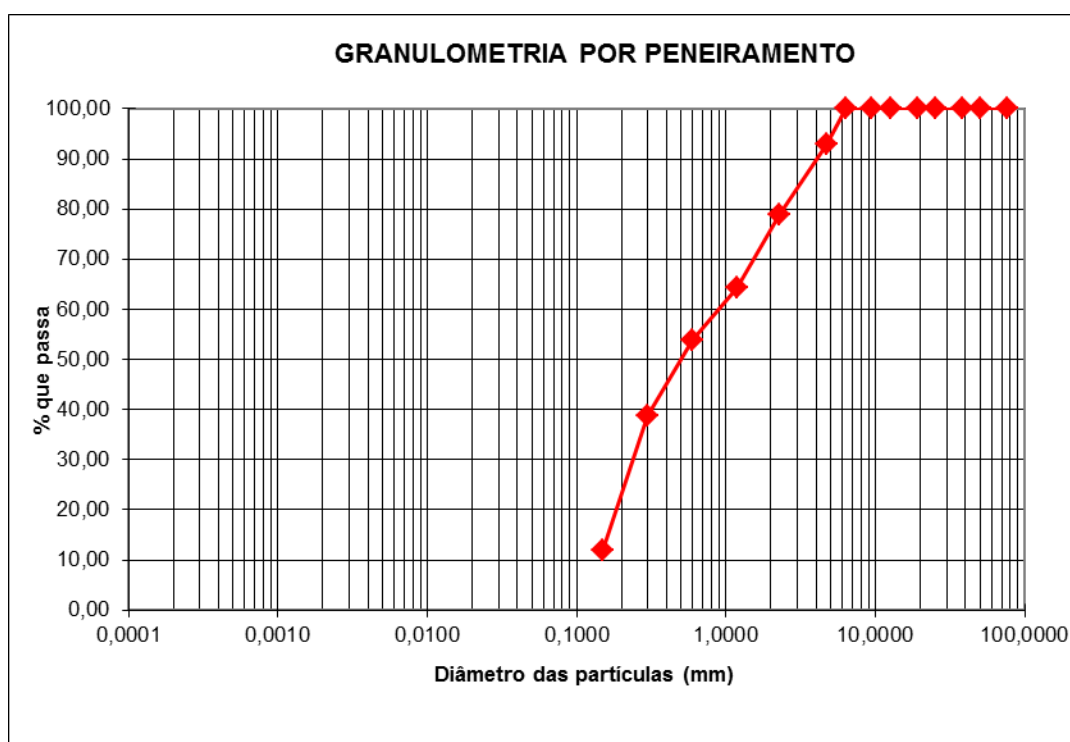
Feito o ensaio, Nogueira (2013) pôde determinar a dimensão máxima característica do material, que é a grandeza associada à distribuição granulométrica do agregado, que corresponde a abertura nominal da peneira. Sendo assim, a dimensão máxima do RCD ensaiado por Nogueira (2013) é de 12,5mm. Para o módulo de finura, calculado pela soma das porcentagens retidas acumuladas em massa do agregado, nas peneiras da série normal, dividida por cem, obteve-se o valor de 2,59.

A curva mostra, também, a porcentagem de material grosso, retido na peneira 4,75mm, e do fino, que corresponde ao que passa na mesma peneira. No caso em análise, 64% do material é caracterizado como grosso e o restante, 36%, como fino. Tendo em vista o objetivo de utilizar o RCD em granulometria de brita 1, obteve-se o valor de, aproximadamente, 13% de material com características correspondentes.

Ou seja, o material entre as peneiras de aberturas 25mm e 12,5mm. Para a utilização em grandes quantidades isso pode chegar a ser um problema, mas nada que impeça, de fato, a utilização de RCD.

Nogueira (2013) realizou o mesmo ensaio com a areia reciclada, tendo seu gráfico representado na Figura 8. A quantidade do material, determinado pela NBR NM 248:2001, foi de 300g.

Figura 8. Granulometria da areia reciclada



Fonte: NOGUEIRA (2013). Utilização de RCD na confecção de um concreto sustentável.

No caso da areia reciclada, a dimensão máxima característica é de 4,75mm e seu módulo de finura igual a 2,59. De acordo com a NBR 7211:2009, existem limites para utilização de agregados para concreto, limites estes, apresentados na Tabela 12, são fatores dependentes da análise granulométrica.

Tabela 12. Limites de utilização do agregado miúdo em traços de concreto

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

NOTA 1 O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.
 NOTA 2 O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.
 NOTA 3 O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

Fonte: NBR 7211:2009.

Analisando os resultados da curva granulométrica com a Tabela 12, Nogueira (2013) observou que a areia reciclada pode ser utilizada como agregado graúdo para concreto, sendo classificada na Zona Utilizável do Limite Superior. Porém, seu módulo de finura é menor que o exigido em norma.

5.2. Absorção de água

Ensaio com menor relevância quando se trata de agregados naturais, este ensaio tem uma maior importância no caso de agregados reciclados, pois estes apresentam maior porosidade em relação aos naturais. Essa maior porosidade faz com que a absorção de água seja maior, fazendo com que algumas características finais do concreto, como trabalhabilidade e, até mesmo, resistência, sejam alteradas. Para se ter um traço reciclado onde suas propriedades sejam garantidas, o ensaio de absorção se torna fundamental.

Para os agregados graúdos, as recomendações da sua norma regente, NBR NM 53:2002, foram seguidas, assim como as equações para determinação da massa específica e absorção de água. Estes resultados estão expressos na Tabela 13.

Tabela 13. Resultados absorção de água

MASSA ESPECÍFICA DO AGREGADO SECO (d) (g/cm³)	2.11
MASSA ESPECÍFICA DO AGREGADO SATURADO (ds)(g/cm³)	2.32
MASSA ESPECÍFICA APARENTE (da) (g/cm³)	2.69
MASSA ESPECÍFICA MÉDIA (dp) (g/cm³)	-
ABSORÇÃO DE ÁGUA (A) (%)	10.36
ABSORÇÃO DE ÁGUA MÉDIA (Ā)	-

Fonte: NOGUEIRA (2013).

Os resultados de média não foram obtidos por Nogueira (2013), tendo em vista que o mesmo realizou o procedimento apenas uma vez.

5.3.Índice de forma pelo método do paquímetro

Regido pela NBR 7809, o ensaio consiste na determinação do índice de forma dos agregados graúdos com dimensões máximas maiores que 9,5mm. Tendo a massa inicial, estabelecida por norma, de 10000g, o ensaio apresentou que o agregado graúdo ensaiado tem índice de forma igual a 3. Sendo assim, analisando individualmente este parâmetro, o RCD pode ser utilizado como agregado graúdo em concretos, pois apresenta valor dentro do limite, até 3, estabelecido pela NBR 7211:2009.

A Tabela 14 mostra as relações entre o comprimento e a espessura dos grãos, bem como o resultado do índice de forma, após a média entre as relações.

Tabela 14. Determinação índice de forma

comprimento (c)	espessura (e)	relação (c/e)
46,68	11,32	4,123674912
42,7	12,23	3,491414554
46,68	15	3,112
38,43	14	2,745
48,93	12,38	3,952342488
35,95	11,33	3,172992056
38,97	10,79	3,611677479
39,74	14,03	2,832501782
33,84	12,12	2,792079208
37,67	12,07	3,12096106
40,72	15,12	2,693121693
33,25	12,36	2,69012945
33,03	16,91	1,953282082
Índice de Forma =		3

Fonte: Acervo pessoal.

5.4.Massa unitária solta seca

A NBR 7251:1982 rege o procedimento que determina a massa unitária do agregado em estado solto. Para isso, deve-se ter um recipiente com volume mínimo, dependente do diâmetro máximo dos agregados, como mostrado na Tabela 15. O peso do recipiente vazio e cheio, com sua superfície regularizada, deve ser anotado para que, a partir da média das massas obtidas, em pelo menos três medições, dividido pelo volume do recipiente.

Os valores obtidos estão expressos na Tabela 15, onde a massa unitária tanto da areia reciclada quanto do RCD são expostos.

Tabela 15. Determinação massa unitária solta seca

	RCD			Areia Reciclada		
Peso Recipiente (kg)	16,92					
Peso Recipiente + Material (kg)	35,26	35,48	35,24	36,74	36,9	37,06
Peso Material (kg)	18,34	18,56	18,32	19,82	19,98	20,14
Média Material (kg)	35,33			36,9		
Volume Recipiente (dm ³)	15,36					
Massa Unitária Solta (kg/dm³)	2,30			2,40		

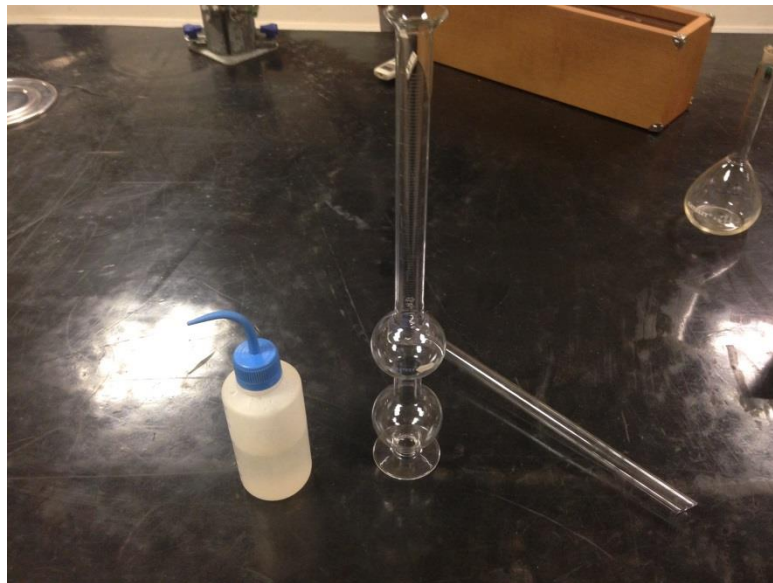
Fonte: Acervo pessoal.

5.5.Determinação da massa específica por meio do frasco de chapman

Entende-se por massa específica a relação entre a massa do agregado miúdo, seca em estufa, e o volume do sólido. Para isso, a NBR 9776:1987 rege quais procedimentos e materiais que devem ser adotados para a determinação deste parâmetro.

O ensaio consiste enchimento do frasco de Chapman, mostrado na Figura 9, inicialmente com 200cm³ de água. Feito isso, e aguardado um repouso para que escorra a água aderida às faces do frasco, a amostra de 500g de agregado miúdo, como solicita a norma, deve ser adicionada ao frasco, cuidadosamente.

Figura 9. Frasco de Chapman



Fonte: Acervo pessoal.

Feito isso, o frasco deve ser agitado para a eliminação das bolhas de ar. Finalizando, a medida mostrada no frasco deve ser anotada e utilizada na fórmula da Equação 5, obtendo, assim, a massa específica do material em estudo.

Equação 5. Determinação massa específica por frasco de chapman

$$\gamma = \frac{500}{L-200}$$

Fonte: NBR 9776:1987.

Onde,

γ = massa específica do agregado miúdo, em g/cm³;

L = leitura do frasco (volume conjunto água+agregado).

Após a leitura de 394 cm³ do conjunto agregado-água, temos a massa específica de 2,58 g/cm³.

Comparando o resultado com a massa específica de um agregado miúdo natural, que de acordo com Barbosa (2008) é de 2,62 g/cm³, podemos dizer que a utilização da areia reciclada em substituição à natural é válida, tendo em vista a proximidade desses valores.

5.6. Resistência à tração na flexão

Com os resultados de compressão axiais obtidos por Nogueira (2013) e Medeiros (2014), pode-se correlacionar esses valores a fim de se ter um valor que, segundo Pinheiro (2004), é feito por meio das fórmulas mostradas na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Equação 6. Relação entre Fct e Fck

$$F_{ct} = 0,3 \times F_{ck}^{2/3}$$

Fonte: PINHEIRO (2004) Estruturas de Concreto.

Equação 7. Relação entre Fct e Fct,f

$$F_{ct} = 0,7 \times F_{ct,f}$$

Fonte: PINHEIRO (2004) Estruturas de Concreto.

Sendo assim, a Tabela 16. Correlação para determinação da tração na flexão, após a correlação para determinação da tração na flexão citada por Pinheiro (2004), mostra quais as resistências a compressão foram tomadas e suas respectivas resistências à tração na flexão (F_{ct},f).

Tabela 16. Correlação para determinação da tração na flexão

F_{ck}	F_{ct}	F_{ct},f
29,84	2,89	4,12
33,45	3,11	4,45
31,82	3,01	4,30
37,78	3,38	4,83
37,37	3,35	4,79
30,8	2,95	4,21
31,39	2,99	4,26
28,78	2,82	4,02

** valores em MPa*

Fonte: Acervo pessoal.

Analisando os resultados obtidos com a especificação do projeto do Setor Policial de Brasília, elaborado pela HASAAN Engenharia, nota-se que alguns traços atingiram os 4,5MPa determinados em projeto. Este projeto não determina uma resistência à compressão axial, porém, os 30MPa comumente tidos como parâmetro são atingidos nos traços realizados.

Dentre 8 resultados analisados, 75% atingiram os 30MPa de compressão axial e 25% atingiu os 4,5MPa, como determina o projeto. Todos os 8 traços obtiveram uma resistência a tração na flexão maior que 4 MPa, sendo alguns com resultados bem próximos aos 4,5. Isto sugere que um traço sustentável pode ser, neste quesito, utilizado em pavimentos rígidos.

5.7. Análise econômica da utilização de RCD como agregado

A fim de se ter um comparativo de custos do concreto com agregados naturais e normais, aplicar-se-á ao projeto do Setor Policial a composição fornecida pela HASAAN que atenderia às especificações. Este projeto prevê uma área de 2460m² de pavimento rígido com espessura de 0,20m, totalizando 492m³ de concreto.

A Tabela 17 mostra a composição da produção deste concreto, que dá um valor de R\$210,12, considerando apenas os materiais componentes da mistura. Aplicando diretamente esse valor no projeto em exemplo, tem-se um custo de R\$103.379,04 com materiais.

Tabela 17. Custo de materiais por m³ de concreto

	Und	Quantidade	Valor unitário	Valor total
Cimento Portland CII-32	kg	380	R\$ 0,33	R\$ 125,40
Aditivo Plastificante	kg	1,23	R\$ 3,85	R\$ 4,74
Areia Comercial	m ³	0,603	R\$ 57,23	R\$ 34,51
Brita Comercial	m ³	0,744	R\$ 61,12	R\$ 45,47
				R\$ 210,12

Fonte: SICRO - Janeiro/2014 - Distrito Federal

Tomando como base para comparação o traço onde alcançou-se a resistência à tração na flexão maior que 4,5MPa, temos um preço por m³ de R\$249,15, ilustrado na Tabela 18, onde os preços dos agregados foram fornecidos pela Areia Bela Vista. Já o Cimento CP-III teve seu preço baseado no SINAPI - Índices da Construção Civil, com data base em Maio de 2014 no Distrito Federal.

Aplicando diretamente nos 492m³ de concreto do Setor Policial de Brasília, temos um custo total com materiais de R\$122.581,80. Existe um acréscimo de, aproximadamente, 18,57%, equivalentes a R\$19.202,76, do custo dos materiais do concreto com agregados naturais, um valor que chega a ser insignificante quando se considerado os benefícios da utilização dos agregados reciclados.

Tabela 18. Custo de materiais por m³ de concreto reciclado

	Unidade	Quantidade	Valor Unitário	Valor Total
Cimento CIII	kg	311,08	R\$ 0,34	R\$ 105,77
Areia Reciclada	m ³	0,26	R\$ 63,00	R\$ 16,46
RCD em Brita (granulometria brita 1)	m ³	0,37	R\$ 63,00	R\$ 23,39
Graute	l	14,79	R\$ 7,00	R\$ 103,53
				R\$ 249,15

6. CONCLUSÃO

Tendo os resultados e todo o embasamento teórico para atingi-los, podemos dizer que a utilização de pavimento rígido é benéfica em vários sentidos. Porém, para se ter um pavimento que tenha sua qualidade duradoura, é necessário uma manutenção periódica e rigorosa. Feito isso, as principais características do pavimento rígido, como a própria durabilidade, e outras indiretas como economia de combustível são alcançadas.

A partir dos resultados obtidos, principalmente considerando a resistência a tração na flexão obtidos através da correlação entre a resistência a compressão axial dos resultados obtidos por NOGUEIRA (2013) e MEDEIROS (2014), pode-se dizer que é de alto potencial a utilização de RCD como agregados de concreto aplicados a pavimentos rígidos. Além disso, a maioria dos ensaios de caracterização dos agregados reciclados atenderam valores de suas normas regentes. De qualquer forma, a fim de se ter todos os requisitos necessários para a utilização dos agregados reciclados, pode-se estudar a adição de porcentagens minoritárias de agregados naturais. Com isso, pode-se inferir que os requisitos técnicos seriam atendidos, bem como não se deixaria de inserir o conceito de sustentabilidade ao se destinar o resíduos da construção civil em obras de pavimento rígido.

A pesquisa evidenciou, também, a grande necessidade do controle tecnológico dos materiais componentes do concreto seja sustentável ou convencional.

Do ponto de vista econômico, o aumento de 18,57% no valor do m³ do concreto não viria a se tornar um problema a ponto de impedir a utilização de agregados reciclados. Pelo contrário, o valor se torna insignificante, tendo em vista os benefícios que a utilização destes agregados traria, principalmente no âmbito da sustentabilidade na solução adotada conforme anteriormente mencionado. Salienta-se ainda que o concreto sustentável pode ser utilizado para outros pavimentos com menores fluxos ou, até mesmo, em ciclovias, tendo em vista que essas opções exigem menores resistências.

6.1.Sugestões para pesquisas futuras

Com o objetivo de complementar essa pesquisa, sugere-se os seguintes estudos para pesquisas futuras:

- Confecção de um traço próprio para pavimentos rígidos com variações em porcentagens de RCD e recursos naturais;
- Realizar ensaios de resistência à tração na flexão;
- Confeccionar um traço sustentável com utilização do cimento ARI;
- Estudo da reação álcali-agregado para os agregados reciclados;
- Estudo do desgaste superficial do concreto sustentável;
- Realizar ensaios com Cimento CP III, no que diz respeito a finura, tempo de pega, entre outros;
- Estudar a utilização de água de chuva no concreto sustentável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABCP, A. B. C. P. Sobre a Associação Brasileira de Cimento Portland. **Site da Associação Brasileira de Cimento Portland**, Dezembro 2002. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/>>. Acesso em: 5 set. 2013.
- AGOPYAN, V.; JOHN, V. **O Desafio da Sustentabilidade na Construção Civil**. São Paulo: Blucher, 2011.
- BALBO, J. T. **Pavimentos de Concreto**. 1a. ed. São Paulo: Oficinas de Textos, v. I, 2009.
- BRITO, I. R. T. **ESTUDO COMPARATIVO ENTRE PAVIMENTO RÍGIDO E FLEXÍVEL**. Ensino Superior Unificado do Centro Leste. Serra, p. 16. 2008.
- DNIT. **Manual de Pavimentos Rígidos**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Rio de Janeiro, p. 234. 2005.
- LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 270. 2001.
- MEDEIROS, D. **Análise da Resistência Mecânica de Concreto Sustentável com Aditivo**. UniCEUB. Brasília, p. 109. 2014.
- MOLIN, G. L. V. **Viabilidade Técnica da Utilização de concretos com agregados reciclados de resíduo da construção e demolição**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 63. 2004.
- NOGUEIRA, L. G. S. **Utilização de RCD na confecção de um concreto sustentável**. UniCEUB. Brasília, p. 117. 2013.
- OLIVEIRA, P. L. D. **Projeto Estrutural de Pavimentos Rodoviários e de Pisos Industriais de Concreto**. Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 218. 2000.
- PINHEIRO, L. M. Estruturas de Concreto. In: PINHEIRO, L. M. **Estruturas de Concreto**. São Paulo: [s.n.], 2004. Cap. 2.
- SILVA, R. D. N. **Um Estudo sobre o Concreto de Alto Desempenho**. Universidade Estadual de Feira de Santana. Feira de Santana, p. 57. 2010.
- TAKAOKA, M. Prefácio. In: AGOPYAN, V.; JOHN, V. **O Desafio da Sustentabilidade na Construção Civil**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 2011.
- TENPÓRIO, J. J. L. **AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES DO CONCRETO PRODUZIDO COM AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO VISTANDO APLICAÇÕES ESTRUTURAIS**. Universidade Federal de Alagoas. Maceió, p. 138. 2007.