FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA - UniFOA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO - PRO-PPG
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS

RÔMULO MARCZUK SCHETTINO - 201200639

CONCRETO COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLITEREFTALATO DE ETILENO

VOLTA REDONDA
2015

FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA - UniFOA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO - PRO-PPG
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS

CONCRETO COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLITEREFTALATO DE ETILENO

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Materiais do Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA, como requisito obrigatório para obtenção do título de Mestre em Materiais sob a orientação do professor Dr. Horácio Guimarães Delgado Júnior, na área de concentração de processamentos e caracterização de materiais, linha de pesquisa de materiais cerâmicos.

VOLTA REDONDA
2015

FICHA CATALOGRÁFICA

Bibliotecária: Alice Tacão Wagner - CRB 7/RJ 4316

S327c Schettino, Rômulo Marczuk.

Concreto com adição de fibras de politereftalato de etileno. / Rômulo Marczuk Schettino - Volta Redonda: UniFOA, 2015.

65 p. : Il

Orientador(a): Horácio Guimarães Delgado Júnior

Dissertação (Mestrado) – UniFOA / Mestrado Profissional em

FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno: Rômulo Marczuk Schettino

CONCRETO COM ADIÇÃO DE FIBRAS DE POLITEREFTALATO DE ETILENO

Orientador: Horácio Guimarães Delgado Júnior

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Horácio Guimarães Delgado Júnior

Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira

Prof. Dr. Francisco Santos Sabbadini

Esta dissertação é dedicada em primeiro lugar ao DEUS SUPREMO, o SENHOR JESUS, que me tomou pelas mãos e me deu forças nos momentos bons e principalmente nos momentos ruins de minha vida. Sem ELE eu não teria chegado até aqui! Aos meus familiares por estarem sempre por perto, dando-me apoio em todos os momentos e me incentivando a vencer. A todos aqueles que colaboraram comigo de alguma forma, pois sempre pude extrair o melhor de cada um. Aos professores deste Curso e ao meu orientador por toda atenção.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao PAI em Nome do SENHOR JESUS pelas coisas que ELE já fez por mim. Estou certo de que sem a aprovação do SENHOR DEUS eu não teria conseguido galgar mais um degrau tão importante em minha vida, pois DEUS me deu força, coragem e sabedoria para vencer os mais diversos obstáculos do caminho. Obrigado SENHOR por me dar o privilégio da alegria constante. A Ti toda honra, glória, louvor e majestade porque só o SENHOR é digno. Tu És a única razão da minha existência.

Agradeço aos meus familiares por serem a estrutura forte, onde sempre estou firmado, em especial minha esposa e filha. Sei que sempre poderei contar com todos de minha família e sou enormemente grato por isso.

À minha tão amada mãe Sônia Marczuk, mulher de fibra e com os pés bem firmes ao chão e que sempre me incentivou a vencer. O meu mais sincero agradecimento. Te amo, mãe! Você é muito especial para mim.

Ao meu orientador Dr. Horácio Guimarães Delgado Júnior por toda dedicação a mim dispensada.

Quero agradecer aos meus amigos que estiveram junto comigo nesta caminhada e que me apoiaram em tudo o que precisei, em especial, ao meu amigo Rafael Bernardino da Silva Júnior.

Os meus agradecimentos não podem faltar ao Presidente desta Instituição de Ensino Superior, o Sr. Dauro Peixoto Aragão, pois quero agradecer por todos os benefícios que tem me proporcionado e muito do que sou eu devo a ti.

Em Romanos 14:17 está escrito: *"Porque o reino de Deus não é comida nem bebida, mas justiça, e paz, e alegria no Espírito Santo"*. O Reino do SENHOR JESUS é tudo isso e por isso, podemos descansar e entregar tudo nas Mãos do SENHOR. Por isso sou mais do que vencedor e você também poderá ser, ao aceitar que o SENHOR JESUS faça parte de sua vida.

Amém!

RESUMO

Devido à escassez de recursos naturais, novas regras, limitações exigidas no ato de se construir e ao alto custo de materiais de construção é fundamental a busca de novos materiais a fim de reduzirem o custo final e amenizarem todo e qualquer dano gerado à natureza. Em adendo, cabe ressaltar que ao encaminhar-se a destinação de resíduos voltada a sua incorporação novamente como matéria-prima no ciclo de produção, promove-se um ganho em termos de economia de matéria-prima e na proteção ambiental. Ao agregar fibras de Politereftalato de Etileno (conhecido popularmente como PET) com tamanho de 30mmx3mm, transparentes, lisas e sem furos, ao cimento; é possível validar a eficiência e a eficácia deste método na melhoria contínua das propriedades físico-mecânicas do material, no que tange em especial o controle de fissuração, aumento da carga pós-ruptura e ao aumento da durabilidade e resistência do concreto a ruptura. Esta dissertação tem por objetivo descrever o comportamento físico-mecânico de moldes de concreto de cimento Portland com agregados de Politereftalato de Etileno (PET) para que o material compósito formado seja destinado a pisos de diversos ambientes, como, estacionamentos, calçadas etc. Esta dissertação apresentará um comparativo entre moldes de concreto de cimento Portland composto de cimento CP III puro e moldes de concreto contendo os agregados de 5%, 10% e 15% de PET, através de testes de compressão, bem como sua trabalhabilidade. A resistência mecânica declinou quase que pela metade, para T2 (5% de fibra adicionada ao traço 2), T3 (10% de fibra adicionada ao traço 3) e T4 (15% de fibra adicionada traço 4), obtendo os valores de 68, 69 e 42,99KN. Desta forma, pode-se observar que o aumento do teor de fibra adicionada ao concreto passou a ter grande significado na resistência física do material.

Palavras-chave: Politereftalato de Etileno - PET, Fibras de PET, Cimento Portland

ABSTRACT

Due to the scarcity of natural resources, new rules, limitations required in the act of building and the high cost of building materials is essential to search for new materials in order to reduce the final cost and they liven up any and all damages generated to nature. In addendum, we point out that the route to disposal of waste turned its incorporation again as raw material in the production cycle, it promotes a gain in terms of economy of raw materials and environmental protection. By adding fibers of polyethylene terephthalate (popularly known as PET) with size 30mmx3mm, transparent, smooth and no holes, to cement; It can validate the efficiency and effectiveness of this method in the continuous improvement of physical and mechanical properties of the material, with respect in particular the control of cracking, increased post-break load and increased durability and strength of concrete breakage. This paper aims to describe the physical and mechanical behavior of cement concrete molds Portland with ethylene terephthalate aggregates (PET) for the formed composite material is intended for floors of different environments, such as parking lots, sidewalks etc. This dissertation present a comparison between cement concrete molds Portland cement compound CP III pure and concrete molds containing the aggregates of 5%, 10% and 15% PET by compression tests as well as their workability. The mechanical strength declined to almost half, for T2 (5% fiber added to the trace 2), T3 (10% added fiber to trace 3) and T4 (15% added fiber trace 4), yielding 68 values, 69 and 42,99KN. Thus, it can be seen that increasing the fiber content added to the concrete started to have great significance in the physical strength of the material.

Keywords: Polyethylene terephthalate - PET, PET fibers, Portland cement

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 18
2.1 Concreto: Material Construtivo mais Utilizado pelo Homem 18
2.1.1 Estrutura da Fase Agregado 19
2.1.2 Estrutura da Zona de Transição 20
2.1.2.1 Resistência da Zona de Transição 22
2.1.3 Composição Química 23
2.1.4 Densidade 24
2.1.5 Tipos de Concreto 24
2.2 Sistemas em Placas de Concreto para Pisos e Pavimentos 25
2.2.1 Tipos de Pavimentos de Concreto 25
2.2.2 Pavimentos de Concreto Simples 26
2.3 Tecnologia de Concretos Aplicada à Construção de Pavimentos 27
2.3.1 Propósitos Básicos na Abordagem da Questão Tecnológica dos Concretos 27
2.3.2 Tipos de Concretos Empregados em Pavimentação 29
2.3.3 Propriedades do Concreto Fresco 31
2.3.3.1 Trabalhabilidade 31
2.3.4 Propriedades do Concreto Fresco 33
2.3.4.1 Retração por Secagem e seu Controle 33
2.3.4.2 Resistência Estática 35
2.3.4.2.1 Resistência à Compressão 36
2.3.4.2.2 Resistência à Fadiga 36
2.3.4.3 Tenacidade 37
2.3.4.4 Resistência à Abrasão 37

2.4 Fundamentos Teóricos para Aprendizagem de Tensões em Placas 38
2.4.1 Forças Atuantes.....38
2.4.2 Deformação e Elasticidade.....38
2.4.3 Esforços de Retração no Concreto.....39
2.5 Sustentabilidade 40
2.6 Polímeros e suas Características.....41
2.6.1 Comportamento Mecânico dos Polímeros.....43
2.6.2 Propriedades do Politereftalato de Etileno - PET 44
2.6.2.1 Morfologia.....45
2.7 Materiais Compósitos.....45
2.8 Interação Fibra-Matriz 48
2.9 Aspectos Tecnológicos Fundamentais.....49
2.10 Considerações Básicas.....49
2.10.1 Corpos-de-prova 49
2.10.2 Ensaio de Resistência à Tração.....49
2.10.3 Ensaio de Resistência à Compressão Axial 49
3 MATERIAIS E MÉTODOS 50
3.1 Materiais utilizados.....50
3.2 Equipamentos utilizados: 51
3.3 Métodos: 54
3.3.1 Normas 54
3.3.2 Escolha do material 55
3.3.3 Fibras.....55
3.3.4 Ensaio de Resistência às Compressões Axial e Diametral 56
3.3.5 Corpos-de-prova.....57
4 ANÁLISE E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS 58
4.1 Caracterização das matérias-primas.....58

4.2 Resistência à Compressão Axial 60
4.3 Resistência à Compressão Diametral 61
4.4 Resistência à Tração 62
5 CONCLUSÕES 63
6 REFERÊNCIAS 64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Cimento Portland 19
Figura 2 - Forma e textura da superfície de partículas de agregado graúdo: (a) seixo, arredondado e liso; (b) rocha britada, equidimensional; (c) rocha britada, alongada; (d) rocha britada chata; (e) agregado leve, anguloso e rugoso; (f) agregado leve, arredonda 20
Figura 3 - Micrografia Eletrônica de Varredura mostrando a estrutura do concreto hidratado: agregado, zona de transição e matriz de pasta de cimento. 22
Figura 4 - Efeito da idade na resistência de aderência (zona de transição) e na resistência da matriz da pasta de cimento 22
Figura 5 - Placas de pavimento de concreto simples 27
Figura 6 - (A) controle do abatimento em obra; (B) e em laboratório (dosagem) 32
Figura 7 - Mecanismo de ocorrência de fissura de retração por secagem 34
Figura 8 - Manifestação da retração por secagem (transversal, A e B; longitudinal, C) 35
Figura 9 - Esquerda - Abrasão inicial e formação de lamelas por exsudação do concreto; Direita - Desgaste da argamassa na superfície do pavimento de concreto, com exposição dos agregados 38
Figura 10 - Forças de retração na placa de concreto 39
Figura 11 - Gestão de Resíduos Sólidos 41
Figura 12 - Gráfico tensão-deformação 44
Figura 13 - Representações esquemáticas das várias características geométricas e espaciais de partículas da fase dispersa, que podem influenciar as propriedades dos materiais compósitos: (a) concentração, (b) tamanho, (c) forma, (d) distribuição e, (e) orientação 47
Figura 14 - Esquema classificatório dos vários tipos de materiais compósitos 47
Figura 15 - Concreto com fibra 48
Figura 16 - Fluxograma de atividades adotadas neste trabalho 50
Figura 17 - Guilhotina 51
Figura 18 - Formas cilíndricas de aço nas dimensões 10cmx20cm para moldagem dos corpos-de-prova e soquete, utilizado na compactação do material 52
Figura 19 - Espátula 52

Figura 20 - Prensa hidráulica modelo EMIC - DL 10000 53
Figura 21 - Prensa hidráulica modelo EMIC - PC 150C 53
Figura 22 - MEV JEOL, modelo JSM 5800LV 54
Figura 23 - Fibras de PET 56
Figura 24 - Micrografia obtida por MEV representativa da interação fibra de PET com a matriz (MEV 28 dias) 58
Figura 25 - Micrografia obtida por MEV representativa da interação fibra de PET com a matriz (MEV 28 dias) 58
Figura 26 - Micrografia obtida por MEV representativa da interação fibra de PET com a matriz (MEV 28 dias) 59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de pavimento de concreto em placas 26
Tabela 2 - Principais características de concretos de pavimentação potencialmente sujeitas a controle estrito.....28
Tabela 3 - Valores típicos para consideração de concretos secos ou fluidos 32
Tabela 4 - Valores típicos de abatimento para concretos em pavimentação 33
Tabela 5 - Ensaios de resistência para concretos de pavimentação.....36
Tabela 6 - Sequência da Adição de cimento, areia, pedra e PET 56
Tabela 7 - Resultado dos Ensaios de Resistência à Compressão Axial nos corpos-de-prova cilíndricos 60
Tabela 8 - Resultado dos Ensaios de Resistência à Compressão Axial nos corpos-de-prova cilíndricos (com dados estatísticos).....61
Tabela 9 - Resultado dos Ensaios de Resistência à Compressão Diametral nos corpos-de-prova cilíndricos 61
Tabela 10 - Resultado dos Ensaios de Resistência à Compressão Diametral nos corpos-de-prova cilíndricos (com dados estatísticos).....62
Tabela 11 - Ensaio de Resistência à Tração.....62

LISTA DE EQUAÇÕES

(1) 38
(2) 39

LISTA DE SIGLAS

CAD - Concreto de Alta Resistência ou Concreto de Alto Desempenho

CAN - Concretos Autonivelantes

CCP - Cimento Portland

CCR - Concreto Compactado com Rolo

CCV - Concreto Convencional

CRF - Concreto Reforçado com Fibras

CP - Corpo(s)-de-prova

CV - Concretos Convencionais

Fig. - Figura

PC - Policarbonato

PCA - Pavimento de Concreto Armado

PCAC - Pavimento de Concreto com Armadura Contínua

PCPM - Pavimentos de Concreto Pré-moldado

PCPRO - Pavimento de Concreto Protendido

PCS - Pavimento de Concreto Simples

PE - Polietileno

PET - Politereftalato de Etileno

PMMA - Polimetilmetacrilato

PP - Polipropileno

PS - Poliestireno

PVC - Policloreto de Vinila

Tab. - Tabela

WT - *Whitetopping*

WTUD - Whitetopping Ultradelgado

1 INTRODUÇÃO

O material mais utilizado na construção civil é o concreto, que é composto por uma mistura de cimento, areia, pedra e água. De acordo com nossa história, os romanos foram os primeiros a utilizar este tipo de material, conhecido como *"Pozzolana",* material totalmente inerte e que reage com hidróxidos de cálcio na presença de água o que dá origem a um material aglomerante (CONCRETO, 2013; POZOLANA, 2013).

A resistência e durabilidade do concreto estão intrinsecamente ligadas aos materiais que o compõem. A mistura desses materiais dá-se o nome de dosagem ou traço (CONCRETO, 2013).

Materiais alternativos são cada vez mais utilizados como agregados na construção civil, crescendo exponencialmente, devido a grande necessidade do aumento de se reutilizar tudo aquilo que antes era simplesmente descartado, sujando ruas e ocupando lixões ao ar livre, causando diversos problemas ambientais (CARVALHO, Willian Cle; GOMES, Ricardo Adriano Martoni Pereira, 2013).

Devido à escassez de recursos naturais, novas regras, limitações exigidas no ato de se construir e ao alto custo dos materiais de construção é fundamental e quase que obrigatório buscar novos materiais a fim de reduzir o custo final e amenizar todo e qualquer dano gerado à natureza. Ao agregar fibras de politereftalato de etileno, conhecido popularmente como PET, ao cimento, é possível validar a eficiência e a eficácia deste método na melhoria contínua das propriedades físico-mecânicas do material, no que tange em especial o controle de fissuração, aumento da carga pós-ruptura e ao aumento da durabilidade e resistência do concreto à ruptura (CORÓ, Ângela Ghisleni, 2002).

Estudos envolvendo compósitos cerâmicos com agregados (fibras) de PET se justificam pelo fato dos mesmos serem utilizados em praticamente todos os produtos que vemos hoje em dia, bem como em embalagens de garrafas d'água etc. e, aos montes, sem nenhum pudor por parte de seus usuários, são descartadas, contaminando mares, rios e lagos. Além disso, ao ser lançado nas ruas, entope bueiros, causando enchentes e, servem de recipientes para insetos se proliferarem livremente trazendo doenças à população. Faz-se necessário buscar novas aplicabilidades ao PET para evitar seu descarte, principalmente a céu aberto, e evitar

problemas como estes à população e amenizar danos causados ao meio ambiente reaproveitando-o.

Desta forma, o objetivo desta dissertação é descrever o comportamento físico-mecânico dos moldes de concreto de cimento Portland puro - sem adição de fibras de PET - e o comportamento físico-mecânico dos moldes de concreto contendo os agregados (fibras) de PET de tamanho 30mmx3mm, comparando-os, verificando-os e sugerindo possíveis melhorias bem como sua aplicabilidade a pisos de diversos ambientes, como, estacionamentos, calçadas etc. Além disso, estudar o ponto ideal de trabalhabilidade do compósito formado, ao adicionar ao cimento, reforço de fibras de PET.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Concreto: Material Construtivo mais Utilizado pelo Homem

O Cimento Portland surgiu no ano de 1824 quando um construtor inglês chamado Joseph Aspdin colocou fogo em pedras calcárias e argila, juntas, transformando-as em um pó bem fino. Ele notou que essa mistura não se desfazia em água e no mesmo ano ele a patenteou dando a ela o nome de cimento *"Portland"*. Recebeu este nome por apresentar cor e propriedades similares às rochas encontradas na ilha britânica *"Portland"* (INFOFÁCIL, 2010).

Em sua natureza básica, o concreto, nada mais é do que um material plástico, podendo ser facilmente moldado até se adquirir à forma desejada antes do início de seu processo de endurecimento, pois adquire resistência suficiente, para que, sozinho, resista grandes esforços (O MUNDO DO CIMENTO, 2013).

O concreto é o material construtivo mais utilizado pelo homem e possui grande disseminação em todo o planeta. Para onde olhamos, seja qual for a direção, encontramos estruturas feitas de concreto. Se olharmos em direção à nossas casas, rodovias, pontes, aos mais altos arranha-céus, torres de resfriamento, usinas hidrelétricas e nucleares, em obras de saneamento básico, entre outros, é possível encontrar o concreto (REVISTA CONCRETO & CONSTRUÇÕES, 2009).

Nos últimos 15 (quinze) anos sua produção dobrou em todo o mundo, tal acontecimento se deve aos países emergentes, como Afeganistão, Argélia, Bósnia, Brasil, China, Chile etc. Segundo informações fornecidas pelo Serviço Geológico EUA, somente no ano de 2011 foram produzidas 3,4 bilhões de toneladas de cimento (BOOM DA CONSTRUÇÃO, 2012; PAISES EMERGENTES, 2013).

Para se ter uma ideia, somente no Brasil no ano de 2012, foram consumidas 58 milhões de toneladas de cimento. Alguma das prováveis razões de tal utilização é o fácil acesso a este produto o que permite que o mesmo seja disponibilizado com grande abundância aos canteiros de obras (CORÓ, Ângela Ghisleni, 2002).

Figura 1 - Cimento Portland
Fonte: Téchne, 2014

2.1.1 Estrutura da Fase Agregado

A fase agregado é predominantemente responsável pela massa unitária, módulo de elasticidade, e estabilidade dimensional do concreto. Essas propriedades, inerentes ao concreto, dependem exclusivamente e em larga extensão da densidade e resistência do agregado que, por sua vez, são determinadas em maior decorrência por características físicas do que por características químicas a estrutura do agregado. Ou seja, em outras palavras, a composição química ou mineralógica (ciência que tem como objeto o estudo dos minerais) das fases sólidas do agregado são menos importantes do que características físicas, tais como volume, tamanho, e distribuição de poros (MEHTA, P. Kumar e MONTEIRO, Paulo J., 1994).

Além da porosidade, a forma e a textura do agregado graúdo também afetam as propriedades do concreto. Algumas das partículas típicas do agregado são evidenciadas na Fig. 2. Geralmente, o seixo natural possui forma arredondada e uma superfície de textura lisa. Rochas britadas possuem textura rugosa; a depender do tipo de rocha e da escolha do britador, o agregado britado pode conter uma proporção considerável de partículas chatas ou alongadas, que, por sua vez, afetam de forma negativa muitas das propriedades do concreto. Partículas de agregado leve de pedra-pomes, que é altamente celular, também são angulares e de textura rugosa, mas as de argila ou folhelho expandidos são geralmente arredondadas e lisas (MEHTA, P. Kumar e MONTEIRO, Paulo J., 1994).

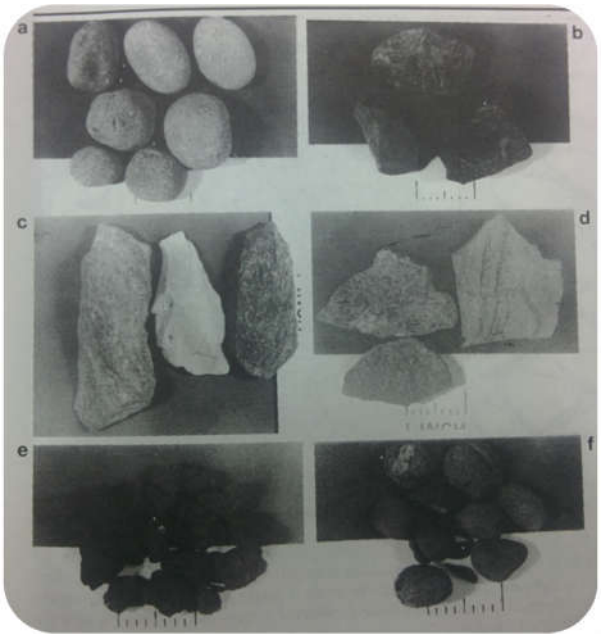

Figura 2 - Forma e textura da superfície de partículas de agregado graúdo: (a) seixo, arredondado e liso; (b) rocha britada, equidimensional; (c) rocha britada, alongada; (d) rocha britada chata; (e) agregado leve, anguloso e rugoso; (f) agregado leve, arredonda
Fonte: (MEHTA, P Kumar e MONTEIRO, Paulo J., 1994)

2.1.2 Estrutura da Zona de Transição

Há poucas informações sobre a zona de transição no concreto, devido a dificuldades experimentais; todavia, embasando-se em uma descrição dada por Maso, é possível ter algum conhecimento das suas características estruturais acompanhando-se a sequência do seu desenvolvimento a partir do momento em que o concreto é lançado (MEHTA, P. Kumar e MONTEIRO, Paulo J., 1994).

> *"Primeiro, em concreto recentemente compactado, um filme de água forma-se ao redor das partículas grandes de agregado. Isto pode levar a uma relação água/cimento mais elevada na proximidade do agregado graúdo do que longe dele. Em seguida, analogamente à matriz, os íons de cálcio, sulfato, hidroxila, e aluminato formados pela dissolução dos compostos de sulfato de cálcio. Devido à relação água/cimento elevada, estes produtos cristalinos vizinhos ao agregado graúdo consistem de cristais relativamente grandes, e consequentemente, formam uma estrutura mais porosa do que na matriz de pasta de cimento ou na matriz de argamassa. Os cristais em placa*

*de hidróxido de cálcio tendem a formar-se em camadas orientadas, por exemplo, com o eixo **c** perpendicular à superfície do agregado. Finalmente, com o progresso da hidratação, o C-S-H pouco cristalizado e uma segunda geração de cristais menores de etringita e de hidróxido de cálcio começam a preencher os espaços vazios entre o reticulado criado pelos cristais grandes de etringita e de hidróxido de cálcio. Isto ajuda a aumentar a densidade e, consequentemente, a resistência da zona de transição".*

A Fig. 3 contém uma representação diagramática e micrografia eletrônica de varredura, da zona de transição do concreto.

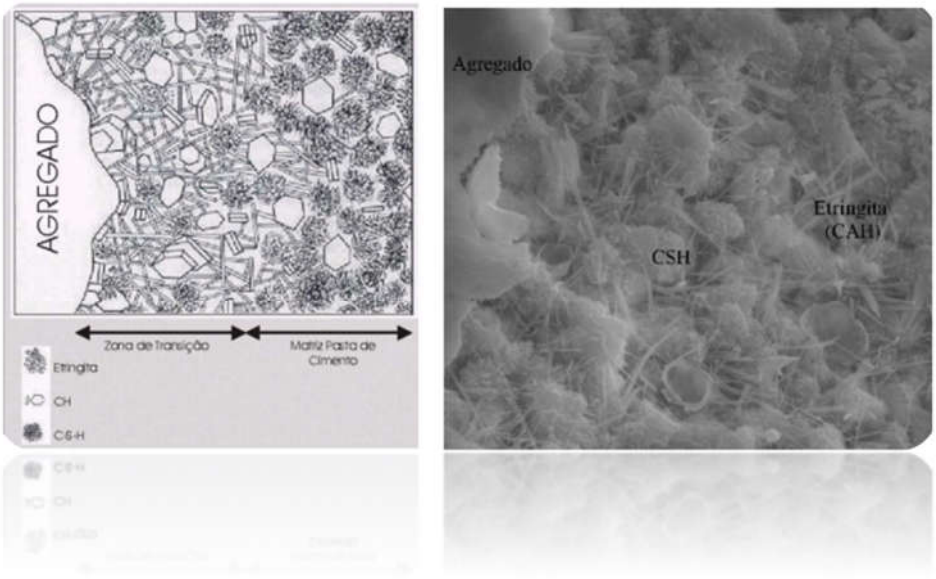

Figura 3 - Micrografia Eletrônica de Varredura mostrando a estrutura do concreto hidratado: agregado, zona de transição e matriz de pasta de cimento.
Fonte: (MEHTA, P Kumar e MONTEIRO, Paulo J., 1994)

2.1.2.1 Resistência da Zona de Transição

A causa da adesão entre os produtos de hidratação e a partícula de agregado são as forças de atração de Van Der Waals, no caso da pasta; portanto, a resistência da zona de transição em qualquer ponto dependerá do volume e do tamanho dos vazios presentes. Mesmo para os concretos de baixa relação água/cimento, nas primeiras idades, o volume e tamanho de vazios na zona de transição são mais fracos em resistência, Fig. 4. Contudo, aumentando-se a idade, a resistência da zona de transição pode tornar-se igual ou até mesmo maior do que a resistência da matriz de argamassa (MEHTA, P. Kumar e MONTEIRO, Paulo J., 1994).

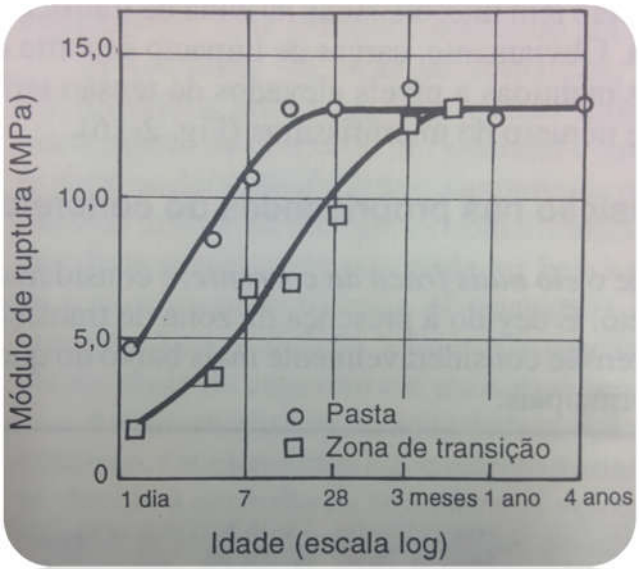

Figura 4 - Efeito da idade na resistência de aderência (zona de transição) e na resistência da matriz da pasta de cimento
Fonte: (MEHTA, P Kumar e MONTEIRO, Paulo J., 1994)

Isso poderia acontecer como resultado da cristalização de novos produtos nos vazios da zona de transição por meio das reações químicas lentas entre os

constituintes da pasta de cimento e o agregado, originando silicatos de cálcio hidratado no caso de agregados silicosos ou carboluminatos hidratados em caso de calcário. Estas interações contribuem para a resistência, pois tendem a reduzir a concentração de hidróxido de cálcio na zona de transição (MEHTA, P. Kumar e MONTEIRO, Paulo J., 1994).

2.1.3 Composição Química

O cimento Portland é um material pulvurulento, constituído de silicatos e aluminatos de cálcio, praticamente sem cal livre. Tais silicatos e aluminatos complexos, ao serem misturados com água, hidratam-se, produzindo o endurecimento da massa, que pode então oferecer elevada resistência mecânica (PETRUCCI, Elagio G., 1973).

O cimento Portland resulta da moagem do clínquer, que é obtido pelo cozimento até fusão incipiente ($\pm 30\%$ de fase líquida) de mistura do calcário e argila de forma convenientemente dosada e homogeneizada, de forma tal a possibilitar que toda cal se combine com os compostos argilosos, sem que, após o cozimento, origine-se cal livre em quantidades superiores aos limites aceitáveis (PETRUCCI, Elagio G., 1973).

O clínquer é o principal componente do cimento e se relaciona com a resistência mecânica do material depois de receber água. Por sua vez, o gesso tem a função de prolongar o tempo de pega do cimento. Sem esta adição, o tempo seria curto demais, o que impossibilitaria trabalhar com ele e isso obriga, em todos os momentos, acrescentar gesso ao cimento. Ou seja, o gesso faz parte e está presente desde os primeiros tipos de cimentos Portland (INFOFÁCIL, 2010).

A qualidade do concreto dependerá exclusivamente da qualidade dos materiais que o compõe. Desta forma, quando se deseja um concreto superior, uma seleção minuciosa dos materiais deve ser feita (PETRUCCI, Elagio G., 1973).

O principal fator a ser posto em evidência é a uniformidade. Portanto, prefere-se sempre contar com um produto de qualidade média do que com um produto que oscile bruscamente de ótimo para regular. Após a mistura, o concreto deve ser transportado, lançado no interior das formas e adensado corretamente (PETRUCCI, Elagio G., 1973).

A hidratação do concreto continua por tempo demasiado longo e é preciso que as condições do ambiente favoreçam as reações que então se processam, sendo este um dos últimos cuidados a serem tomados com o concreto. Este fenômeno é chamado de tempo de *cura* do concreto (PETRUCCI, Elagio G., 1973).

2.1.4 Densidade

A densidade absoluta do cimento Portland é considerada 3,15, entretanto, esta densidade está sujeita a sofrer diversas variações de valores sutilmente inferiores, pois nas compactações e manuseios costumeiros, sua densidade aparente é de ordem 1,5. A densidade do cimento Portland em pasta varia de acordo com o tempo e, aumenta à medida que há progressões durante seu processo de hidratação. Este processo recebe o nome de *retração* e ocorre nas pastas, argamassas e concreto podendo atingir, em 24 horas, cerca de 7 mm por metro na pasta pura, 4,5 mm por metro na argamassa-padrão e 2 mm por metro em concretos dosados a 350 kg de cimento por metro cúbico de concreto (CIMENTO PORTLAND, 2013).

2.1.5 Tipos de Concreto

- **Concreto Convencional:** é utilizado na grande maioria das obras, sejam estas, civis, industriais ou até mesmo em peças pré-moldadas. Chama-se Concreto Convencional porque o seu método de preparo é tão somente lança-lo em formas utilizando para isso carrinhos de mão, gericas, gruas e outros. Sua consistência seca e sua resistência variam de 5,0 em 5,0 MPa e a partir de 10,0 até 40,0 MPa. O aumento da durabilidade e vida útil das obras, redução de custos e melhor aproveitamento das áreas disponíveis são suas principais vantagens.

- **Concreto Leve:** sua densidade varia entre 400 a 1800 kg/m^3. Os tipos mais comuns encontrados desse concreto são: concreto celular espumoso, concreto com isopor e concreto com argila expandida. Geralmente aplicado em enchimento e regularização de lajes, pisos e elementos de vedação. Pode-se citar como vantagens principais

deste concreto, a redução do próprio peso e isolamento termoacústico.

- **Concreto Pesado:** sua principal característica é a alta densidade que varia entre 2.800 e 4.500 kg/m^3. Esta característica é alcançada por meio de agregados especiais, normalmente a hematita. Sua aplicabilidade é direcionada a gasodutos, hospitais e usinas nucleares sendo utilizado como contrapeso e sua principal vantagem é funcionar como isolante radioativo.

- **Concreto com Adição de Fibras:** em seu preparo geralmente são utilizadas fibras de nylon, polipropileno e aço. Isso depende única e exclusivamente das exigências e condições de cada projeto. Concretos que são alcançados por meio desta técnica diminuem os efeitos da fissuração por retração. Aplicam-se a obras civis especiais e pisos industriais. Possui vantagens como o aumento da durabilidade das obras no tocante à abrasão e desgaste superficial e melhora a resistência à tração do concreto podem ser citadas. Além destas vantagens este concreto também pode ser utilizado em pistas de aeroportos (TIPOS DE CONCRETO, 2013).

2.2 Sistemas em Placas de Concreto para Pisos e Pavimentos

2.2.1 Tipos de Pavimentos de Concreto

Os pavimentos de concreto são aqueles cuja camada de rolamento (ou revestimentos) é feita com concreto (este produzido com agregados e ligantes hidráulicos), que por sua vez podem ser feitos utilizando-se de diversas técnicas de manipulação e elaboração do concreto, como, por exemplo, pré-moldagem ou produção *in loco*, onde cada uma apresenta particularidades de projeto, execução, operação e manutenção. A Tab. 1 (página seguinte) apresenta os diversos tipos de pavimentos de concreto relacionados neste texto (BALBO, José T., 2009).

Tabela 1 - Tipos de pavimento de concreto em placas

Denominação	Símbolo	Principais características estruturais e construtivas
Pavimento de concreto simples	PCS	Concreto de alta resistência em relação a concretos estruturais para edifícios, que combate os esforços de tração na flexão ocasionados na estrutura, por não possuir armaduras para isso. A presença de juntas serradas de contração (para o controle da retração) pouco espaçadas é marcante.
Pavimento de concreto armado	PCA	Concreto que trabalha em regime de compressão no banzo comprimido, mas sem sofrer esmagamento. No banzo tracionado estão as armaduras resistentes aos esforços de tração, o que faz dele um concreto convencional armado. Há juntas serradas, porém de modo mais espaçado que no PCS.

Fonte: BALBO, José T., 2009

2.2.2 Pavimentos de Concreto Simples

Os pavimentos de concreto simples, ou seja, pavimentos não armados são constituídos de placas de concreto moldadas *in loco*, algumas horas após a moldagem

do concreto, e definidas por serragem de juntas transversais e longitudinais, Fig. 5. Essas placas encontram-se sobre um sistema de apoio constituído da base e esta, eventualmente, localiza-se sobre uma sub-base e do subleito. Diversos tipos de concreto podem ser utilizados na construção dessas placas, como o Concreto Convencional (CCV), o Concreto de Alta Resistência (CAD) e o concreto compactado com rolo (CCR) (BALBO, José T., 2009).

O principal fator que motiva a serragem das juntas igualmente espaçadas é o controle da retração hidráulica na massa de concreto fresca, de grande área e volume, exposta às condições ambientais mais desfavoráveis possíveis (sol, chuva, vento), se comparadas às condições de cura de concretos em estruturas corriqueiras. Evidentemente, tal corte induz a fissuração por retração hidráulica da massa fresca de Cimento Portland (CCP) localizada na área exata dessa junta, digamos, “enfraquecida”, pois a corrente se rompe justamente no elo mais fraco. Estas conformações delimitam verdadeiras placas de concreto e a estrutura de pavimento estará bastante condicionada a essa condição geométrica para apresentar suas respostas às cargas que são impostas pelo pavimento (BALBO, José T., 2009).

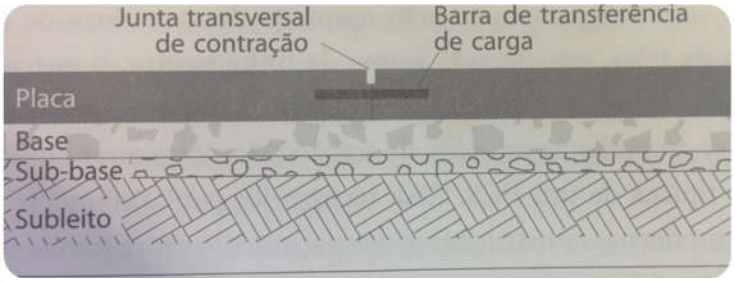

Figura 5 - Placas de pavimento de concreto simples
Fonte: BALBO, José T., 2009

2.3 Tecnologia de Concretos Aplicada à Construção de Pavimentos

2.3.1 Propósitos Básicos na Abordagem da Questão Tecnológica dos Concretos

Em julho de 1963, aconteceu na cidade do Rio de Janeiro a 4ª Reunião de Pavimentação, no auditório do hoje extinto Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Nesta reunião, discutiu-se a interdisciplinaridade entre tecnologia de concreto e análise estruturação de pavimentos, pois é necessário ampliar no conhecimento a certeza de que a ausência de controle de diversos aspectos ocasiona

efeitos maléficos ao comportamento estrutural e ao desempenho desses pavimentos, sejam estes efeitos maléficos por falta de completitude de projetos ou até mesmo descaso com aspectos essenciais de controle tecnológico (BALBO, José T., 2009).

Concretos produzidos a base de qualquer tipo de ligantes hidráulicos, exigem estrito controle tecnológico para que desempenhem de forma satisfatória as funções para as quais são destinados, como, revestimentos ou como base de pavimentos (BALBO, José T., 2009).

O comportamento do concreto seco e endurecido não se limita a questões relacionadas ao controle da resistência especificada em projeto, principalmente como pavimento moldado *in situ*. As características atreladas a concretos de pavimentação que necessitam de controle tecnológico rigoroso, sem o qual o pavimento opera com falhas funcionais ou estruturais, sendo algumas manifestas de forma precoce, encontram-se na Tab. 2 (BALBO, José T., 2009).

Tabela 2 - Principais características de concretos de pavimentação potencialmente sujeitas a controle estrito

Estado 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 e textura inadequada
	Retração plástica	Evitar fissuras de superfície	Degradação estrutural
Endurecimento	Retração de secagem	Evitar fissuras de contração não programadas	Ruptura precoce
	Resistência elástica	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 e corrosão de armaduras
	Expansão térmica	Efeitos relacionados a cargas ambientais	Empenamento não controlado

	Abrasividade	Qualidade superficial	Perda de qualidade funcional

Fonte: BALBO, José T., 2009

Em razão da tecnologia disponível para controle tecnológico, da ausência de especificação adequada e de prazos e custos incompatíveis com os padrões da obra, nem todas as características apontadas na Tabela 2 poderão ser controladas em todas as obras. Por exemplo, os ensaios de fadiga apresentam alguns inconvenientes: são lentos e exigem tratamento estatístico específico. Além disso, exigem equipamentos e técnicos especializados. Desta forma, recomenda-se este tipo de ensaio para autoestradas e longos corredores urbanos de ônibus (BALBO, José T., 2009).

2.3.2 Tipos de Concretos Empregados em Pavimentação

Amplamente conhecidos como materiais de construção, provavelmente o mais popular, o concreto, de forma geral, é definido como uma mistura devidamente proporcional de agregados graúdos, agregados miúdos, ligante hidráulico – o tradicional cimento Portland, embora cimentos siderúrgicos e pozolânicos já estejam em uso em alguns países – e água, além da eventual introdução de minerais durante a moagem do clínquer e de aditivos para inibir ou ressaltar, temporariamente, algumas características das misturas com menção especial aos aditivos plastificantes (redutores de água na mistura), dos retardadores e aceleradores de pega (BALBO, José T., 2009).

Concretos de alto desempenho (CAD) desta forma denominados por apresentarem algumas propriedades melhoradas, se comparados aos concretos convencionais, elaborados diuturnamente até a década de 1980. Nos CAD em geral, há o emprego de cimento de maior finura e adições minerais, por exemplo, escórias granuladas moídas, cinzas volantes, sílica ativa, metacaulim e cinzas de casca de arroz. Assim, apresenta permeabilidade muito baixa, o que lhes conferem vantagens em diversos aspectos relacionados à durabilidade dos concretos armados. Apesar disso, a preocupação com questões acerca da durabilidade do concreto tem crescido recentemente, como é o caso da reação álcalis-agregado (BALBO, José T., 2009).

Novos paradigmas foram inaugurados sobre a questão da resistência aos esforços repetitivos em CAD, que se mostrou sensível àquela dos Concretos

Convencionais - CV. Tais paradigmas foram expostos pela primeira vez no ano de 2004, durante investigações de Cervo sobre resistência à fadiga dos Concretos Convencionais (CV) e dos CAD no Brasil. Desta forma, fica claro o desempenho inferior dos concretos “de alto desempenho”, provavelmente ocasionado por sua maior fragilidade e suscetibilidade à nucleação de fissuras em sua microestrutura (BALBO, José T., 2009).

Em termos de resistência, os concretos tradicionais ou convencionais para pavimentos são em geral, diferentes dos concretos conhecidos como estruturais. Normalmente, concretos deste tipo, são avaliados por meio de sua resistência à compressão, para Pavimentos de Concreto Simples (PCS) e *Whitetopping* (WT), sendo os concretos dosados desta forma para atender a determinadas resistências à tração na flexão. Anteriormente, para os casos mais comuns, exigiam-se concretos para pavimentos cuja resistência era superior a 32MPa. Todavia, para pavimentos de Concreto Armado (PCA) ou Pavimentos de Concreto Pré-moldado (PCPM), imperam padrões de concretos de até 30MPa em compressão, ainda assim, levando em consideração exigências relacionadas a abrasão superficial (BALBO, José T., 2009).

Os Concretos Compactados com Rolo (CCR) apresentam diferenças e particularidades. Já foram denominados como “concreto magro” *(lean concrete)*, “concreto rolado” *(rolled concrete)* e *econocrete* (EUA). Modestamente, seu emprego cresceu no Reino Unido, como material preferencial para bases de pavimentos asfálticos. Recentemente, os CCR têm se tornado alvos de novas abordagens em sua formulação e emprego (BALBO, José T., 2009).

Um material conceitualmente semelhante ao Concreto Reforçado com Fibras (CRF) é o concreto empregado na moderna fabricação de blocos de concreto com sistemas hidráulicos de prensagem (os blocos também podem ser fabricados por meio de uso das técnicas tradicionais, do tipo *dormido* ou *virado*, com concretos mais plásticos). Tal semelhança está restringida à sua característica de baixa plasticidade ou trabalhabilidade, já que a prensagem é altamente eficiente para seu adensamento, exigindo, contudo, sua desforma imediatamente - que é possível para um concreto seco. No mais, diferem-se muito em distribuição granulométrica, cura e controle de resistência para blocos de pavimentos (BALBO, José T., 2009).

Embora sejam de aplicabilidade mais restrita no que se trata de pavimentação, ainda restam dois tipos de concreto que merecem ser mencionados aqui. O primeiro deles é o concreto reforçado com fibras (CRF), que, na realidade, aparentemente

representa pouco ganho em termos de resistência estática ou à fadiga, levando em conta teores tradicionais de fibras empregadas em concretos projetados, por exemplo. Todavia, existem situações especiais para sua aplicação, como quando há necessidade ou vantagem de maior tenacidade do material para a aplicação (BALBO, José T., 2009).

Mesmo não sendo considerados pavimentos em termos geotécnicos tradicionais, há ainda, o caso de concretos ditos autonivelantes (CAN), que em diversas situações aplicados foram sobre tabuleiros de pontes e viadutos. Concretos do tipo CAN apresentam elevadíssima plasticidade, que permite seu lançamento e sua moldagem não sendo necessário o uso de equipamentos de adensamento, o que, no entanto, possui restrições do ponto de vista de declividades transversais e longitudinais em pavimentação (BALBO, José T., 2009).

O Engenheiro, em cada obra específica, só descartará de um ou outro tipo de concreto com base em restrições oriundas da natureza técnica e econômica, sendo estas consideradas de forma concomitante. Não se poderá descartar, *a priori*, a aplicabilidade de qualquer tipo de concreto em bases de revestimentos de pavimentos. Em grande verdade, na atualidade, há uma incomensurável necessidade de se reutilizar materiais reciclados, como, entulhos de demolição e construção. O Engenheiro deve manter a mente aberta e discernir corretamente o tipo de concreto e seus componentes passíveis de reutilização em cada obra específica (BALBO, José T., 2009).

A causa raiz do problema enfrentado em concretos destinados a pavimentos são o aparecimento de fissuras e estas por sua vez devem ser estritamente controladas. Naturalmente o concreto possui tendência a fissurar-se, e quando estas fissuras estão fora do controle causam, antes de tudo, um razoável prejuízo estético na percepção do usuário que não conhecedor das causas, por sua vez, tende a culpar a tecnologia como um todo. Além disso, as fissuras geram problemas estruturais de difícil solução e a redução da durabilidade, inclusive funcional dos pavimentos de concreto (BALBO, José T., 2009).

2.3.3 Propriedades do Concreto Fresco

2.3.3.1 Trabalhabilidade

Entende-se por trabalhabilidade do concreto, a resistência que a própria massa de concreto opõe ao seu movimento, por ação da gravidade. Em práticas comuns, a trabalhabilidade é dada pela medida da consistência do concreto fresco, o que, para concretos convencionais, normalmente é feito com cone de Abrams, por meio do qual se obtém a medida do abatimento (*slump*), que equivale à diferença entre a altura inicial do concreto (do tronco de cone) e a sua altura final depois da retirada do cone de compactação que por sua vez envolve a massa fresca, Fig. 6 (BALBO, José T., 2009).

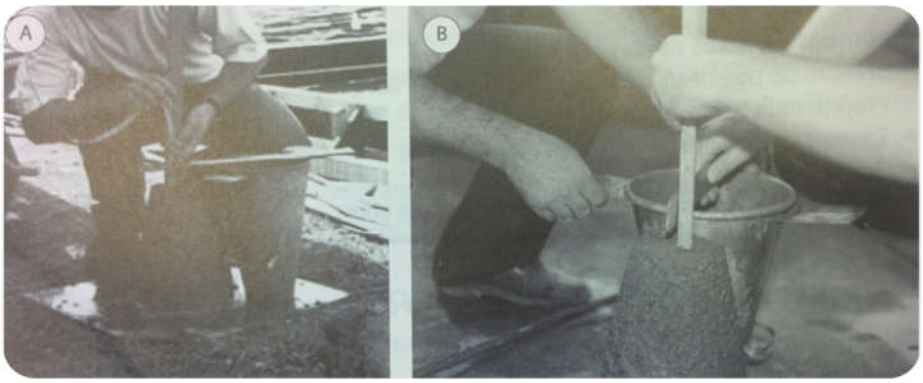

Figura 6 - (A) controle do abatimento em obra; (B) e em laboratório (dosagem)
Fonte: (BALBO, José T., 2009)

Um concreto é dito seco se o abatimento for pequeno e fluido se for grande. A Tab. 3 apresenta os valores típicos de abatimento no tronco de cone para concretos.

Tabela 3 - Valores típicos para consideração de concretos secos ou fluidos

Tipo	Abatimento (mm)	FC
Seco	0 a 20	< 0,75
Normal	20 a 160	0,75 a 0,97
Fluido	> 160	> 0,97

Fonte: BALBO, José T., 2009

No que tangencia pavimentação, dependendo do tipo e do processo de produção do pavimento de concreto, os valores de abatimento no tronco de cone podem ser bastante diferentes, conforme as sugestões da Tab. 4, página seguinte. Todavia, o abatimento seja um dos parâmetros de dosagem e controle, é preciso lembrar que seu valor entre a usina dosadora (ou dosadora-misturadora) e o local de

aplicação em pista poderá sofrer sensíveis alterações. Alguns dos fatores de ordem natural, de transporte ou relacionados à composição do concreto – como dias escaldantes, ou seja, dias excessivamente quentes, distâncias de transporte e uso de adições no concreto, como a sílica ativa – tende a causar perda significativa do abatimento na massa fresca, da mesma forma que se dá com o uso de fibras (BALBO, José T., 2009).

Tabela 4 - Valores típicos de abatimento para concretos em pavimentação

Tipo de pavimento	Tipo de concreto	Método construtivo	Abatimento (mm)
PCS WT	CV	Fôrmas-trilho	60-90
		Régua vibratória e fôrmas laterais desmontáveis	60-90
		Fôrmas deslizantes	0-40
		Laser screed	60-100
	CCR	Rolo liso vibratório	0
PCA	CV	Régua vibratória e fôrmas laterais	60-100
		Fôrmas deslizantes	50-70
		Laser screed	60-100
PCAC	CV	Fôrmas de trilho	60-100
		Régua vibratória e fôrmas laterais	60-90
		Fôrmas deslizantes	40-60
PCPM	CV	Fôrmas metálicas	60-100
PCPRO	CV	Régua vibratória e fôrmas laterais	60-90
WTUD	CAD	Fôrmas deslizantes	20-60
		Laser screed	80-160
		Fôrmas-trilho	60-90
		Régua vibratória e fôrmas laterais	80-160

Fonte: BALBO, José T., 2009

2.3.4 Propriedades do Concreto Fresco

2.3.4.1 Retração por Secagem e seu Controle

A *retração por secagem* ou *retração hidráulica*, é resultante da secagem do concreto, o que abrange a retração *autógena* e a *volumétrica*, por contração. Esse fenômeno está associado à utilização da água na dosagem durante sua fase inicial de hidratação dos ligantes hidráulicos, e caracteriza-se pela perda de água da massa para o ambiente, o que se relaciona com as condições climáticas (BALBO, José T., 2009).

A água de amassamento do concreto é tradicionalmente dividida em três partes e com funções distintas: (a) a *água de cristalização*, responsável pelas reações que formarão a parte sólida da pasta de cimento; (b) a *água de gel*, que é aquela adsorvida aos cristais hidratados e que serve de veículo para os compostos que dão continuidade às reações de hidratação, que formará o gel de cimento hidratado; (c) a *água livre* ou *água capilar*, que, somada ao gel de cimento, juntas, formarão a pasta de cimento (BALBO, José T., 2009).

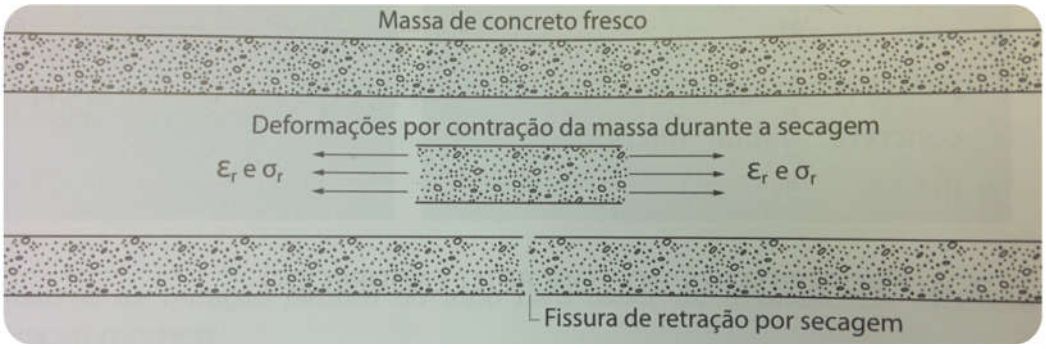

Figura 7 - Mecanismo de ocorrência de fissura de retração por secagem
Fonte: BALBO, José T., 2009

A interação direta do material com o meio ambiente elimina água adsorvida e esta "desidratação" é a principal responsável pela retração da pasta de cimento por secagem ou retração hidráulica.

Macroestruturalmente, o mecanismo de fissuração parece bastante simples, conforme apresentado na Fig. 7, página seguinte. A fissura de retração por secagem acontece no exato momento em que as deformações de contração na massa de concreto igualam-se à capacidade de deformação em tração desenvolvida até dado momento pela hidratação de compostos anidros, ou seja, força contrária exercida contra resistência. O processo de contração está diretamente ligado aos processos químicos em curso durante as primeiras horas de hidratação da solução supersaturada, mesmo ao se garantir a manutenção volumétrica da água de

amassamento do concreto por meio de técnicas de cura adequadas a cada circunstância específica (BALBO, José T., 2009).

Em pavimentos de concreto moldados *in loco* em forma de placas, e que apresentam grande volume de massa fresca, uma das consequências mais comuns é o surgimento de fissuras transversais ou longitudinais, no tocante a direção preferencial, conforme Fig. 8.

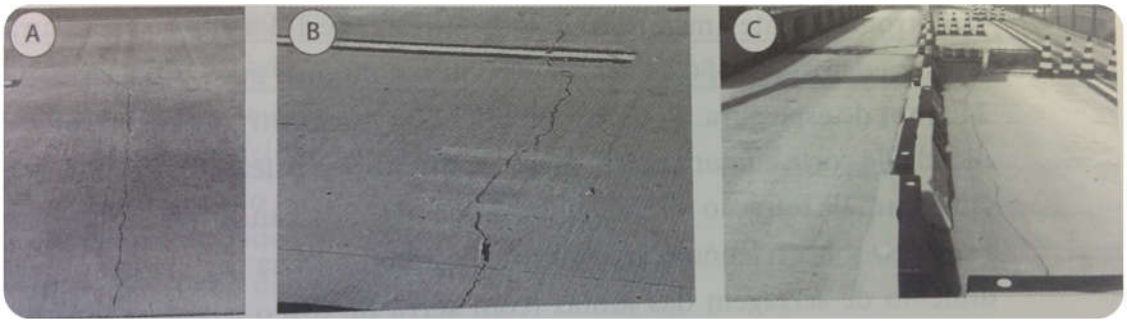

Figura 8 - Manifestação da retração por secagem (transversal, A e B; longitudinal, C)
Fonte: BALBO, José T., 2009

2.3.4.2 Resistência Estática

Pavimentos de concreto, quando moldados *in loco* ou pré-moldados, possuem padrões de controle convencionais de sua resistência os ensaios de compressão e os ensaios de tração na flexão, via de regra, conforme o tipo de pavimento.

Embora vantajosos em determinados aspectos, ensaios de tração indireta realizados por Compressão Diametral, ainda não são medidas comumente utilizadas em obras. As normas nacionais que governam tais ensaios são indicadas na Tab. 5 (BALBO, José T., 2009).

Do ponto de vista da Engenharia, a resistência pode ser vista como a tensão aplicada que impõe ao material certa deformação correspondente à sua deformação de ruptura. A resistência do material compósito cimento/agregados não é a mesma da pasta de cimento nem mesmo a do agregado. Ao tratar da resistência à tração do concreto, existe grande interferência da condição de contato entre a pasta de cimento e os agregados graúdos, devendo levar sempre em conta a relação agregado/cimento (BALBO, José T., 2009).

Tabela 5 - Ensaios de resistência para concretos de pavimentação

Tipo de pavimento	Tipo de ensaio	Procedimentos
PCS, WT, PCAC e WTUD	Tração na flexão (dois cutelos)	MB 3483 – NBR 5738
PCA, PCPM e PCPRO	Compressão simples (uniaxial)	NBR 5739

Fonte: BALBO, José T., 2009

2.3.4.2.1 Resistência à Compressão

Para especificação de projeto, dosagem e controle tecnológico, os ensaios de resistência à compressão são essenciais para o caso dos PCA, dos PCM e dos Pavimentos de Concreto Protendido (PCPRO).

A resistência característica do concreto à compressão, logo no primeiro caso, é parâmetro de projeto estrutural, e a área de aço na seção transversal armada depende exclusivamente desse valor. Já os casos relacionados aos PCPRO, essa característica é fundamental por dois aspectos: resistência disponível em combate aos esforços de tração e resistência exigida para suporte dos esforços de protensão. O dimensionamento estrutural da seção da placa do pavimento, em todos os casos, dependerá da resistência à compressão (BALBO, José T., 2009).

2.3.4.2.2 Resistência à Fadiga

A modelagem à fadiga de concretos passou a ser considerada somente na década de 1930, ao se tratar de questões estruturais dos pavimentos de concreto em placas.

A ruptura quando ocasionada por fadiga é atrelada a um processo de microfissuração progressiva na estrutura de um material, cuja microestrutura cristalina ou amorfa, degrada-se paulatinamente, resultando na fratura da peça estrutural, evidenciada por uma ou mais superfícies de ruptura (BALBO, José T., 2009).

2.3.4.3 Tenacidade

Tenacidade é a particularidade ou estado do que não se pode quebrar. Dessa forma, entende-se como *tenacidade* a energia necessária para romper o material, ou seja, é o produto da força que é aplicada pelo deslocamento sofrido até o momento da ruptura. A tenacidade não pode ser confundida com a resistência, já que materiais possuidores de baixa resistência podem apresentar maior tenacidade do que materiais com maior resistência (BALBO, José T., 2009).

2.3.4.4 Resistência à Abrasão

O desgaste superficial dos concretos ocasionados por intensa abrasão (atrito a seco) de veículos pesados, como no caso dos pavimentos portuários, aeroportuários e pisos industriais, entre outros, tem se tornado cada vez mais um dos principais objetos de estudo no tocante a durabilidade e de desempenho dos pavimentos de concreto (BALBO, José T., 2009).

É fato que excessivos esforços horizontais e de giro de pneus pesados sobre as superfícies de concreto provocam esse desgaste, resultando em perda de argamassa na superfície, expondo assim os agregados e, nos estágios mais avançados, exposição da armadura de concretos armados.

A abrasão ainda pode ser agravada pela possível segregação e exsudação do concreto no período de lançamento e adensamento, conforme Fig. 9 à esquerda. Os resultados mais frequentes desse desgaste são (BALBO, José T., 2009):

i. Perda da textura superficial – ranhuras – do concreto, desfavorecendo a aderência pneu-pavimento;
ii. Existência de partículas soltas na superfície, o que pode provocar ingestão de detritos por turbinas de jatos em pátios e pistas táxi-aéreas;
iii. Possível polimento de agregados, conforme Fig. 9 à direita, na sequência do processo, quando estes, por sua vez, não oferecem grande resistência, como, calcários sedimentares.

Figura 9 - Esquerda - Abrasão inicial e formação de lamelas por exsudação do concreto; Direita - Desgaste da argamassa na superfície do pavimento de concreto, com exposição dos agregados
Fonte: BALBO, José T., 2009.

2.4 Fundamentos Teóricos para Aprendizagem de Tensões em Placas

2.4.1 Forças Atuantes

Forças atuantes sobre a matéria são externas ou internas. Forças externas são aquelas que se distribuem por sobre a superfície da matéria, como, por exemplo, pressões de contato e pressões hidrostáticas. E, de forma genérica são chamadas de força de superfície. Já as forças internas distribuem-se pelo volume do semiespaço elástico, como as forças gravitacionais e as forças de inércia (BALBO, José T., 2009).

2.4.2 Deformação e Elasticidade

Um determinado material é dito elástico quando possui a propriedade de não guardar deformações residuais ou plásticas. Ou seja, é a propriedade de responder aos esforços impostos em sua faixa de comportamento resiliente. Diz-se elasticidade linear quando dentro de seus limites resilientes, a relação entre esforço (σ) aplicado no material e a respectiva deformação (ε) sofrida é constante. A esta relação dá-se o nome de *módulo de deformação, módulo de elasticidade ou de resiliência.* O módulo de elasticidade é definido pela seguinte relação (BALBO, José T., 2009).

$$\epsilon = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_i \quad \sigma_0}{\varepsilon_i \quad \varepsilon_0} \tag{1}$$

Todavia, o módulo de elasticidade não é uma propriedade da matéria. A propriedade guardada pela matéria é a de se deformar, ou seja, de acumular energia na deformação elástica.

2.4.3 Esforços de Retração no Concreto

Os estados de contração na massa de concreto lançado em pista para placa do pavimento são impostos pela retração ocasionada por secagem e retração térmica. A primeira durante a fase inicial de cura, após o final da pega, e a segunda durante a vida de serviço do pavimento. O deslocamento horizontal da massa fresca é parcialmente contido pelo atrito entre esta e o topo da base do pavimento, onde forças horizontais são geradas na massa de concreto, conforme Fig. 10, página seguinte (BALBO, José T., 2009).

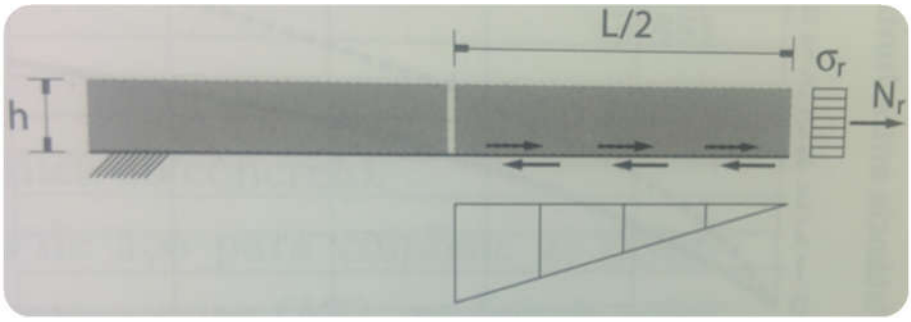

Figura 10 - Forças de retração na placa de concreto
Fonte: BALBO, José T., 2009

Chamado de “L” o comprimento da placa; “h” sua espessura; "γ" o peso específico do concreto; e “c” o coeficiente de atrito entre a placa de concreto (fundo) e a superfície da base de apoio (geralmente admitido como 1,0 para papel betumado ou lençol de polietileno, 1,5 para bases granulares e cimentadas e 2,5 para superfície asfáltica), a força horizontal (por unidade de comprimento de seção transversal) induzida pela retração é calculada pela expressão (BALBO, José T., 2009):

$$N_r = \gamma. \ .c.\frac{L}{2} = \sigma_s.A_s \tag{2}$$

onde σ_s é a tensão no aço (que de forma econômica é tomada como sua resistência (f_s) e A_s é a área de aço na seção transversal considerada para o combate aos esforços de retração (por unidade de largura)).

2.5 Sustentabilidade

As discussões sobre o meio ambiente tomaram força na Conferência das Nações Unidas sobre o Homem e o Meio Ambiente, que aconteceu em Estocolmo, em 1972, o que deixou claro que as questões ambientais e econômicas devem andar juntas. Com o crescimento das discussões pelas conferências internacionais nas últimas décadas, o termo sustentabilidade cresceu nos debates.

O discurso dos cientistas sociais destaca a eficiência da sustentabilidade em torno de eficiência sobre os recursos do planeta. A alocação de recursos naturais deve respeitar tanto as preferências individuais como as econômicas, sem ter distorções no mercado, as quais podem ser corrigidas pelo entendimento sobre os custos ambientais (RATTNER, 1999).

Na construção civil o termo “sustentabilidade” também é bastante falado, a partir da utilização de novos materiais que reduzam o impacto ambiental e contribuam para a redução dos recursos naturais.

Segundo Gabriela Di Giulio (2007), o caminho para a descoberta de novos materiais passa pela pesquisa, seja por parte do setor público ou do privado. Uma área de grande interesse que surgiu nas últimas três décadas foi a Ciência ou Engenharia dos Materiais, o que reporta a “novos materiais”, área de interesse acadêmica.

O material mais utilizado na construção civil em dias atuais é o concreto, que é composto por uma mistura de cimento, areia, pedra e água. Pesquisadores têm buscado por materiais com desempenho mecânico e de durabilidade cada vez maiores.

A alta resistência mecânica e durabilidade encontrada no estado endurecido e a trabalhabilidade no estado fresco pode ser encontrada na produção de concretos, associando aditivos superplastificantes que auxiliam na obtenção de uma mistura com baixa relação água/cimento (menor que 0,30).

Figura 11 - Gestão de Resíduos Sólidos
Fonte: Envolverde, 2013

2.6 Polímeros e suas Características

A etimologia da palavra plástico é grega *"plastikós"*, que significa adequado à moldagem, são materiais sintéticos ou derivados de substâncias naturais, geralmente orgânicas, obtidas nos dias de hoje, em grande parte, a partir dos derivados de petróleo. Os plásticos originam-se a partir da união de milhares de monômeros, ou seja, originam-se a partir da união de grandes cadeias moleculares, que recebem o nome de polímero. São produzidos por meio de um processo químico conhecido como polimerização.

Materiais plásticos estão sendo cada vez mais utilizados nas indústrias. É comum observar que peças, antes confeccionadas a partir de outros tipos de materiais, em particular o metal, vidro ou madeira, estão sendo substituídas por material plástico no ato de sua confecção. Tal acontecimento se deve por suas características, que são: baixo custo, peso reduzido, elevada resistência, variação de formas e cores; além disso, por muitas vezes, apresenta desempenho superior em relação aos materiais antes utilizados (A ORIGEM DO PLÁSTICO, 2013).

De acordo com Antônio A. Gorni (2003) existem diversas formas de se dividir os polímeros. A classificação de acordo com as características mecânicas, provavelmente é a mais importante. Ela decorre, na verdade, da configuração específica das moléculas dos polímeros.

Analisando este aspecto, os polímeros podem ser divididos em termoplásticos, termorrígidos (termofixos) e elastômeros (borrachas).

- **Termoplásticos:** São os chamados plásticos, constituindo a maior parte dos polímeros comerciais e a principal característica desses polímeros é poder ser fundido por diversas vezes. Dependendo do tipo do plástico, também pode dissolver-se em diversos solventes. Assim, sua reciclagem se torna possível, sendo esta uma característica bastante desejável nos dias atuais. As propriedades mecânicas variam de acordo com o plástico: em temperatura ambiente, podem ser maleáveis, rígidos ou mesmo frágeis.
  Estrutura molecular: moléculas lineares são dispostas na forma de cordões soltos, mas unidos como num novelo de lã.
  Exemplos: polietileno (PE), polipropileno (PP), poli(tereftalato de etileno) (PET), policarbonato (PC), poliestireno (PS), poli(cloreto de vinila) (PVC), poli(metilmetacrilato) (PMMA)...

- **Termorrígidos ou Termofixos:** Estes são rígidos e frágeis, sendo muito estáveis a variações de temperatura que podem ocorrer. Uma vez prontos, jamais se fundem. O aquecimento deste polímero, após acabado, a altas temperaturas promove a decomposição do material antes de sua fusão. Assim, sua reciclagem torna-se difícil e complicada.
  Estrutura molecular: certamente, os cordões estão ligados fisicamente entre si, o que forma uma rede ou um reticulado. Eles estão presos entre si por meio de numerosas ligações, não se movimentando com liberdade alguma, como é o caso dos termoplásticos. Pode-se comparar com uma rede de malha muito fina. **Exemplos:** baquelite, que é usada em tomadas e no embutimento de amostras nos laboratórios de metalografia; poliéster utilizado em carrocerias, caixas d'água, piscinas etc., na forma de plástico reforçado (*fiberglass*).

- **Elastômeros (Borrachas):** Classe intermediária entre os termoplásticos e os termorrígidos: apresentam alta elasticidade e, não são rígidos como

os termofixos. Sua reciclagem, assim como as dos termorrígidos, é difícil e complicada pela incapacidade de fusão.

Estrutura molecular: a estrutura é similar à do termorrígido, mas neste caso, existe um número menor de ligações entre os “cordões”. Ou seja, é como se fosse uma rede, mas com malhas bem mais largas que os termorrígidos.

Exemplos: pneus, vedações e mangueiras de borracha.

2.6.1 Comportamento Mecânico dos Polímeros

O comportamento e propriedades mecânicas dos polímeros podem ser descritos e especificados utilizando-se de muitos parâmetros já existentes para os metais - isto é, o módulo de elasticidade, limite de resistência à tração, resistência ao impacto e resistência à fadiga. O teste de tensão-deformação simples é utilizado para caracterização de alguns desses parâmetros mecânicos de diversos materiais poliméricos. Em grande parte, as características mecânicas dos polímeros são extremamente sensíveis à taxa de deformação, a temperatura e a natureza química do ambiente (quando há presença de oxigênio, água, solventes orgânicos etc). Modificações nas técnicas de testes e nas configurações de amostras utilizadas para os metais são necessárias para com os polímeros, em particular para materiais poliméricos extremamente elásticos, como, as borrachas (CALLISTER, 2002).

Tipicamente encontram-se três tipos de comportamento tensão-deformação em materiais poliméricos, tais comportamentos são representados na Figura 12. A curva A mostra o comportamento tensão-deformação de caracteres para polímeros quebradiços ou frágeis à medida que fraturam no trecho elástico. O comportamento mecânico de um material plástico, semelhante ao comportamento encontrado em materiais metálicos é expresso na curva B e a curva C é totalmente elástica; esta elasticidade é tipo borracha que, proporciona grandes deformações recuperáveis produzidas em baixos níveis de tensão e é apresentada por uma classe de polímeros denominados elastômeros (CALLISTER, 2002).

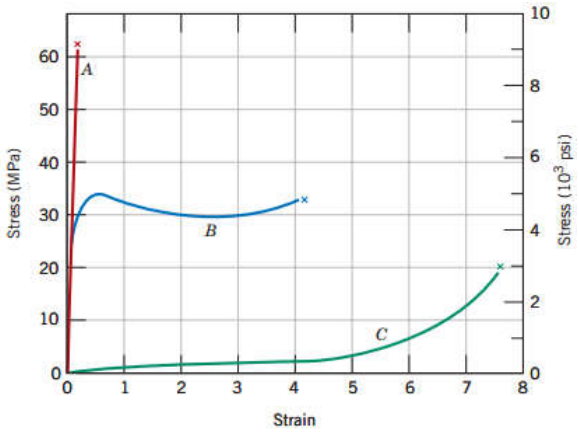

Figura 12 - Gráfico tensão-deformação
Fonte: Callister, 2002

Muitos dos aspectos mecânicos dos polímeros se diferenciam dos aspectos mecânicos dos metais. Por exemplo, o módulo altamente elástico dos materiais poliméricos pode se dar em um valor tão baixo quanto 7 MPa (10^3psi), mas pode ser executado em um valor elevado que gira em torno de 4 GPa ($0.6x10^6$psi) para alguns dos polímeros mais rígidos; para os metais, os valores dos módulos são ainda muito mais elevados variando entre 48 e 410 GPa ($7x10^6$ para $60x10^6$psi). A resistência a tração máxima para os polímeros gira em torno de 100 MPa (15.000 psi) - para algumas ligas metálicas o valor é de 4.100 MPa (600.000 psi). Materiais metálicos raramente possuem um alongamento superior a 100%, sendo que alguns polímeros com propriedades altamente elásticas podem atingir elongações superiores a 1.000% de seu tamanho original (CALLISTER, 2002).

2.6.2 Propriedades do Politereftalato de Etileno - PET

A propriedade mais importante do PET está ligada diretamente a seu peso molecular, pela qual podemos obter o número médio de unidades de repetição PET individuais, que são agrupadas a fim de formar uma corrente molecular única (PROPRIEDADES DO PET, 2013).

2.6.2.1 Morfologia

O estudo da forma e da estrutura dos polímeros envolve o arranjo, a forma, o tamanho e o efeito do cristal no polímero sólido. Pelo seu efeito nas propriedades finais do polímero sólido é que esta morfologia se torna extremamente importante (PROPRIEDADES DO PET, 2013).

Os polímeros podem ser:

- **Amorfos:** estes, não possuem forma determinada, ou seja, não são capazes de se cristalizar.

- **Semicristalinos:** geralmente conhecidos como polímeros cristalinos, estes são constituídos por regiões amorfas e cristalinas. Na região amorfa é possível deparar-se com completa desordem de moléculas, ao contrário das regiões cristalinas, onde os segmentos das cadeias moleculares encontram-se em perfeita ordem e estão estendidas e arranjadas de maneira ordenada, formando um empacotamento regular chamado cristalítico.

2.7 Materiais Compósitos

Diversas de nossas tecnologias modernas utilizam-se de materiais que necessitam de várias combinações de propriedades fora do comum e, tais propriedades não são supridas somente por ligas metálicas, cerâmicas e materiais poliméricos convencionais. Isto se comprova ao se empregar os materiais necessários em aeronaves, submarinos e veículos de transporte. Um exemplo claro disso é a busca incessante por materiais estruturais que possuam baixa densidade, alta rigidez, que sejam fortes, que demonstrem resistências à abrasão e ao impacto e, ao mesmo tempo possuam baixos índices de corrosão. Combinações como estas fornecem características formidáveis.

Compósitos são materiais multifásicos feitos de forma artificial, devendo suas fases constituintes, serem quimicamente diferentes estando separadas por interfaces

diferentes. Assim, grande parte das ligas metálicas e dos materiais cerâmicos não faz parte de tal definição, pois suas múltiplas fases são formadas por meio de fenômenos naturais.

De maneira engenhosa, cientistas e engenheiros combinam diversos metais, cerâmicas e polímeros no intuito de se obter e produzir uma nova linhagem de materiais com características excepcionais.

Materiais compósitos, em sua grande maioria, são constituídos somente por duas fases que são: matriz e fase dispersa. A fase matriz é contínua e envolve a outra fase, a fase dispersa. As propriedades dos compósitos são uma função das propriedades das fases constituintes, das suas quantidades relativas e da geometria da fase dispersa. A "geometria da fase dispersa" refere-se à forma das partículas, a seu tamanho, sua distribuição e sua orientação.

Verdadeiramente, materiais compósitos são projetados no intuito de demonstrar uma disposição ordenada de elementos a fim de tornar evidentes as melhores características de cada um desses elementos existentes em sua composição. Desta forma, a criação dos materiais compósitos visa melhorar arranjos ou combinações de características físico-mecânicas, como rigidez, tenacidade e resistências mecânicas à temperatura ambiente e à alta temperatura.

Com o conhecimento dos vários tipos de materiais compósitos, é possível compreender a dependência de seus comportamentos em relação às características, bem como, as quantidades relativas, de geometria/distribuição e as propriedades das fases constituintes. Isso permite obter materiais com propriedades superiores as encontradas em ligas metálicas, cerâmicas e materiais poliméricos. A Fig.13 demonstra (página seguinte) como eixo tabular com enrolamento de filamento é projetado para atender exigências específicas de rigidez.

A classificação dos materiais compósitos se dá por meio de um esquema simples mostrado na Figura 14, página seguinte. Este esquema consiste em três divisões, que são os compósitos reforçados com partículas, os compósitos reforçados com fibras e os compósitos estruturais e, ainda assim, existem, pelo menos, duas subdivisões para cada uma delas. Os compósitos reforçados com partículas, na fase dispersa, possuem eixos iguais. Isso significa dizer que as partículas possuem dimensões praticamente iguais em todas as direções; os compósitos reforçados com fibras, a fase dispersa possui geometria de uma fibra, ou seja, uma grande razão entre

o comprimento e o diâmetro. Já os compósitos estruturais são misturas de outros compósitos e materiais homogêneos (CALLISTER, 2002).

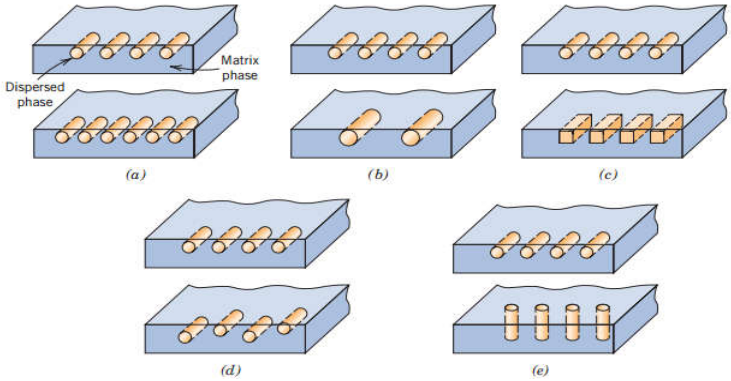

Figura 13 - Representações esquemáticas das várias características geométricas e espaciais de partículas da fase dispersa, que podem influenciar as propriedades dos materiais compósitos: (a) concentração, (b) tamanho, (c) forma, (d) distribuição e, (e) orientação
Fonte: (Callister, 2002 apud.Richard A. Flinn and Paul K. Trojan, Engineering Materials and Their Applications, 4th edition.Copyright © 1990 by john Wiley & Sons, Inc. Adapted by permission of John Wiley & Sons, Inc.)

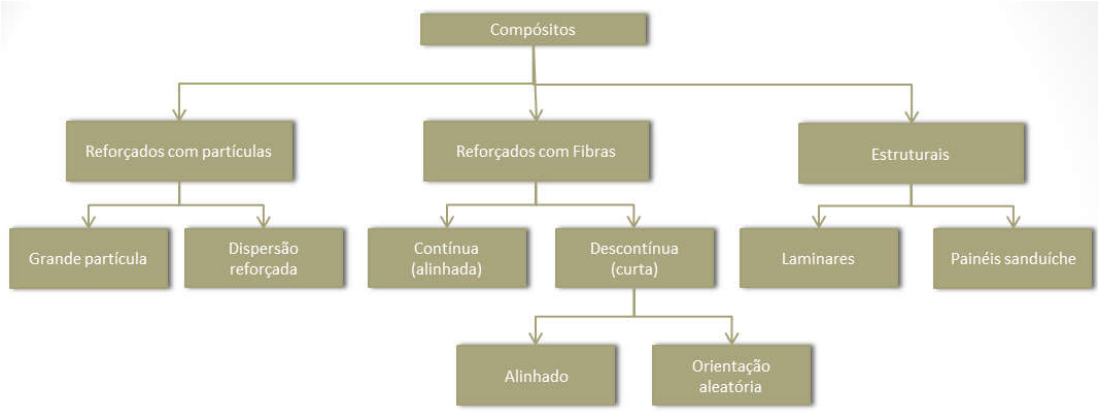

Figura 14 - Esquema classificatório dos vários tipos de materiais compósitos
Fonte: CALLISTER, 2002 - Adaptado pelo autor.

A base do comportamento dos concretos reforçados com fibras está no papel de atuação das fibras de ponte de transferência de tensão pelas fissuras. Fibras de baixo módulo de elasticidade e baixa resistência são eficientes em concretos que também possuam baixa resistência e baixo módulo e são para a obtenção de melhoria no estado fresco e no processo de endurecimento, atuando no controle de fissuração plástica em pavimentos.

As fibras de alto módulo e alta resistência, que são as fibras de aço, atuam como reforço do concreto endurecido e podem substituir a armadura convencional (ISAIA, Geraldo Cechella, 2005).

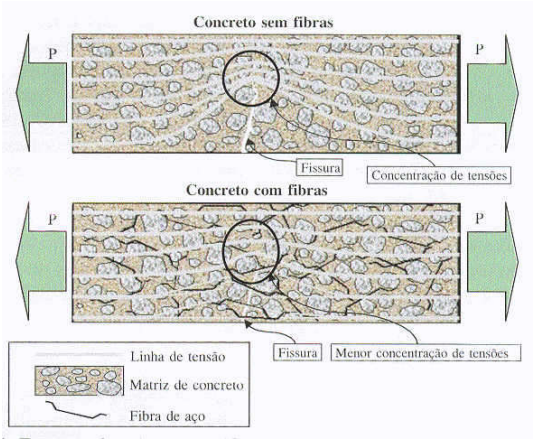

Figura 15 - Concreto com fibra
Fonte: ISAIA, Geraldo Cechella, 2005.

2.8 Interação Fibra-Matriz

Uma fissura em um concreto simples representa uma barreira à propagação de tensões, resultando em uma concentração de tensões na extremidade da fissura.

O trabalho de ponte de transferência de tensão de tração realizado por meio das fissuras existentes no concreto é um dispositivo muito interessante no que trata o aumento de energia inerente à ruptura do material e à restrição à propagação das fissuras.

Em um determinado instante, a concentração de tensões gera a ruptura da matriz, levando a extensão da fissura. Onde, o processo de extensão da fissura é contínuo, até que a ruptura completa ocorra, o que caracteriza o comportamento de um material frágil.

Fibras possuidoras de resistência e módulo adequados ao serem adicionadas no concreto - numa quantidade apropriada (teor) -, fazem com que o concreto perca o seu comportamento frágil.

Tal mudança ocorre em decorrência do trabalho de ponte de transferência de tensões que é exercido pelas fibras, já que minimizam a concentração de tensões nas extremidades das fissuras. Desta forma, as fissuras propagam-se com menor velocidade e o concreto por sua vez, passa a comportar-se como material dúctil. Ou

seja, apresenta maior resistência após fissuração. No entanto, as fibras ocasionam o aparecimento de um maior número de fissuras, que se apresentam com aberturas menores (ISAIA, Geraldo Cechella, 2005).

2.9 Aspectos Tecnológicos Fundamentais

O teor de fibras adicionadas ao concreto está ligado diretamente à sua capacidade de reforço. Ou seja, quanto maior o teor, maior será a quantidade de fibras atuando como ponte de transferência de tensão por entre as fissuras, o que amplia a resistência pós-fissuração (ISAIA, Geraldo Cechella, 2005).

2.10 Considerações Básicas

2.10.1 Corpos-de-prova

Corpos-de-prova são considerados amostras de concreto com alto grau de endurecimento, preparados especialmente para testar e validar propriedades como: resistência à compressão, módulo de elasticidade, etc (DICIONÁRIO DE ARQUITETURA, 2013).

2.10.2 Ensaio de Resistência à Tração

Este ensaio tem por função submeter um corpo-de-prova com geometria definida a um esforço axial crescente do corpo-de-prova, até que o seu limite de ruptura seja alcançado. O esforço utilizado para a realização deste ensaio é totalmente medido na própria máquina. As dimensões para os corpos-de-prova para o ensaio de tração são padronizadas e regulamentadas por normas nacionais e internacionais. Além disso, para a escolha do corpo-de-prova com dimensão padronizada, deve-se levar em consideração a capacidade da máquina de tração utilizada para o ensaio (ENSAIO MECÂNICO: DE TRAÇÃO, 1997).

2.10.3 Ensaio de Resistência à Compressão Axial

A propriedade mais importante do concreto é a resistência à Compressão Axial e códigos nacionais e internacionais buscam vincular as demais resistências e propriedades (BAUER, 1991).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta todos os procedimentos realizados nas etapas de processamento e caracterização microestrutural dos materiais utilizados para este estudo. A Figura 16 apresenta um fluxograma que mostra todo o desenvolvimento deste projeto.

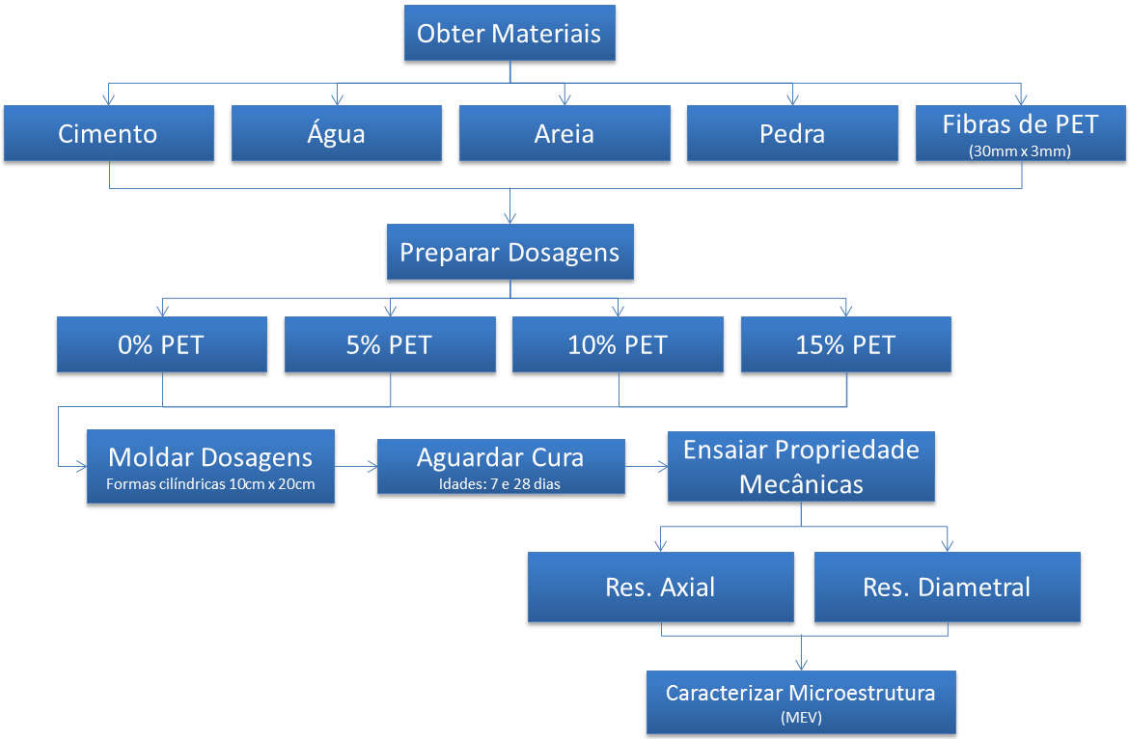

Figura 16 - Fluxograma de atividades adotadas neste trabalho

3.1 Materiais utilizados

- Cimento

  O cimento utilizado na fabricação dos Corpos-de-prova: para os ensaios de Compressão Axial e Diametral foi o CPIII.

  Funcionalidades do traço:

  a) Envolver os agregados, preencher os vazios formados e proporcionar ao concreto maior manuseabilidade, quando recém-misturado; e

b) Aglutinar os agregados no concreto já endurecido, proporcionando ao conjunto certo índice de impermeabilidade, resistência aos esforços mecânicos e durabilidade, face aos agentes agressivos aos quais estará exposto.

- Areia

  A areia utilizada no processo de confecção dos CPs foi classificada como areia média, peneirada, cuja granulometria máxima permitida é de 1,41 mm.

- Pedra

  Brita I

- PET - Politereftalato de Etileno

  Os ensaios foram realizados com fibras de PET de 30mmx3mm.

- Água

  Foram utilizados 28,7L de água para confecção dos traços.

3.2 Equipamentos utilizados:

- Na realização da formação das fibras do PET foi utilizada uma guilhotina, adaptada especialmente para cortar as fibras no tamanho especificado de 30mmx3mm;

Figura 17 - Guilhotina

- Para realização do *"slump test"* foi utilizada forma tronco-cônica, a qual fora preenchida pelo traço em três camadas igualmente adensadas, dispensando-se sobre cada uma 25 golpes.

- Formas cilíndricas de aço nas dimensões 10cmx20cm para moldagem dos corpos-de-prova que foram utilizados na realização dos ensaios de resistência mecânica;

- Soquete, utilizado na compactação do material nas formas cilíndricas;

Figura 18 - Formas cilíndricas de aço nas dimensões 10cmx20cm para moldagem dos corpos-de-prova e soquete, utilizado na compactação do material

- Espátula, utilizada na mistura e acomodação do traço; e

Figura 19 - Espátula

- Prensa hidráulica modelo EMIC - DL 10000 para o ensaio de resistência à tração. Capacidade de carga 1000 KN;

Figura 20 - Prensa hidráulica modelo EMIC - DL 10000

- Prensa hidráulica modelo EMIC - PC 150C para os ensaios de resistência à Compressão Axial e Diametral. Capacidade de carga 1000KN;

Figura 21 - Prensa hidráulica modelo EMIC - PC 150C

- Para a análise microestrutural dos traços estudados foi utilizado o MEV - Microscópio de Varredura Eletrônica modelo JSM 5800LV.

Figura 22 - MEV JEOL, modelo JSM 5800LV

3.3 Métodos:

3.3.1 Normas

Para a realização dos procedimentos experimentais foram utilizadas as seguintes normas:

1 - NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da Resistência à Compressão;

2 - NBR 7222: Argamassa e Concreto - Determinação da resistência à tação por Compressão Diametral de corpos-de-prova cilíndricos;

3 - NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - índice de vazios e massa específica.

4 - NBR 5738 - Define os procedimentos para moldagem e cura de corpos-de-prova.

5 - NBR 5739-2007 - Define o método pelo qual os corpos cilíndricos de prova de concreto devem ser ensaiados à compressão, moldados conforme a ABNT NBR 5738 e extraídos conforme a ABNT NBR 7680.

6 - NBR 7680 - Define o método de extração dos corpos-de-prova de concreto.

3.3.2 Escolha do material

Todo o material utilizado no experimento foi obtido através de coleta seletiva. Desta forma, foi possível utilizar somente garrafas PET de 2L de refrigerante transparentes. Após a seleção das garrafas, as mesmas foram lavadas para retirar os resíduos presentes e secas para evitar danos à lâmina utilizada na confecção das fibras. Devido à natureza diferenciada do PET, o rótulo, tampa e anel foram desprezados.

3.3.3 Fibras

Após os procedimentos, item 3.3.2, foi iniciada a confecção das fibras de PET, como ilustradas na Figura 23. Para a produção das fibras de garrafa PET, foram necessárias duas etapas: 1 - as embalagens foram cortadas em tiras de 30mm e; 2 - as embalagens foram cortadas na guilhotina em tiras de 3mm. Desta forma, foi possível obter minitiras com tamanho o desejado de 30mmx3mm por meio de um processo mecânico.

Figura 23 - Fibras de PET

3.3.4 Ensaio de Resistência às Compressões Axial e Diametral

Para a realização destes ensaios foram confeccionados corpos-de-prova, conforme **NBR 5738**, de secção cilíndrica com diâmetro de 10cmx20cm obedecendo a proporção de 1:2:3 recomendada. Os ensaios de resistência à compressão foram realizados de acordo com a **NBR 5739-2007**. Esta NBR faz a descrição do método pelo qual os corpos-de-prova devem ser ensaiados.

Os Corpos-de-prova foram preenchidos com traço base 1:2:3 utilizando um volume de água de 28,7L. A estes foram acrescidos 5%, 10% e 15% de fibras de PET, conforme a Tabela 06.

Tabela 6 - Sequência da Adição de cimento, areia, pedra e PET

Traço	Cimento (Kg)	Areia	Pedra	PET (%)	Água (L)
T1 (0% de fibras)	344	622	364	0	28,7
T2 (5% de fibras)	344	622	364	5	28,7
T3 (10% de fibras)	344	622	364	10	28,7
T4 (15% de fibras)	344	622	364	15	28,7

Os corpos-de-prova foram submetidos aos ensaios destrutivos de resistência Axial e Diametral nas idades de 7 e 28 dias. Salvo os corpos-de-prova sem adição de PET, onde somente o ensaio de Compressão Axial e Diametral foi realizado na idade de 7 dias.

3.3.5 Corpos-de-prova

Toda a confecção do material compósito obedeceu à sequência da adição de cimento, areia, pedra, PET e água, conforme Tabela 6, sendo estes elementos misturados até se obter uma composição uniforme e homogênea. Prosseguiu-se com o preenchimento dos corpos-de-prova, tomando os devidos cuidados para evitar perda de água ou a segregação dos materiais, até conseguir-se uma mistura de aspecto homogêneo e uniforme e consistência plástica adequada.

Os moldes foram recobertos internamente por uma fina camada de óleo, utilizado para facilitar a desmoldagem.

Foram preparadas quantidades de dosagem na medida certa para cada uma das tarefas executadas, para que se pudesse evitar o endurecimento antes de sua utilização.

Os moldes foram preenchidos com o material compósito em duas camadas sendo manualmente compactadas.

Após a moldagem, todos os corpos-de-prova produzidos foram deixados em uma superfície plana por 24h, sendo estes colocados em uma mistura de água e cal.

Todos os ensaios de Compressão Axial e Diametral foram realizados em condição ambiente. Para cada ensaio destrutivo de compressão foram utilizados três CPs para cada um dos percentuais.

- Cura:

Os corpos-de-prova foram submetidos aos ensaios destrutivos de resistência mecânica nas idades de 7 e 28 dias onde a cura pode completar-se.

4 ANÁLISE E APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

4.1 Caracterização das matérias-primas

As Figuras 24, 25 e 26 apresentam as micrografias de varredura eletrônicas da interação da fibra de PET com a matriz.

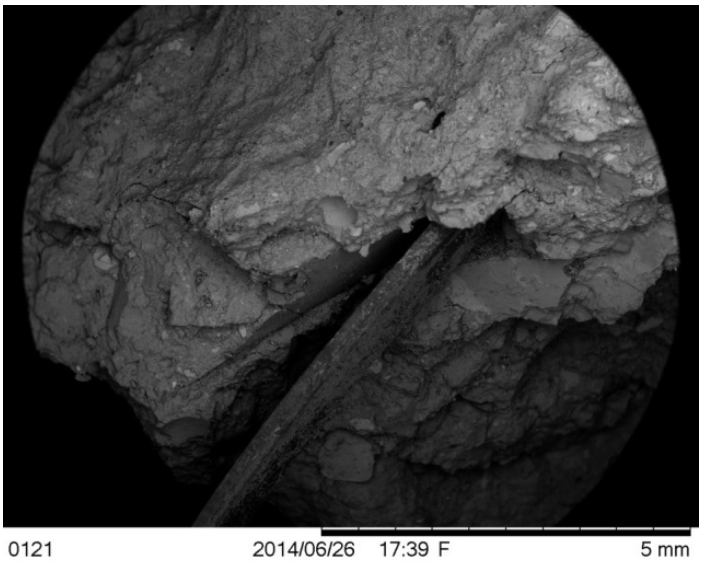

Figura 24 - Micrografia obtida por MEV representativa da interação fibra de PET com a matriz (MEV 28 dias)

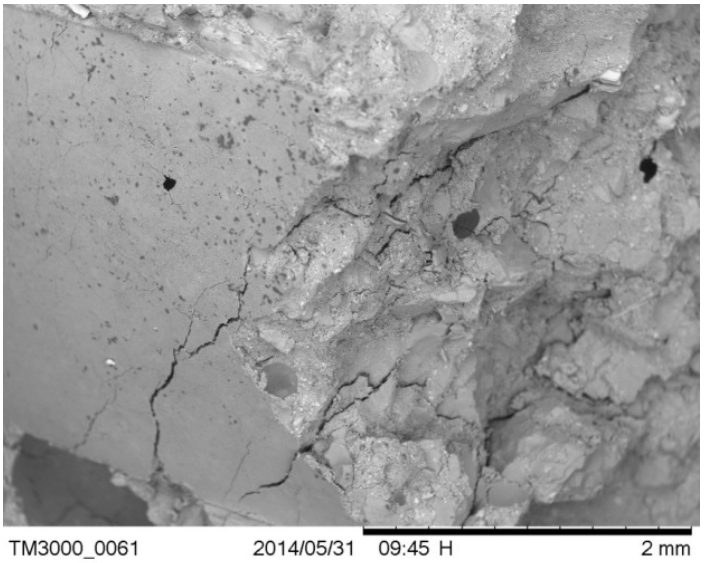

Figura 25 - Micrografia obtida por MEV representativa da interação fibra de PET com a matriz (MEV 28 dias)

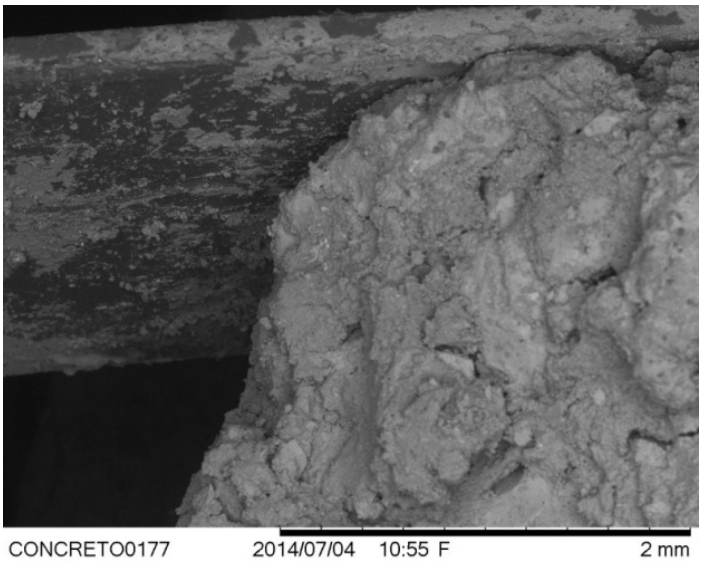

Figura 26 - Micrografia obtida por MEV representativa da interação fibra de PET com a matriz (MEV 28 dias)

As imagens obtidas pelo Microscópio de Varredura Eletrônica mostram a interface entre matriz do compósito e o polímero aos 28 dias de cura. A rigor, nessa interface, observa-se a microporosidade existente. Esses interstícios são microporos gerados pela reação química isotérmica, havendo liberação de micro bolhas. Desta forma, presos a matriz estão pedaços de fibras de PET, o que indica uma perfeita aderência entre a matriz do compósito e o polímero. Por isso, há grande ganho na resistência e ductilidade que está em razão da relação de aderência que existe entre o polímero e a matriz do material compósito. Sugere-se para trabalhos futuros, estudar a curva tensão x deformação e a resiliência do material com maior rigor e não somente a propriedade mecânica da tração e compressão.

4.2 Resistência à Compressão Axial

Tabela 7 - Resultado dos Ensaios de Resistência à Compressão Axial nos corpos-de-prova cilíndricos

Tratamento	Idade	Resistência Cps (KN)			Média (KN)
		1	2	3	
T1 (0% de Fibras)	7 dias	102.2	121.4	123.5	115,7
	28 dias	180.3	175.4	172.1	175,93
T2 (5% de Fibras)	7 dias	72.17	64.37	67.58	68,04
	28 dias	107.63	122.23	121.85	117,24
T3 (10% de Fibras)	7 dias	65.17	71.95	71.32	69,48
	28 dias	118.68	115.52	121.69	118,63
T4 (15% de Fibras)	7 dias	44.52	43.01	41.44	42,99
	28 dias	66.32	64.41	61.12	63,95

Com base nos dados da Tabela acima, nota-se que no corpo-de-prova, onde não há adição de fibras e de mesma geometria, isso a 7 (sete) e a 28 (vinte e oito) dias, o valor em Quilonewton alcançado é de 175KN. Os corpos-de-prova com adição de fibra, cuja cura foi de 7 (sete) dias, nota-se a drástica queda de resistência mecânica ao ser comprimido, ou seja, a resistência mecânica a compressão declina. Observa-se que a resistência mecânica declina quase que pela metade, para T2 (5% de fibra adicionada), T3 (10% de fibra adicionada) e T4 (15% de fibra adicionada), obtendo os valores de 68, 69 e 42,99KN. Desta forma, verifica-se que o aumento do teor de fibra adicionada ao concreto passa a ter grande significado na resistência física do material.

Considerando a comparação da resistência mecânica do material variando o percentual de adição de fibras com tempo de cura a 7 e 28 dias, nota-se uma redução na resistência à Compressão Axial em que evidencia-se a uma faixa de interesse a 10% de adição, onde os resultados se situam em patamar estável.

Ao comparar a resistência mecânica do material cujo tempo de cura é de 28 dias (adição de 5% de fibras de PET) com o corpo-de-prova sem adição de fibras de PET (tempo de cura de 7 (sete) dias), pode-se notar o declínio de sua resistência de 175 para 117KN, resultando em um declínio percentual de 33%. O T3, por exemplo, com 10% de fibra, praticamente manteve o resultado de compressão com 5%. No entanto, quando se adicionou 15% de fibras de PET percebeu-se o declínio abrupto da resistência à compressão.

Tabela 8 - Resultado dos Ensaios de Resistência à Compressão Axial nos corpos-de-prova cilíndricos (com dados estatísticos)

Tratamento	Idade	Resistência Cps (KN)			Média (KN)	Desvio Padrão	Tensão	Desvio Padrão
		1	2	3				
T1	7 dias	102,2	121,4	123,5	115,7	9,58	3,68	1,29
	28 dias	180,3	175,4	172,1	175,93	3,37	5,60	
T2	7 dias	72,17	64,37	67,58	68,04	3,20	2,17	
	28 dias	107,63	122,23	121,85	117,24	6,79	3,73	
T3	7 dias	65,17	71,95	71,32	69,48	3,06	2,21	
	28 dias	118,68	115,52	121,69	118,63	2,52	3,78	
T4	7 dias	44,52	43,01	41,44	42,99	1,26	1,37	
	28 dias	66,32	64,41	61,12	63,95	2,15	2,04	

A tabela acima não evidencia grande dispersão nos resultados aferidos para os ensaios de Compressão Axial dos CPs.

4.3 Resistência à Compressão Diametral

A Tabela 9 apresenta os resultados dos ensaios de Resistência à Compressão Diametral nos corpos-de-prova cilíndricos.

Tabela 9 - Resultado dos Ensaios de Resistência à Compressão Diametral nos corpos-de-prova cilíndricos

Tratamento	Idade	Resistência Cps (KN)			Média (KN)
		1	2	3	
T1	7 dias	22.2			22,2
	28 dias	33.01	31.02	33.03	32,35
T2	7 dias	19.14			19,14
	28 dias	57.01	45.45	59.73	54,06
T3	7 dias	33.44			33,44
	28 dias	54.06	60.36	55.12	56,51
T4	7 dias	34.41			34,41
	28 dias	62.08	65.07	60.44	62,53

A partir da análise dos resultados dos ensaios dos CPs em Compressão Diametral, pode-se dizer:

A queda da resistência mecânica nos CPs com cura de 7 dias com relação aos de 28 dias, mostra-se mais severa onde os percentuais de fibras utilizados nos traços estão no patamar de 5% e 15%. No caso da adição de 10% de fibras, a queda de resistência do concreto com 7 dias, comparado a 28 dias, mostrou-se menos severa.

Quando analisamos a Compressão Axial, nota-se que a faixa de adição de fibra de 10% apresenta-se com melhores resultados tanto com 7 ou 28 dias de cura.

No caso do ensaio de Compressão Diametral, a faixa de interesse desloca-se para um patamar de adição entre T3 e T4.

Tabela 10 - Resultado dos Ensaios de Resistência à Compressão Diametral nos corpos-de-prova cilíndricos (com dados estatísticos)

Tratamento	Idade	Resistência Cps (KN)			Média (KN)	Desvio Padrão	Tensão	Desvio Padrão
		1	2	3				
T1	7 dias	22.2			22,2	0,00	0,71	0,46
	28 dias	33.01	31.02	33.03	32,35	0,94	1,03	
T2	7 dias	19.14			19,14	0,00	0,61	
	28 dias	57.01	45.45	59.73	54,06	6,19	1,72	
T3	7 dias	33.44			33,44	0,00	1,06	
	28 dias	54.06	60.36	55.12	56,51	2,75	1,80	

A tabela acima não evidencia grande dispersão nos resultados aferidos para os ensaios de Compressão Axial dos CPs.

4.4 Resistência à Tração

Tabela 11 - Ensaio de Resistência à Tração

CP	COMPRIMENTO INICIAL (L0) mm	LARGURA (mm)	ESPESSURA (mm)	ÁREA (mm^2)	TENSÃO DE ESCOAMENTO (MPa)	TENSÃO MÁXIMA (MPa)	COMPRIMENTO FINAL (LF) mm	ALONGAMENTO (%)
1	30,00	3,01	0,31	0,93	59	116	45,45	51,50
2	30,00	2,98	0,31	0,92	66	78	35,15	17,20
3	30,00	2,87	0,29	0,83	55	110	43,69	45,63
4	30,00	3,07	0,32	0,98	62	109	55,10	83,67
5	30,00	2,96	0,29	0,86	62	149	47,73	59,10
6	30,00	2,86	0,28	0,80	59	110	42,06	40,20
7	30,00	2,95	0,30	0,89	54	132	50,28	67,60
8	30,00	2,88	0,28	0,81	59	138	47,95	59,83
9	30,00	3,15	0,29	0,91	55	140	49,69	65,63
10	30,00	2,93	0,31	0,91	64	118	48,76	62,53

A Resistência à Tração Transversal dos Cps (Tabela 11) ensaiados na condição ambiente (22ºC) mostra que os corpos-de-prova compostos por Politereftalato de Etileno verde e transparente obtiveram uma drástica diminuição da Resistência à Tração Transversal. O 2º ensaio obteve um alongamento de 17,20% de sua área. Já o 4º ensaio obteve um alongamento de 83,67%. Comparando-se os dados encontrados com os resultados obtidos, pode-se confirmar o efeito danoso que os concentradores de tensão exerceram sobre os Cps ensaiados, uma vez que estes, por falta de maquinário, foram confeccionados de forma artesanal.

5 CONCLUSÕES

O material polimérico adicionado ao concreto proporcionou modificações nas propriedades do material (concreto sem adição de fibras).

A adição de materiais poliméricos reduziu a resistência à compressão do concreto. Quanto maior foi o teor utilizado menor foi à resistência à compressão média. Esta redução foi identificada no concreto com resíduos poliméricos quando adicionados nos teores com 05, 10 e 15%.

A adição de 15% de fibras de PET mostrou-se menos adequada, pois o resultado encontrado para as idades de 7 e 28 dias não apresentaram aumentos significativos na resistência à compressão.

Obtiveram-se aumentos significativos nos resultados de tração ao utilizar 05, 10 e 15% de fibras de PET ao concreto. Analisando os resultados dos ensaios de Resistências à Compressão Axial e Diametral evidencia-se que a dosagem ideal é a que possui 10% de adição de fibra de PET, pois desta forma, foi possível estabelecer uma faixa de aplicação onde resistência à tração e compressão se apresentaram mais equilibradas.

Deve-se considerar a possibilidade da inclusão de polímeros (fibras de PET) no concreto para aplicações específicas, como, por exemplo, calçamentos e pisos de estacionamentos, não devendo à aplicação de tais fibras buscarem uma aplicação universal de caráter estrutural, evidenciada a redução de resistência à compressão apresentada.

6 REFERÊNCIAS

A ORIGEM DO PLÁSTICO, 2013. Disponível em: http://pt.scribd.com/doc/65802944/A-ORIGEM-DO-PLASTICO. Acesso em: 30 de mar. de 2013.

BALBO, José T., 2009. **Pavimentos de Concreto**, 1. ed. São Paulo – SP – Brasil: Editora Oficina de Textos.

BAUER, L. A. Falcão. **A CURA DO CONCRETO: Métodos e Materiais**. Boletim nº 32, São Paulo, 1991, 33 p.

BOOM DA CONSTRUÇÃO, 2012. Disponível em: http://www.swissinfo.ch/por/economia/Mesmo_com_a_crise_o_mundo_precisa_de_cimento.html?cid=32760686. Acesso em: 23 de março de 2013.

CALLISTER Jr., Willian D. **Ciência e Engenharia dos Materiais - Uma Introdução**. LTC - Livros Técnicos e Científicos S.A. Rio de Janeiro, 2002.

CARVALHO, Willian Cle; GOMES, Ricardo Adriano Martoni Pereira. **A APLICAÇÃO DE FIBRAS DE GARRAFA PET COMO AGRAGADO ESTRUTURAL DO CONCRETO.** Artigo científico. Disponível em: https://uspdigital.usp.br/siicusp/cdOnlineTrabalhoVisualizarResumo?numeroInscricaoTrabalho=3636&numeroEdicao=19. Acesso em: 22 de março de 2013.

CIMENTO PORTLAND, 2013. Disponível em: https://sites.google.com/site/profairtonmaria/materiais-de-construcao/cimento-portland. Acesso em: 23 de março de 2013.

CONCRETO, 2013. Disponível em: http://www.totalmix.com.br/construcao/index.php/servicos/concreto. Acesso em: 22 de março de 2013.

CORÓ, Ângela Ghisleni, 2002. Trabalho de Conclusão de Curso. **INVESTIGAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETOS REFORÇADOS COM FIBRAS PET,** 2002. Disponível em: http://www.projetos.unijui.edu.br/petegc/wp-content/uploads/2010/03/TCC-Angela-Ghisleni-Cor.pdf. Acesso em: 22 de março de 2013.

DI GIULIO, Gabriela. **Pesquisas garantem novos materiais para as mais variadas aplicações**. *Inovação Uniemp* [online]. 2007, vol.3, n.3, pp. 40-47. ISSN 1808-2394.

DICIONÁRIO DE ARQUITETURA, 2013. Disponível em: http://www.colegiodearquitetos.com.br/dicionario/2013/02/o-que-e-corpo-de-prova/. Acesso em: 20 de jun. de 2013.

ENSAIO MECÂNICO: DE TRAÇÃO, 1997. Disponível em: http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/ensaios-nao-destrutivos-e-mecanicos/209-ensaio-mecanico-tracao.html. Acesso em: 03/07/2014.

ENVOLVERDE, 2013. Disponível em: http://www.ipam.org.br/noticias/Desenvolvimento-sustentavel-critica-ao-modelo-padrao/1689. Acesso em: 18/08/2015.

GORNI, Antônio A., 2003. **Revista Plástico Industrial.** Disponível em: ingraprojetos.com.br. Acesso em: 09/11/2015.

INFOFÁCIL, 2010. Disponível em: http://informativofacil.blogspot.com.br/2010/10/como-surgiu-o-cimento-portland.html. Acesso em: 23 de março de 2013.

ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizaçoes.** 1. ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2005. v. 2. 1579p. IBRACON, 2005, pp.1194-1225. 3. CONCRETO COM FIBRAS.

MEHTA, P. Kumar e MONTEIRO, Paulo J., 1994. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**, 1. ed. São Paulo – SP – Brasil: Editora Pini Ltda.

O MUNDO DO CIMENTO, 2013. Disponível em: http://www.cimento.org/index.php?option=com_content&view=article&id=26&Itemid=2. Acesso em: 22 de março de 2013.

PAISES EMERGENTES, 2013. Disponível em: http://www.suapesquisa.com/economia/paises_emergentes.htm. Acesso em: 23 de março de 2013.

PETRUCCI, Elagio G., 1973. **Concreto de Cimento Portland**, 2. ed. Porto Alegre – PA – Brasil: Editora Globo.

POZOLANA, 2013. Disponível em: http://www.infopedia.pt/$pozolana. Acesso em: 22 de março de 2013.

PROPRIEDADES DO PET. Disponível em: http://www.fortplastic.com.br/index.php?option=com_content&view=article&id=55:caracteristicas-do-pet&catid=37:historia-da-pet&Itemid=63. Acesso em: 31 de mar. de 2013.

RATTNER, Henrique. **Sustentabilidade - uma visão humanista.***Ambient.soc.* [online].1999, n.5, pp. 233-240. ISSN 1809-4422. Acesso 19 de abril de 2013
REVISTA CONCRETO& CONSTRUÇÕES, 2009. Disponível em: http://www.ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/Revista_Concreto_53.pdf. Acesso em: 22 de março de 2013.

Téchne, 2014. **Cimento Portland.** Disponível em: http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/noticias/usp-e-ufscar-pesquisam-uso-de-residuos-de-bauxita-no-304306-1.aspx. Avesso em: 13/07/2015.

TIPOS DE CONCRETO, 2013. Disponível em: http://www.redimix.com.br/tiposDeConcreto/. Acesso em: 24 de março de 2013.