



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
Campus de Ilha Solteira

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

*Estudo da Influência da Adição de Resíduos de Óleo em  
Concretos para Aplicação em Pavimentos*

**MICHAEL DE MELO**

**Orientadora:** Profa. Dra. Maria da Consolação Fonseca de Albuquerque

**Co-orientador:** Prof. Dr. Sérgio Augusto Mello da Silva

Dissertação apresentada à Faculdade de  
Engenharia – UNESP – Campus de Ilha  
Solteira, para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia Civil

Área do conhecimento: Estruturas

Ilha Solteira - SP  
Novembro/2013

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

M528e      Melo, Michael de.  
Estudo da influência da adição de resíduos de óleo em concretos para aplicação em pavimentos / Michael de Melo. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2013  
98 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Estrutura, 2013

Orientador: Maria da Consolação Fonseca de Albuquerque  
Co-orientador: Sérgio Augusto Mello da Silva  
Inclui bibliografia

1. Desenvolvimento ambiental. 2. Pavimento de concreto. 3. Resíduos de óleo.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

### CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO:** Estudo da Influência da Adição de Resíduos de Óleo em Concretos para Aplicação em Pavimentos

**AUTOR:** MICHAEL DE MELO

**ORIENTADORA:** Profa. Dra. MARIA DA CONSOLAÇÃO F DE ALBUQUERQUE

**CO-ORIENTADOR:** Prof. Dr. SERGIO AUGUSTO MELLO DA SILVA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL, Área: ESTRUTURAS, pela Comissão Examinadora:

Profa. Dra. MARIA DA CONSOLAÇÃO F DE ALBUQUERQUE  
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. MARCO ANTONIO MORAIS ALCANTARA  
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Profa. Dra. IVONE REGINA DE OLIVEIRA  
Departamento de Cerâmicas Avançadas / Universidade do Vale do Paraíba

Data da realização: 30 de novembro de 2013.

## RESUMO

O volume de resíduos de óleo produzidos no Brasil está cada vez mais crescente e, conseqüentemente, o descarte desses materiais na natureza se torna progressivamente mais complicado. De acordo com a Associação Brasileira para Sensibilização, Coleta e Reciclagem de Resíduos de Óleo Comestível (ECÓLEO), o óleo é o maior poluidor de águas doces e salgadas das regiões mais adensadas do Brasil. Acredita-se que o concreto para aplicação em pavimentos de estacionamento, calçadas, sarjetas, muros de divisórias em estradas e avenidas, entre outros, possa ser uma opção para os descartes dos resíduos de óleo, diminuindo o impacto ambiental causado pela má destinação destes resíduos. No presente trabalho foi analisado o concreto com adição de 5 e 10% de resíduo de óleo de cozinha e resíduo de óleo lubrificante. Resultados de resistência à compressão axial, de resistência à tração por compressão e de módulo de elasticidade mostraram reduções significativas nos concretos com adição de óleo, sendo maiores ainda no concreto com óleo de cozinha. No entanto, a propriedade de resistência à tração na flexão não mostrou alterações significativas. Os resultados da análise microestrutural não mostraram presença de metais pesados nas amostras contendo resíduos de óleo lubrificante. O acréscimo de resíduo de óleo de cozinha apresentou significativo aumento no tempo de pega do concreto. Entretanto, esse aumento foi pequeno com o acréscimo do resíduo de óleo lubrificante. Apesar das reduções das propriedades mecânicas dos concretos contendo resíduos de óleo, a não influência da tração à flexão e a ausência de metais pesados possibilita uma alternativa de descarte de resíduos de óleo em estruturas de concreto para aplicação em pavimentos de concreto, contribuindo com o meio ambiente e o desenvolvimento sustentável.

**Palavras-chave:** Desenvolvimento ambiental. Pavimentos de concretos. Resíduos de óleo.

## ABSTRACT

The content of oil wastes product in Brazil is growing fast and, consequently, the discard of these materials in nature become progressively complicated. According with ECÓLEO, Brazilian Association to Awareness, Gathering and Recycling Edible Oil Wastes, and the oil is one of the most pollutants of seas and rivers in regions most density of Brazil. Believes that concrete could to be applied in pavements, parking lots, sidewalk, gutter, and division walls in roads and avenues, i.e., could be an option to discard oil wastes, decreasing the environment impact caused by the bad destination of these wastes in nature. Results of compression resistance, flexural resistance and elasticity modulus have showed significances reductions when ROV and ROL has been put in concrete mix. Nevertheless, it has not presented significances alterations flexural on splitting tensile strength. The results of microstructural analysis have not detected the heavy metals presence in the samples with oil wastes. Despite of these reductions on mechanical properties, the non-influence in flexural splitting tensile and the absence of heavy metals, these concrete with oil wastes can provide an alternative of wastes disposals in concrete structures to apply in concrete pavements, since applied in places with low mechanical resistance requirements, contributing with environment and sustainability development.

**Key words:** Environmental development. Pavements concretes. Oil wastes.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1-</b> Fotografia do aparelho de Cleveland para determinação do ponto de fulgor. .....	37
<b>Figura 2-</b> Representação esquemática do aparelho de Cleveland para determinação do ponto de fulgor. ....	38
<b>Figura 3-</b> Fotografia do teste de chama na determinação do ponto de fulgor da amostra .....	38
<b>Figura 4-</b> Representação esquemática do viscosímetro de Saybolt com orifício de tipo Furol (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM, 1968) .....	39
<b>Figura 5-</b> Aparato experimental para determinação da viscosidade de Saybolt dos ROC e ROL.....	40
<b>Figura 6-</b> a) Recipiente de vidro para armazenamento do líquido de escoamento. b) Representação esquemática do recipiente com as dimensões (em mm), conforme norma D88 (ASTM, 1968) .....	40
<b>Figura 7-</b> Escoamento dos ROC (a) e dos ROL (b) na determinação da viscosidade de Saybolt Furol. ....	41
<b>Figura 8-</b> Fotografia do recipiente contendo ROL (à esquerda) e ROC (à direita) para a realização do teste de viscosidade de Saybolt Furol.....	41
<b>Figura 9-</b> Fotografia do frasco de Chapman com areia e água. ....	43
<b>Figura 10-</b> Fotografia do tronco de cone e soquete metálico para a realização do ensaio de absorção de água do agregado miúdo. ....	47
<b>Figura 11-</b> a) Fotografia do cilindro. b) Fotografia do soquete metálico de compactação. ....	47
<b>Figura 12-</b> Gráfico da massa otimizada de brita 1/ brita 0. ....	49
<b>Figura 13-</b> Fotografia da mesa de vibração para adensamento dos corpos de provas. ....	50
<b>Figura 14-</b> Fotografia do tronco de cone para ensaio de abatimento. ....	52
<b>Figura 15-</b> Representação esquemática do aparelho de Vicat e molde troncocônico utilizado na determinação dos tempos de pegas do cimento Portland...54	
<b>Figura 16-</b> Fotografia da máquina universal de ensaio mecânico .....	56

<b>Figura 17-</b> Representação esquemática do ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral dos corpos-de-prova cilíndricos. ....	57
<b>Figura 18-</b> Representação esquemática do ensaio de flexão simples sob carga centrada nas vigas deste projeto.....	59
<b>Figura 19-</b> Representação esquemática do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade.....	61
<b>Figura 20-</b> Fotografia do espectrômetro de fluorescência de Raios-X por energia dispersiva. ....	63
<b>Figura 21-</b> Gráfico da curva granulométrica do agregado miúdo das amostras M1 e M2. ....	66
<b>Figura 22-</b> Curva granulométrica do agregado graúdo (brita 0), amostras M1 e M2. ....	67
<b>Figura 23-</b> Gráfico da curva granulométrica do agregado graúdo (brita 1) das amostras M1 e M2 .....	69
<b>Figura 24-</b> Resultados dos ensaios de abatimento do tronco de cone. a) Concreto referência. b) Concreto com adição de 10% de ROC (CP10-C). c) Concreto com adição de 10% ROL (CP10-L).....	74
<b>Figura 25-</b> Gráfico do tempo de pega das amostras de referência, 10% ROC (CP10-C) e 10% ROL (CP10-L). ....	76
<b>Figura 26-</b> Resultado da resistência à compressão axial média dos corpos-de-prova rompidos aos 30 dias .....	78
<b>Figura 27-</b> Resultado da resistência à tração por compressão diametral média dos corpos-de-prova rompidos aos 30 dias .....	80
<b>Figura 28-</b> Resultado da resistência à tração por flexão média dos corpos-de-prova rompidos aos 30 dias .....	82
<b>Figura 29-</b> Resultado da determinação do módulo de elasticidade médio dos corpos-de-prova rompidos aos 30 dias. ....	84
<b>Figura 30-</b> Espectroscopia por Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva das amostras líquidas de ROL (a) e ROC (b). ....	85
<b>Figura 31-</b> Imagem ampliada 10.000 vezes das amostras dos concretos de referência, CP10-L e CP10-C por meio do MEV. a) Concreto de Referência, b) Concreto com Adição de 10% de ROC, c) Concreto com Adição de 10% de ROL.....	87

<b>Figura 32:</b> Microcaracterização do concreto com análise dos elementos por meio de MEV com sistema EDS acoplado. a) Concreto de Referência. b) Concreto com Adição de 10% de ROC. c) Concreto com Adição de 10% de ROL. .....	88
<b>Figura 33-</b> Análise da composição percentual em massa dos elementos químicos dos concretos por meio do MEV com EDS acoplado.....	90

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1-</b> Séries de Peneiras utilizadas no ensaio de granulometria (NBR NM 248, 2001) .....	32
<b>Tabela 2-</b> Massa mínima da amostra em função da dimensão característica (NBR NM 248, 2001) .....	33
<b>Tabela 3-</b> Série de peneiras utilizada para o ensaio de granulometria para o agregado miúdo (NBR NM 248:2003) .....	34
<b>Tabela 4-</b> Classificação do agregado miúdo .....	35
<b>Tabela 5-</b> Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo (NBR 7211, 2009) .....	35
<b>Tabela 6-</b> Série de peneiras utilizadas no ensaio de granulometria do agregado graúdo (NBR NM 248, 2003).....	36
<b>Tabela 7-</b> Limites da composição granulométrica do agregado graúdo.....	36
<b>Tabela 8-</b> Massa mínima de amostra por ensaio (NBR 53, 2002) .....	44
<b>Tabela 9-</b> Valores da determinação da relação Brita 1/Brita 0.....	48
<b>Tabela 10-</b> Quantidade de material para a elaboração da amostra ensaiada na determinação dos tempos de pega. ....	54
<b>Tabela 11-</b> Resultado do Ensaio Granulométrico das amostras M <sub>1</sub> e M <sub>2</sub> de areia ...	65
<b>Tabela 12-</b> Ensaio granulométrico da brita 0 das amostras M <sub>1</sub> e M <sub>2</sub> . ....	67
<b>Tabela 13-</b> Ensaio granulométrico da brita 1 das amostras M <sub>1</sub> e M <sub>2</sub> . ....	68
<b>Tabela 14-</b> Massa específica do agregado seco (d) e massa específica do agregado na condição saturado superfície seca (d <sub>s</sub> ) .....	69
<b>Tabela 15-</b> Resultado do ponto de fulgor das amostras ROC e ROL (em °C) .....	70
<b>Tabela 16-</b> Resultado da viscosidade de Saybolt das amostras de ROL e ROC (SUS) .....	70
<b>Tabela 17-</b> Traço do concreto utilizado para a elaboração dos corpos-de-prova .....	72
<b>Tabela 18-</b> Resultado do ensaio de abatimento das amostras .....	72
<b>Tabela 19-</b> Estudo da determinação do tempo de pega da argamassa livre de resíduo de óleo (Amostra de Referência).....	75

<b>Tabela 20-</b> Estudo da determinação do tempo de pega da argamassa com 10% ROC .....	75
<b>Tabela 21-</b> Estudo da determinação do tempo de pega da argamassa com 10% de ROL.....	75
<b>Tabela 22-</b> Resultado de tensão máxima de resistência à compressão axial (MPa)	77
<b>Tabela 23-</b> Resultado de Tensão Máxima de resistência à tração por compressão dos corpos-de-prova .....	80
<b>Tabela 24-</b> Resultado de tensão máxima de resistência à compressão axial (MPa)	82
<b>Tabela 25-</b> Resultado da determinação do módulo de elasticidade dos corpos-de-prova (MPa).....	83
<b>Tabela 26-</b> Resultado da composição química das amostras líquidas de ROL e ROC (ppm – partes por milhão) .....	86
<b>Tabela 27-</b> Composição percentual da massa e do peso atômico dos elementos químicos das amostras de concretos. ....	89

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1-</b> Classificação dos corpos-de-prova elaborados para o estudo respectivo.....	64
---	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

### Alinhar abreviaturas e siglas

<b>MEV</b>	Microscopia Eletrônica de Varredura
<b>ECOLEO</b>	Associação Brasileira para Sensibilização, Coleta e Reciclagem de Resíduos de Óleo Comestível
<b>ROL</b>	Resíduos de Óleo Lubrificante
<b>ROC</b>	Resíduos de Óleo de Cozinha
<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>NBR</b>	Normas Brasileiras de Regulamentação
<b>RCA</b>	Resistência à Compressão Axial
<b>RTF</b>	Resistência à Tração na Flexão
<b>RTC</b>	Resistência à Tração na Compressão
<b>ME</b>	Módulo de Elasticidade
<b>HPA's</b>	Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos
<b>CONAMA</b>	Conselho Nacional do Meio Ambiente
<b>UEO</b>	<i>Used Engine Oil</i> (Óleo Utilizado de Motor ou Óleo Lubrificante Utilizado)
<b>EN</b>	<i>European Norms</i>
<b>CP</b>	Corpos-de-prova

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	OBJETIVOS.....	15
1.1.1	JUSTIFICATIVA DA PESQUISA .....	16
1.2	CONTEÚDO E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1	CONCRETO À BASE DE CIMENTO PORTLAND .....	20
2.2	A IMPORTÂNCIA DO PAVIMENTO DE CONCRETO .....	21
2.3	RESÍDUOS EM CONCRETO E A SUSTENTABILIDADE NAS CONSTRUÇÕES .....	22
2.3.1	RESÍDUOS DE ÓLEO EM CONCRETOS .....	25
2.4	REATIVIDADE DE METAIS PESADOS EM COMPOSTOS DE CONCRETOS.....	28
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
3.1	MATERIAIS .....	31
3.2	MÉTODOS .....	31
3.2.1	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS.....	32
3.2.1.1	GRANULOMETRIA E MÓDULO DE FINURA DOS AGREGADOS .....	32
3.2.1.2	CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS DE ÓLEO.....	37
3.2.1.2.1	DETERMINAÇÃO DO PONTO DE FULGOR.....	37
3.2.1.2.2	DETERMINAÇÃO DA VISCOSIDADE DE SAYBOLT FUROL .....	37
3.2.1.3	DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DO AGREGADO MIÚDO .....	42
3.2.1.4	DETERMINAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DO AGREGADO GRAÚDO .....	43
3.2.1.5	DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA DO AGREGADO MIÚDO .....	45
3.2.1.6	DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA DO AGREGADO GRAÚDO .....	47
3.2.2	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	47
3.2.2.1	DETERMINAÇÃO DA RELAÇÃO BRITA 1/BRITA 0 (AGREGADOS GRAÚDOS) .....	47
3.2.2.2	DETERMINAÇÃO DA DOSAGEM DOS CONCRETOS .....	49
3.2.2.3	MOLDAGEM, CURA E CAPEAMENTO .....	49
3.2.3	ENSAIOS DO CONCRETO FRESCO .....	51
3.2.3.1	ENSAIOS DE ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE .....	51
3.2.3.2	ENSAIOS DE DETERMINAÇÃO DE TEMPO DE PEGA .....	53
3.2.4	ENSAIOS MECÂNICOS .....	55
3.2.4.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	55
3.2.4.2	DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA COMPRESSÃO DIAMETRAL .....	57
3.2.4.3	DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO .....	59
3.2.4.4	DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	60
3.2.5	ANÁLISE QUÍMICA DAS AMOSTRAS LÍQUIDAS DE ROL E ROC E MICROSCÓPICA DOS CONCRETOS COM ROL E ROC. ....	62
3.2.5.1	ESPECTROSCOPIA POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X DAS AMOSTRAS DE ROC E ROL.....	62
3.2.5.2	MICROCARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO POR MEIO DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (EDS) .....	63
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	65
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	65
4.1.1	AREIA .....	65
4.1.2	BRITA 0.....	66
4.1.3	BRITA 1.....	68
4.1.4	DETERMINAÇÃO DO PONTO DE FULGOR DAS AMOSTRAS DE ROL E ROC.....	70
4.1.5	DETERMINAÇÃO DA VISCOSIDADE DE SAYBOLT DAS AMOSTRAS DE ROL E ROC .....	70

4.2	CONCRETO FRESCO .....	71
4.2.1	ENSAIOS DE ABATIMENTO DE TRONCO DE CONE .....	72
4.2.2	ENSAIOS DE TEMPO DE PEGA.....	75
4.3	CONCRETO ENDURECIDO.....	77
4.3.1	ENSAIOS MECÂNICOS .....	77
4.3.1.1	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL.....	77
4.3.1.2	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL.....	79
4.3.1.3	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO .....	81
4.3.1.4	MÓDULO ESTÁTICO DE ELASTICIDADE.....	83
4.4	ESPECTROSCOPIA POR FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X DAS AMOSTRAS DE ROC E ROL.....	85
4.5	ESTUDO DA REATIVIDADE DOS METAIS PESADOS NOS CONCRETOS COM ROC E ROL.....	87
4.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	91
5	CONCLUSÕES.....	91
	REFERÊNCIAS .....	93
	BIBLIOGRAFIAS .....	100

## 1 INTRODUÇÃO

O estudo de alternativas para a redução do impacto ambiental causado pela inadequada gestão de resíduos industriais tem sido de fundamental importância no contexto das construções sustentáveis.

Diversas possibilidades de reciclagem e de aplicação destes resíduos em outros materiais têm sido estudadas, visando à reutilização destes resíduos como forma de contribuir com o meio ambiente e, conseqüentemente, reduzir o impacto ambiental.

De acordo com Isaia (2000, p. 344), “[...] o crescimento da população mundial e a crescente demanda por novas construções e facilidades de infraestrutura nos coloca em um cenário de um alto consumo de cimento, especialmente na forma de estruturas de concreto de maior durabilidade.”

Dessa forma, o conceito de sustentabilidade se tornou de fundamental importância para o desenvolvimento benéfico do planeta, de forma que o presente trabalho apresenta uma alternativa de destinação para os resíduos de óleo de cozinha (ROC) e para os resíduos de óleo lubrificante (ROL). Estes foram agregados à matriz do concreto convencional para a elaboração de concreto com a finalidade de aplicação em pavimentos, buscando a redução do impacto no meio ambiente e possibilitando aplicações diversas na construção civil.

### 1.1 Objetivos

Constituíram objetivos específicos desta pesquisa:

- Análise da influência da adição de ROC e ROL nas propriedades reológicas da pasta de cimento Portland (especificamente o tempo de pega) e nos ensaios de abatimentos (“*Slump Test*”) dos concretos;
- Análise da influência da adição ROC e ROL nas propriedades mecânicas do concreto, especificamente resistência à compressão

axial, resistência à tração na flexão, resistência à tração na compressão e módulo de elasticidade;

- Análise da existência dos metais pesados no ROC e ROL para verificação da reatividade destes dentro da estrutura de concreto, por meio da microscopia eletrônica de varredura (MEV) e por Espectroscopia por Fluorescência de Raios-X com acoplamento do *Energy Dispersive X-Ray Detector* (EDS).

### 1.1.1 Justificativa da Pesquisa

O uso não ordenado, a escassez dos recursos naturais e a conscientização sobre os descartes correto de resíduos é de significativa importância para a redução dos impactos ambientais causados pelo inadequado descarte destes na natureza.

O volume de resíduos de óleo produzidos no Brasil está cada vez mais crescente e, conseqüentemente, o descarte desses materiais na natureza se torna progressivamente mais complicado. De acordo com a Associação Brasileira para Sensibilização, Coleta e Reciclagem de Resíduos de Óleo Comestível ( COLETA E RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE ÓLEO COMESTÍVEL- ECOLEO, 2012), o óleo é o maior poluidor de águas doces e salgadas das regiões mais adensadas do Brasil.

A disposição final dos resíduos de óleo, mais especificamente ROC, geram outras variadas formas de problemas, tais como (OLIVEIRA; SOMMERLATTE, 2008, p.6-7):

- Incrustações nas tubulações, emulsificando com a matéria orgânica, ocasionando formações de sólidos e retendo outros resíduos;
- Aumento das pressões internas das tubulações, ocasionando rompimento de dutos e, conseqüentemente, contaminação de solo e lençol freático;
- Aumento de custos com tratamento de esgoto, pois 1 (um) litro de ROC polui cerca de 1 (um) milhão de litros de água;

- Prejudica as estações de tratamento de esgoto, visto que os ROC agem negativamente no desempenho dos decantadores e dos biodigestores anaeróbicos, que acabam produzindo uma maior carga orgânica, ocasionando uma maior geração de lodo;
- Prejudica as comunidades aquáticas, pois, pela diferença de densidade entre óleo e a água, o óleo sobrenada na água, impedindo a passagem de luz, reduzindo a interface ar-água, dificultando as trocas gasosas e, conseqüentemente, a oxigenação do corpo hídrico;
- Aumento do aquecimento global, pois o ROC, em contato com a água do mar, sofre reações químicas, decompondo-se anaerobicamente, liberando gás metano e poluindo a atmosfera;
- Obstrução dos interstícios do solo, dificultando a drenagem das águas, tornando o ambiente propício a alagamentos;
- Desperdício, pois é um excelente subproduto para a cadeia produtiva.

De acordo com Oliveira e Sommerlatte (2008, p.7), existem atualmente tecnologias e processos industriais que são utilizados para a reciclagem do ROC. Dentre os processos, o autor cita as seguintes:

[...] fabricação de sabão e detergentes, incorporação do óleo no processo de fabricação de ração animal, lubrificantes para as formas de fabricação de tijolos de plásticos, fabricação de biodiesel, utilização na fábrica de resinas para colas e tintas industriais, amaciante de couro, indústria de cosméticos ou outros produtos à base de óleo vegetal (OLIVEIRA; SOMMERLATTE, 2008, p.7).

No Brasil, existem poucas legislações que tratam deste assunto, tais como: Lei Nº 7.862, de 19 de dezembro de 2002, onde dispõe sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos no Estado do Mato Grosso; Lei Nº 12.047, de 21 de dezembro de 2005, onde dispõe sobre a Política Estadual de Tratamento e Reciclagem de Óleos e Gorduras de Origem Vegetal ou Animal e Uso Culinário no

Estado de São Paulo; Lei Nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, que dispõe sobre a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Estas legislações têm como objetivo preservar a saúde pública, proteger e melhorar a qualidade do meio ambiente, estimular a recuperação das áreas degradadas, assegurar a utilização adequada e racional dos recursos naturais, disciplinar o gerenciamento integrado dos resíduos, beneficiar social e economicamente, entre outros.

Dentro do contexto do gerenciamento de resíduos sólidos, tratando-se especificamente sobre os resíduos originados de óleo, os ROL são extremamente nocivos à saúde humana quando dispostos inadequadamente.

Os óleos lubrificantes, essencial para o desenvolvimento das atividades humanas, em função do uso normal ou circunstâncias acidentais acabam se degradando a ponto de não mais serem úteis às suas finalidades originais, tornando-se um resíduo altamente perigoso, contendo metais pesados, ácidos orgânicos, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA's) e dioxinas NBR 10.004 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT, 2004).

De acordo com Chin et al. (2012), é estimado que um quarto de um galão de óleo lubrificante pode poluir mais de 250.000 galões de água potável, que é suficiente para suprir, por um ano, quase 50 pessoas.

Diante dessas peculiaridades e da importância deste assunto no âmbito da sustentabilidade ambiental, este trabalho apresentou um estudo da alternativa de descarte dos resíduos de óleo, sejam ROC ou ROL, em compostos de concretos para aplicação em pavimentação. Para isto, analisou-se a influência dos resíduos de óleo nas propriedades mecânicas e reológicas dos concretos e verificou-se a possibilidade da presente proposta.

## **1.2 Conteúdo e Estrutura da Dissertação**

Os capítulos seguintes foram elaborados de tal forma que fosse possível apresentar de maneira clara os principais conceitos envolvidos neste trabalho, o desenvolvimento da pesquisa, as conclusões e as contribuições desta dissertação.

Desta forma, esta dissertação está dividida em 7 capítulos, sendo o capítulo 2 referente à revisão bibliográfica. Neste capítulo se abordou concretos elaborados a partir de cimento Portland, elemento ligante da estrutura cimentícia. Abordou-se também a respeito da importância da utilização de concretos para aplicação em pavimentos e da utilização de resíduos nos mesmos, como forma alternativa de reutilização, focando na redução do impacto ambiental causado pelos resíduos sólidos no meio ambiente e as graves consequências que a má gestão de resíduos pode causar para a saúde humana. Neste mesmo capítulo, buscou-se identificar pesquisas relacionadas também à análise e estudo da reatividade de metais pesados dentro do concreto, uma vez que, dependendo do resíduo, geralmente é encontrado vários tipos de metais pesados em suas composições, podendo causar, se não cautelosamente tratado, danos à natureza.

O capítulo 3 refere-se aos materiais e métodos utilizados neste trabalho. Os métodos estão apresentados quanto à modelagem, preparação, caracterizações e traços do concreto em estudo, assim como aos métodos referentes às técnicas de ensaio de determinação de parâmetros mecânicos, tais como resistência à compressão axial, resistência à tração na compressão diametral e resistência à tração na flexão, módulo de elasticidade e verificação da existência de metais pesados reativos em concretos, quando adicionados resíduos de óleo à pasta de cimento.

O capítulo 4 está apresentado como o capítulo de resultado e discussões, onde estão apresentados todos os valores obtidos por meio das técnicas apresentadas no capítulo 3. O capítulo 4 está subdividido em 4 principais subitens: resultado dos ensaios de caracterização dos materiais, resultado das propriedades da pasta de cimento no estado fresco; propriedades da pasta de cimento no estado endurecido, analisando as propriedades mecânicas; os resultados de verificação da presença de metais pesados e sua reatividade em concreto por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

No capítulo 5, estão as conclusões dos resultados que foram obtidos neste trabalho e, finalmente nos capítulos 6 e 7, estão as referências bibliográficas e as bibliografias complementares, sendo estas também de fundamental importância para a construção deste trabalho de dissertação de mestrado.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Concreto à base de cimento Portland

Concreto é um dos materiais de construção mais utilizados no mundo. Este é composto basicamente por agregados que estão presos por uma pasta cimentícia, da qual é composta de material cimentício e água (NAIK; MORICONI, 2006).

Estruturas de concretos, incluindo edifícios, pontes, estruturas hidráulicas, constitui uma ampla participação da infraestrutura civil moderna. Os principais constituintes do concreto são Cimento Portland, agregados e água. Quando misturados, o cimento reage com a água para formar um ligante, que é responsável por segurar os agregados dentro do composto. Após o endurecimento, o material resultante é um composto resistente à compressão, mas relativamente pouco resistente em tração (LEUNG, 2001).

De acordo com Lambert, Brueckner e Atkins (2010, p. 2350),

Concreto é um sistema de três fases consistindo de cimento, agregados e água. Atualmente, concreto é considerado um sistema de cinco fases por causa das adições e dos aditivos, que melhoram as propriedades e a redução de custos.

O cimento, conforme EN 197-1 (ABNT, 2010), “[...] é um ligante hidráulico, isto é, um material inorgânico que, quando misturado com água, forma uma pasta que seca e endurece por meios de reações e processos de hidratação, mantendo sua força e estabilidade até mesmo sobre a água.” Além de reagir com a água, o cimento tem por finalidade promover a união entre os agregados graúdos e agregados miúdos com a pasta de cimento.

O cimento Portland comum (CPC) é composto de óxidos de sílica, óxidos de alumina, óxidos de cálcio, óxidos de ferro, em variadas composições percentuais em massa.

Os agregados ocupam mais de 75% do volume do concreto, são de fundamental importância para suas propriedades mecânicas (LAMBERT; BRUECKNER; ATKINS, 2010). Estes podem ser divididos em: graúdos e miúdos.

Para que haja qualidade na elaboração de um concreto, os agregados devem ter um bom empacotamento, isto é, “[...] deve seguir determinadas distribuições de tamanhos de partículas dos agregados, que é alcançado utilizando dois tipos de grupos de agregados: miúdos (0-5 mm) e graúdos (>5 mm) para o tamanho das partículas [...]” (LAMBERT; BRUECKNER; ATKINS; 2010, p. 2355). Os agregados miúdos são também referidos como areia.

A água é a terceira mais importante fase dentro do sistema de concreto, ao lado do cimento e dos agregados, de acordo com Lambert, Brueckner e Atkins (2010). A água é essencial para a formação de resistência dentro da pasta de cimento através das reações de hidratação.

As adições são consideradas como sendo produtos químicos, natural ou manufaturados, os quais são adicionados ao concreto antes ou durante a mistura dos compostos (CONCRETE IN PRACTICE - CIP, 2001). As adições são utilizadas para modificar as propriedades do concreto ou da argamassa, para fazer com que haja mais trabalhabilidade, ou economia, ou para qualquer proposta de redução energética (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - ACI, 1991).

## **2.2 A Importância do Pavimento de Concreto**

O pavimento de concreto não é novidade nas vias e rodovias brasileiras. De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP, 2012), “[...] o Brasil foi um dos primeiros países a empregá-la já no início de século XX, e sua utilização foi intensificada até a década de 1970 [...]”.

Os pavimentos de concreto podem ser muito eficientes quando empregado em vias de acesso com intenso trânsito, por possuir um tempo de vida útil maior que as demais alternativas de pavimentação e, também por não sofrer deformações plásticas (ACBP, 2012).

De acordo com a Associação Brasileira das Empresas de Serviços de concretagem (ABESC), a durabilidade é um dos principais benefícios do pavimento de concreto. A resistência dos pavimentos de concreto é superior aos outros tipos de pavimentos, garantindo maior durabilidade às superfícies de vias de transportes utilizadas em cidades e rodovias (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇOS DE CONCRETAGEM-ABESC, 2012).

A durabilidade dos pavimentos de concreto depende de diversos fatores incluindo design inicial, as propriedades dos materiais, a intensidade do tráfego, ambiente, entre outros fatores (ZHANG; WANG; JU, 2013). “[...] os pavimentos de concreto de cimento oferece vantagens excelentes em termos de durabilidade e eficiência econômica.” (CHOI; PARK; JUNG, 2011, p. 2815).

De acordo com Castro (2000), “A experiência e o bom senso aconselham valor de resistência característica à tração na flexão aos 28 dias, igual a 4,5 MPa [...], correspondente a um concreto de características globais e comportamento plenamente convenientes às finalidades do pavimento”. Projetos de utilização de pavimentos de concreto em corredores de ônibus tem mostrado resistências características à tração na flexão semelhantes, adotando “4,5 MPa, espessura de 0,25 metros, colocado sobre a estrutura do pavimento [...]” (GIUBLIN et al., 2010, p.15).

Além do concreto ser durável, este pode se tornar ambientalmente sustentável com a utilização de resíduos. Possibilitar alternativas para a disposição de resíduos é de fundamental importância para a construção sustentável.

### **2.3 Resíduos em Concreto e a Sustentabilidade nas Construções**

Durante anos, o modelo de desenvolvimento tradicionalmente adotado, convergiu para políticas de extrativismo dos recursos naturais sem a inserção equitativa de benefícios sociais e econômicos para o ser humano, sendo este chamado de desenvolvimento explorador. Contudo, torna-se necessário adotar modelos alternativos de desenvolvimento, para que futuras gerações possam desfrutar dos benefícios dispostos pela natureza, sendo este modelo de desenvolvimento denominado de desenvolvimento sustentável (CABRAL, 2007).

A qualidade de vida dos seres humanos pode ser alterada significativamente por meio de utilizações de novas descobertas científicas para a produção de bens de consumo. De fato, novas técnicas ou materiais podem servir de subsídios para a produção de bens de consumo, seja caráter de inovação ou de desejabilidade, para aplicações específicas que venham facilitar a vida das pessoas (MODRO et al., 2009). No entanto, o aumento na produção de bens de consumo

implica em acúmulo de quantidades significativas de resíduos, ocasionando problemas ambientais e impactando o meio ambiente.

Mehta (2001) afirma que somente 6% dos materiais produzidos, cerca de 500 bilhões de toneladas por ano, atualmente é finalizado como produtos desejáveis, enquanto que a maior parte da matéria prima, retornam ao meio ambiente como resíduo prejudicial. Estes resíduos são um dos principais fatores de impactos ambientais existente, devido à sua disposição inadequada na natureza, poluindo o meio ambiente.

De acordo com Modro et al. (2009), entre as alternativas possíveis para a destinação final de resíduos, podem-se destacar a decomposição dos resíduos em aterros e a reciclagem que, além de reduzir a criação de novos aterros, reduz a utilização de novos recursos naturais não renováveis.

A decomposição dos resíduos em aterros pode causar problemas ao meio ambiente a médio e longo prazo, variando com o tipo de resíduo que se deposita nestes aterros. Dessa forma, a reciclagem tem sido um assunto frequentemente abordado por muitos pesquisadores, apresentando sua importância para o desenvolvimento sustentável e possibilitando meios de reutilização de resíduos sólidos em diversas áreas da engenharia e agricultura.

Para Naik e Moriconi (2005), apesar da emissão de gases prejudiciais na produção de cimento Portland, que é um dos constituintes do concreto, este ainda é considerado como um material ambientalmente sustentável por possuir características próprias de durabilidade, resistência e baixo impacto ambiental, além de contribuir para o progresso social e crescimento econômico. Dessa maneira, a destinação de resíduos dentro de misturas de concretos possibilita reduzirmos o impacto ambiental dentro do contexto das construções sustentáveis.

Vários autores têm proposto alternativas de adicionar os resíduos de materiais dentro das misturas de concreto, como alternativas de redução do impacto ambiental. Estes estudos têm sido fundamentais para contribuir com o desenvolvimento sustentável, apresentando uma destinação mais nobre aos resíduos que simplesmente dispostos no meio ambiente. (MODRO et al., 2009)

A sustentabilidade ambiental, de acordo com Naik e ASCE (2008, p.98), “[...] significa resolver as necessidades do presente sem comprometer a habilidade das futuras gerações encontrar suas próprias soluções”. Dessa maneira, “[...] a sustentabilidade das indústrias de cimento e concreto é **imperativa** para o bem-

estar de nosso planeta e para o desenvolvimento humano” (NAIK; ASCE, 2008, grifo nosso).

As inovações nas construções atuais estão concentradas em quatro grandes direções, as quais podem ser definidas simplesmente como (COPPOLA; CERULLI; SALVIONI, 2003, p. 2):

- Construir de maneira sustentável;
- Construir construções confortáveis;
- Construir bem e eficientemente;
- Programar adequadamente as manutenções das construções.

No contexto das inovações das construções, a sustentabilidade se encontra como um dos fatores fundamentais para o desenvolvimento humano e econômico do planeta, focada na durabilidade e na redução do consumo energético. Sob este ponto de vista, alternativas de construções duráveis, com a adição de componentes reciclados, são de grande benefício para a natureza.

A reutilização de resíduos sólidos, derivados de estruturas de concreto de demolição, como componentes de agregado na elaboração de concreto, foi introduzida na prática há muitos anos. Desde o início, tem sido considerado de grande importância dois aspectos ambientais: “[...] resolver o problema do aumento de armazenamento dos resíduos de demolição e proteger os limites das fontes naturais de agregados [...]” (AJDUKIEWICZ; KLISZCZEWICZ, 2002, p. 269).

Recentemente, diversos pesquisadores têm estudado as características mecânicas e físicas de agregados com resíduos reciclados e suas influências nas propriedades do concreto fresco e endurecido, apresentando possibilidades de destinação, diminuindo o impacto ambiental causado quando destinado inadequadamente (CHAKRADHARA, 2001).

Dentre os resíduos e grande impacto ambiental, encontram-se os resíduos de óleo, tais como: ROC e ROL. Estes, como já foram apresentados anteriormente, são altamente impactantes no meio ambiente e redes de esgotos, necessitando de gerenciamento e estratégias específicas de reciclagem.

Nos itens seguintes, apresentam-se diversos estudos da influência dos resíduos de óleo nas propriedades do concreto fresco e endurecido, bem como estudos das reatividades de metais pesados no concreto endurecido, quando adicionados resíduos com metais pesados à mistura.

### 2.3.1 Resíduos de óleo em Concretos

Sobre o ponto de vista de desenvolvimento sustentável, meios e propostas de redução de impactos ambientais causados por resíduos de óleo na natureza é de extrema importância. Dessa maneira, o concreto pode ser utilizado como meio de disposição e reduzir o impacto causado por estes resíduos de óleo.

Pukhov (2001, p. 373), estudou os efeitos do óleo mineral impregnado nas estruturas reforçadas de concretos em instalações de usinas hidrelétricas. Constatou-se que compostos de óleo mineral [óleos provenientes de turbinas, máquinas, transformadores, etc.] são agressivos às estruturas de concreto, mas o nível de agressividade depende da qualidade do concreto e de sua densidade. No estudo de Pukhov (2001), a resistência à compressão axial do concreto impregnado com óleo apresentou uma redução de 20 à 63% com relação ao concreto sem impregnação de óleo, concluindo que a presença do óleo mineral é agressiva ao concreto, no caso de utilização como concreto reforçado para estruturas de alta solicitação de resistência, como em usinas hidrelétricas.

Quanto à durabilidade de estruturas de concreto reforçado, Błaszczyszki (2002) observou a influência de hidrocarbonetos e as falhas progressivas causadas pela mesma, identificando que os produtos de óleo afetam sua resistência à compressão, devido à diminuição da força das ligações interfásicas.

Outros resultados semelhantes foram obtidos por Ejuh e Uche (2009). Estes prepararam amostras de concreto com controle da variável água/óleo, curados à temperatura ambiente aos 3, 7, 28 e 56 dias. Os autores observaram que as amostras de concreto de cimento Portland são suscetíveis à agressividade de soluções, com diferentes concentrações de óleo, apresentando baixa taxa de desenvolvimento da resistência à compressão e baixa taxa de corrosão.

Al-Attar (2013) apresentou uma proposta quantitativa para a resistência à ruptura, sendo esta dependente principalmente da compressão axial do concreto. Intencionalmente, tratou os agregados graúdos com óleo de motor e com tinta óleo para investigar os efeitos nas ligações interfásicas<sup>1</sup>, observando alterações nas propriedades de resistência à ruptura do concreto. Concluiu que o efeito destes agregados, quando envoltos de óleo de motor e/ou tinta, reduz a força de ligação entre

---

<sup>1</sup> O autor se refere a “interfásicas” o sistema de componentes que integram o composto de concreto, tais como cimento, agregados e água.

agregado e a pasta de cimento, diminuindo consideravelmente suas propriedades mecânicas.

Em estudos relacionados à influência das propriedades mecânicas dos concretos, Diab (2012) analisou as variações da resistência à compressão de concretos mergulhados em óleo. Observou que, com o derramamento de óleo em antigas estruturas de concreto, resultaram em uma melhora nas propriedades de resistência ao gelo-degelo<sup>2</sup>, sugerindo estudos para técnicas de disposição de resíduos de óleo dentro do concreto. O autor sugere que o acréscimo de óleo no concreto pode ser similar à adição química para incorporação de ar no concreto, aumentando algumas propriedades de durabilidade do concreto.

Ajagbe et al. (2012) também investigaram algumas propriedades do concreto fresco e do concreto endurecido com a contaminação de óleo no agregado miúdo. Realizaram-se testes em amostras com diferentes níveis de contaminação de óleo na areia em peso. As propriedades como trabalhabilidade, fator de compactação, resistência à compressão, resistência à flexão, absorção de água, resistência ao fogo, entre outras, foram determinadas utilizando métodos padronizados. Os resultados mostraram que a trabalhabilidade e o fator de compactação aumentaram com os níveis de contaminação. As propriedades relativas à resistência à compressão, resistência à tração, absorção de água e resistência ao fogo diminuíram significativamente com o aumento da contaminação de óleo na areia. Os autores concluíram que a areia contaminada com óleo abaixo de 10% em peso pode ser utilizada em estruturas com baixa solicitação de resistência mecânica. No entanto, a areia com mais 5% de contaminação de óleo reduz a resistência à compressão do concreto em mais de 50%.

Na mesma linha de pesquisa, Abdelaziz (2007) estudou os efeitos do ROL como adições em concretos e relatou alterações significativas no seu desempenho durante o estado fresco. Além disso, o ROL diminuiu o tempo de início de pega do concreto e aumentou a consistência, teor-de-ar e a perda da taxa de fluidez do concreto de cimento Portland.

Analisando os efeitos do óleo diesel na areia, Ayininuola (2009) estudou a influência na resistência à compressão destes concretos. Observou que a

---

<sup>2</sup> A propriedade de resistência ao gelo-degelo é uma propriedade muito importante para estruturas de concretos localizados em ambientes de alta variação de temperatura, de forma que grandes variações destas podem ocasionar fissuras e trincas na estrutura, ocorrendo o desgaste do concreto.

presença de óleo diesel e betumem, em qualquer proporção na areia, resultou em uma perda significativa de resistência à compressão, apresentando claramente que o óleo diesel e o betumem são inibidores de resistência à compressão na produção de concretos.

Estudos sobre os efeitos dos ROL nas propriedades dos concretos também foram realizados por Hamad et al. (2003), obtendo os seguintes resultados:

- O ROL agiu como um plastificante químico, melhorando a fluidez e quase dobrando a consistência da mistura do concreto fresco, pois com uma razão água-cimento de 0,59 obteve o mesmo abatimento que o concreto de referência, com uma relação de água cimento de 0,62;
- O concreto com mistura de ROL resultou em uma perda média de 21, 17 e 6% nos valores de resistência à tração na flexão, resistência à tração na compressão e no módulo de elasticidade respectivamente quando utilizada a mesma relação água-cimento do concreto de referência;
- O concreto com mistura de ROL, com uma relação água-cimento de 0,59, manteve as propriedades de resistência à tração na flexão, resistência à tração na compressão e o módulo de elasticidade quando comparado com o concreto de referência, que teve uma relação água-cimento de 0,62;
- A utilização de ROL em concretos dobrou o teor de ar quando comparado com concreto de referência;
- O ROL aumentou o teor-de-ar dentro da mistura do concreto fresco.

Beddu et al. (2008) analisaram o efeito do ROL em estruturas de concreto de alto desempenho, utilizados como adição química. Observou que o ROL não afetou adversamente o processo de desenvolvimento da resistência do concreto. Quanto à adição de ROC no concreto, não foi encontrado nada na literatura.

Abdul-Ahad e Mohammed (2000) estudaram os efeitos dos concretos mergulhados em óleo por 60 dias. Verificaram uma redução de aproximadamente de 12% na resistência à compressão devido à absorção de uma grande quantia de óleo.

Nas propriedades de resistência à tração por compressão diametral destes concretos mergulhados em óleo por 60 dias houve uma redução de 11% e um aumento de 4% no módulo de elasticidade devido à absorção de óleo.

O principal objetivo deste trabalho consiste em analisar os efeitos dos ROC e ROL no concreto, verificando suas propriedades mecânicas, com a finalidade de possibilitar uma destinação para estes resíduos, caso isto seja técnica e economicamente viável. Contudo, determinados ROL podem possuir metais pesados reativos, sendo nocivo à saúde. Portanto, é fundamental analisar se existem metais pesados e se os efeitos destes metais pesados se tornam inertes quando dentro do concreto enrijecido.

No próximo item, serão apresentados alguns estudos de verificação de metais pesados em compostos de concretos, e os resultados obtidos pelos pesquisadores.

## **2.4 Reatividade de Metais Pesados em Compostos de Concretos.**

O desenvolvimento sustentável é atualmente não somente uma realidade, mas uma necessidade, sendo um comprometimento com as gerações futuras. Como a concentração de metais pesados nos resíduos pode ser ampla e, conseqüentemente exceder o limite aceitável que não seja prejudicial ao meio ambiente, os metais pesados contidos nesses resíduos acarretam sérios danos à saúde humana e animal e necessitam de tratamento adequado (CHEN et al., 2009).

Solidificação e estabilização (S/E) dos metais pesados, nos resíduos industriais e em solos contaminados é uma das tecnologias mais atrativas para reduzir a toxicidade, ou seja, convertendo o resíduo tóxico para uma forma física ou quimicamente mais estável, isto é, um material menos tóxico.

Segundo Chen et al. (2009), o objetivo da estabilização é alcançar e manter as propriedades físicas desejáveis, com a estabilização química permanente do ligante contaminante, pois a solidificação dos metais pesados envolve interações químicas entre os resíduos quimicamente reativos e o agente ligante. A alta resistência, baixa permeabilidade e a alta durabilidade relativa do cimento hidráulico

o torna um ótimo ligante para a técnica de gerenciamento de resíduos contendo metais pesados. No entanto, Chen et al. (2009, p. 399) afirmam que:

Os metais pesados frequentemente alteram as reações de hidratação do cimento. A hidrólise de metais pesados resultam em redução de pH e acelera a hidratação do cimento. Podem influenciar a formação e propriedades (estruturais e de permeabilidade) da camada de proteção hidratada, e influenciar a nucleação e crescimento dos produtos de reação.

Os “[...] componentes dos resíduos podem retardar ou até mesmo parar a hidratação do cimento pela precipitação de compostos insolúveis na superfície das partículas de hidratação cimentícia” (VAN EIJK; BROUWERS, 2001, p. 279).

A tecnologia de estabilização e solidificação em matrizes cimentícia é considerada uma opção atrativa para o gerenciamento de resíduos contendo metais pesados, reduzindo a liberação de contaminantes no meio ambiente. Porém, como os elementos de metais pesados podem alterar significativamente as propriedades do concreto, a eficácia da solidificação e estabilização pode ser “[...] melhorada modificando as composições do cimento e controlando a temperatura, relação água-cimento, tamanho de partículas, e outros fatores que afetam o tempo de cura e o desenvolvimento da resistência e a durabilidade a longo prazo [...]” (CHEN et al., 2009, p. 399).

Existe um grande interesse sobre os impactos ambientais causados pelos materiais à base de cimento, especialmente os que contêm metais pesados, ou seja, elementos como chumbo, cádmio, cromo, zinco, manganês, cobre, entre outros. Para Yu et al. (2005), o principal aspecto com relação ao impacto ambiental causado pelos materiais compostos à base de cimento é a lixiviação de compostos inorgânicos quando estão em contato com a água, extraindo as substâncias tóxicas e poluindo os lençóis freáticos e solos.

Díez, Madrid e Macías (1997) estudaram e analisaram a imobilização química e física do Cádmio, elemento químico tóxico e nocivo à saúde humana quando em contato à exposições longas, dentro de amostras de concreto por difração de raios-X. Observaram que o concreto de cimento Portland comum pode reter a reatividade do Cd. No entanto, os autores afirmam que a propriedade do cimento Portland de reter a reatividade do elemento tóxico pode ser afetada pela deterioração do cimento devido ao ataque do próprio ambiente. Neste estudo, Díez, Madrid e Macías ainda afirmam que:

O ataque do dióxido de carbono ou a carbonatação é a forma mais comum de ataque do ambiente em concretos e isto promove mudanças na composição química e nas propriedades físicas, afetando a retenção de metais pesados em longo prazo (DIEZ; MADRID; MACPIAS, 1997, p. 337).

Verificou-se em estudos posteriores que determinadas concentrações de chumbo em água afeta significativamente as propriedades do concreto fresco e endurecido. (REDDY; REDDY, 2011). Os autores ainda afirmam que “A presença de altas concentrações de chumbo ( $\geq 3000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) em água deionizada diminui drasticamente a resistência à compressão [...]” (REDDY; REDDY, 2011, p. 168).

Yousuf et al. (1995) explica alguns fenômenos relacionados à química do cimento, especificamente pertinente à interface mineral-água, através do “Modelo da Carga Dispersa”. Este modelo é importante para o entendimento do fenômeno das interações interfásicas na hidratação do cimento e na estabilização/solidificação de sistemas baseados em matrizes cimentícias. Além disso, “[...] explica os efeitos de retardamento da hidratação do cimento devido aos componentes de zinco, cádmio e superplastificantes” (YOUSUF et al., 1995, p. 147).

Para Katsioti et al. (2008), uma das formas mais eficientes de se estabilizar metais considerados perigosos, em matriz cimentícia, é por meio da utilização de materiais pozolânicos juntamente com cimento Portland e os respectivos resíduos.

A efetividade de uma imobilização foi provada com experimentos de solidificação de metais pesados contidos em resíduos perigosos (GIERICZNY; KRÓL, 2008). Os autores verificaram que, utilizando, como por exemplo, adições minerais nas matrizes de concretos, a solidificação dos metais pesados é benéfica sobre o ponto de vista ambiental em diversos aspectos. “Os materiais produzidos não são impactantes para o ambiente e os metais pesados podem ser armazenados ou implementados em pavimentação asfáltica” (GIERICZNY; KRÓL, 2008, p. 255).

No presente trabalho será estudada a existência de metais pesados nos concretos contendo ROL e ROC, utilizando a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), acoplado um sistema de detecção energética espectral (EDS), cuja técnica será apresentada no próximo capítulo.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Materiais

Os materiais utilizados neste trabalho foram os seguintes:

- Brita 0 – Agregado graúdo
- Brita 1 – Agregado graúdo
- Areia grossa – Agregado miúdo
- Cimento Portland tipo CP II-Z32 – Aglomerante
- Resíduos de óleo
- Água

A brita nº 0 e a brita nº 1, utilizadas como agregado graúdo para a elaboração dos corpos-de-prova de concreto, foram fornecidas pela empresa Mineração Grandes Lagos, localizada na cidade de Três Fronteiras, Estado de São Paulo.

A areia grossa, componente utilizado como agregado miúdo na preparação das amostras de concretos, foi doada pelo Porto de Areia de São Judas Tadeu, localizada na cidade de Andradina, Estado de São Paulo, próximo à cidade de Ilha Solteira.

O tipo de cimento Portland utilizado foi com a adição de Pozolana, CP II-Z32, haja visto que este é o tipo mais comum à venda na cidade de Ilha Solteira.

Já os resíduos de óleo utilizados nesse presente trabalho foram de dois tipos a considerar:

- Resíduo de óleo de cozinha (ROC);
- Resíduo de óleo lubrificante (ROL);

O ROC foram coletados nos restaurantes da cidade de Ilha Solteira. O ROL foram obtidos nos postos de combustíveis da mesma cidade. A água de amassamento foi proveniente da prefeitura da cidade de Ilha Solteira e assim sendo, presume-se isenta de substâncias prejudiciais à hidratação do cimento.

#### 3.2 Métodos

### 3.2.1 Ensaios de Caracterização de Materiais

#### 3.2.1.1 Granulometria e Módulo de Finura dos Agregados

Os ensaios granulométricos dos agregados foram realizados conforme NBR NM 248 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2003). Esta norma prescreve o método para a determinação da composição granulométrica dos agregados graúdos e miúdos para o concreto.

Estes ensaios foram realizados através de um conjunto de peneiras sucessivas, em conformidade com a NBR NM-ISO 3310-1 (ABNT, 2010). As respectivas peneiras possuem aberturas de malhas bem definidas, conforme Tabela 1.

**Tabela 1-** Séries de Peneiras utilizadas no ensaio de granulometria (NBR NM 248, 2001)

<b>Série Normal</b>	<b>Série Intermediária</b>
75 mm	-
-	63 mm
-	50 mm
37,5 mm	-
-	31,5 mm
-	25 mm
19 mm	-
-	12,5 mm
4,75 mm	-
2,36 mm	6,3 mm
1,18 mm	-
600 $\mu\text{m}$	-
300 $\mu\text{m}$	-
150 $\mu\text{m}$	-

As amostras foram colocadas em recipientes metálicos, secas em estufas e resfriadas até a temperatura ambiente. As estufas mantiveram as duas amostras a uma temperatura de  $(105 \pm 5)$  °C, conforme norma respectiva.

De acordo com a NBR NM 26 (ABNT, 2000), foram coletadas e utilizadas duas amostras de cada agregado, as quais foram nomeadas M<sub>1</sub> e M<sub>2</sub>, conforme Tabela 2.

**Tabela 2-** Massa mínima da amostra em função da dimensão característica (NBR NM 248, 2001)

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

As peneiras (ver Tabela 1) devem se encontrar limpas e previamente inspecionadas. Estas foram colocadas na ordem adequada, em ordem decrescente de abertura da malha do topo à base, sob o agitador mecânico, de tal forma que o conjunto de peneiras seja único.

Com as peneiras encaixadas adequadamente, promoveu-se a agitação mecânica do conjunto de peneiras durante sete (7) minutos. Após o término da agitação mecânica, destacou-se a peneira superior e realizou-se a agitação manualmente em movimentos circulares e alternados por um (1) minuto continuamente, conforme NBR NM 248 (ABNT, 2003).

A partir de então, o material retido foi colocado em bandejas identificadas conforme a abertura da peneira, sendo retirado todo o material da tela das peneiras, por meio de um pincel de cerdas flexíveis. O material, retirado do lado interno da peneira, foi identificado como retido e do lado externo identificado como passante. Este foi para a bandeja identificada pelo número seguinte da malha da

peneira. Depois de toda a remoção dos materiais das peneiras, foi determinada a massa do material retido das mesmas. Todo o processo descrito foi repetido para a amostra  $M_2$ . A soma das massas de todas as peneiras não diferiu mais que 0,3% de  $M_1$ .

Após as respectivas massas retidas terem sido determinadas, foram calculados os percentuais em massa, de cada peneira, com aproximação de 0,1%. Os cálculos foram efetuados para se obter os percentuais médios e acumulados de cada peneira, o módulo de finura e a dimensão máxima característica. A dimensão máxima característica ( $D_{MÁX}$ ) corresponde à abertura nominal, em milímetros, da malha da peneira da série normal ou intermediária, na qual o agregado apresenta porcentagem retida acumulada menor ou igual a 5% em massa. O módulo de finura ( $MF$ ) se obtém pela soma das porcentagens retidas acumuladas em massa nas peneiras da série normal (Tabela 3), dividida por 100, conforme equação 1.

$$MF = \frac{\sum R_{acumulada}}{100} \quad [\text{eq 1}]$$

onde  $\sum R_{acumulada}$  é a quantidade de massa retida nas peneiras de serie normal. Após o término dos cálculos, é obtida a curva de granulometria em escala mono-logarítmica.

Para o ensaio de granulometria do agregado miúdo foi utilizada a série de peneiras descritas na Tabela 3.

**Tabela 3-** Série de peneiras utilizada para o ensaio de granulometria para o agregado miúdo (NBR NM 248:2003)

<b>Peneira (mm)</b>	<b>Série</b>
4,80	Normal
2,40	Normal
1,20	Normal
0,60	Normal
0,30	Normal
0,15	Normal

Após o cálculo do módulo de finura (MF), classifica-se a areia conforme as relações na Tabela 4.

**Tabela 4-** Classificação do agregado miúdo  
**Intervalos de**      **Classificação do**  
**Dimensões**      **Agregado Miúdo**  
**Características**

2,90<MF<3,50	Grossa
2,20<MF<2,90	Média
1,55<MF<2,20	Fina

A distribuição granulométrica dos agregados miúdos, determinada segundo a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003), deve atender os limites estabelecidos, apresentados na Tabela 5, conforme norma NBR 7211 (ABNT, 2009), para que possam ser utilizados como agregado miúdo para os corpos-de-prova de concretos.

**Tabela 5-** Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo (NBR 7211, 2009)<sup>3</sup>

Peneira com Abertura de Malha (ABNT NBR NM ISSO 3310-1) mm	Porcentagem, em massa, retida acumulada			
	Limites inferiores		Limites Superiores	
	Zona Utilizável	Zona Ótima	Zona Ótima	Zona Utilizável
9,5	0	0	0	0
6,3	0	0	0	7
4,75	0	0	5	10
2,36	0	10	20	25
1,18	5	20	30	50
0,6	15	35	55	70
0,3	50	65	85	95
0,15	85	90	95	100

Para classificação do agregado graúdo, segue o procedimento de granulometria. No entanto, as séries de peneira que foram utilizadas estão apresentadas na Tabela 6, de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003).

<sup>3</sup> O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90 mm, da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20 mm e da zona superior utilizável varia de 2,90 a 3,50 mm.

**Tabela 6-** Série de peneiras utilizadas no ensaio de granulometria do agregado graúdo (NBR NM 248, 2003)

Peneira (mm)	Série
25,00	Intermediária
19,00	Normal
12,50	Intermediária
9,50	Normal
6,30	Intermediária
4,80	Normal
2,40	Normal

Assim como há especificações dos agregados miúdos, os agregados graúdos possuem especificações quanto aos limites aceitáveis da composição granulométrica. A distribuição granulométrica, determinada segundo a NBR 248 (ABNT, 2003), deve atender aos limites indicados para o agregado graúdo constantes na Tabela 7.

**Tabela 7-** Limites da composição granulométrica do agregado graúdo, conforme norma NBR 7211 (ABNT, 2009)

Peneira com Abertura de Malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1) (mm)	Porcentagem, em massa, retida acumulada				
	Zona Granulométrica (d/D <sup>a</sup> )				
	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
75	-	-	-	-	0 - 5
63	-	-	-	-	5 - 30
50	-	-	-	0 - 5	75 - 100
37,5	-	-	-	5 - 30	90 - 100
31,5	-	-	0 - 5	75 - 100	95 - 100
25	-	0 - 5	5 - 25 <sup>b</sup>	87 - 100	-
19	-	2 - 15 <sup>b</sup>	65 <sup>b</sup> - 95	95 - 100	-
12,5	0 - 5	40 <sup>b</sup> - 65 <sup>b</sup>	92 - 100	-	-
9,5	2 - 15 <sup>b</sup>	80 <sup>b</sup> - 100	95 - 100	-	-
6,3	40 <sup>b</sup> - 65 <sup>b</sup>	92 - 100	-	-	-
4,75	80 <sup>b</sup> - 100	95 - 100	-	-	-
2,36	95 - 100	-	-	-	-

<sup>a</sup> Zona granulométrica correspondente à menor (d) e à maior (D) dimensões do agregado gráudo.  
<sup>b</sup> Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais em apenas um dos limites marcados com 2.

### 3.2.1.2 Caracterização dos Resíduos de Óleo

#### 3.2.1.2.1 Determinação do Ponto de Fulgor

O ensaio de determinação do ponto de fulgor dos ROC e ROL foi determinado pela norma D92 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM, 2005). O ponto de fulgor é uma das medidas de tendência da amostra de formar uma mistura inflamável com o ar sob determinadas condições especificadas. Esta medida pode indicar a possibilidade da presença de um material altamente inflamável e volátil.

O equipamento utilizado foi o Aparelho Ponto de Fulgor Cleveland à Gás em Vaso Aberto, conforme a norma D92 (ASTM, 2005), apresentado na Figura 1.

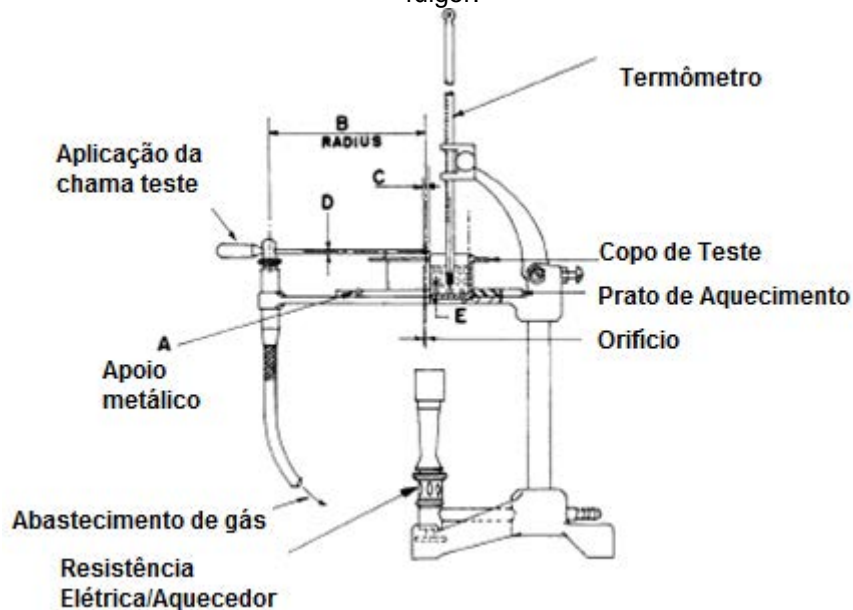
**Figura 1-** Fotografia do aparelho de Cleveland para determinação do ponto de fulgor.



**Fonte:** Próprio autor

Este aparato consiste de uma recipiente, uma plataforma de aquecimento, um aplicador de chama, um aquecedor e um suporte para adequar o termômetro, conforme representação esquemática do aparelho na Figura 2.

**Figura 2-** Representação esquemática do aparelho de Cleveland para determinação do ponto de fulgor.



Fonte: D92 (ASTM, 2005).

Foram colocadas aproximadamente 70ml de cada tipo de resíduo dentro do copo de teste. A temperatura da amostra dos ROC e ROL foram aumentadas rapidamente no início do teste e depois manteve-se a uma taxa crescente constante, porém menor que a inicial, próximo do ponto de fulgor da amostra. A intervalos específicos uma chama é acesa e colocada próxima ao copo, conforme Figura 3.

**Figura 3-** Fotografia do teste de chama na determinação do ponto de fulgor da amostra



Fonte: Próprio autor

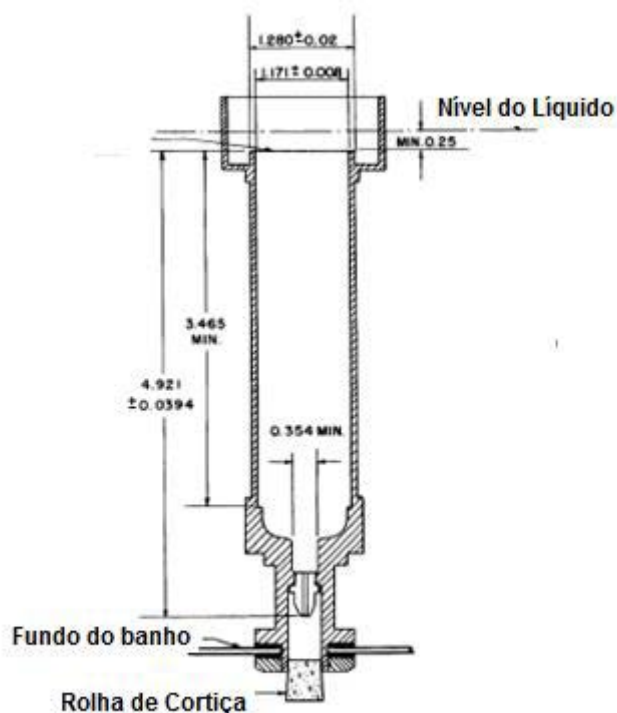
O ponto de fulgor é a menor temperatura na qual a aplicação de uma chama e o vapor da amostra causa a ignição. Para a determinação do ponto de fulgor, o teste é continuado até a aplicação de uma chama na amostra que causa a ignição e é sustentada por 5 minutos no mínimo D92 (ASTM, 2005).

### 3.2.1.2.2 Determinação da Viscosidade de Saybolt Furol

Para a determinação da viscosidade de Saybolt Furol foi utilizada a norma D88 (ASTM, 1968). Este método envolve a medida empírica da viscosidade de Saybolt de produtos de petróleo a temperaturas especificadas entre 70°F e 212°F.

O aparato utilizado neste ensaio foi o viscosímetro de Saybolt, conforme podemos observar a representação esquemática na Figura 4 e o equipamento na Figura 5 respectivamente.

**Figura 4-** Representação esquemática do viscosímetro de Saybolt com orifício de tipo Furol (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM, 1968)



Fonte: (ASTM, 1968)

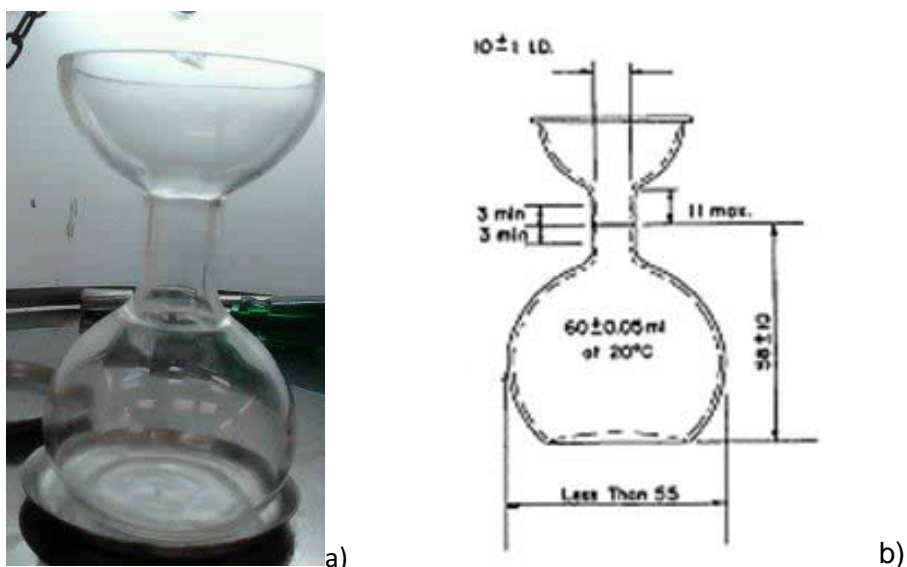
**Figura 5-** Aparato experimental para determinação da viscosidade de Saybolt dos ROC e ROL.



Fonte: Próprio autor

Este aparato é composto por um tubo de escoamento de líquido, um suporte para termômetro, um recipiente para receber o líquido escoado (conferir Figura 6), um cronômetro graduado em décimos de segundos e um termômetro, para leitura da temperatura da amostra.

**Figura 6-** a) Recipiente de vidro para armazenamento do líquido de escoamento. b) Representação esquemática do recipiente com as dimensões (em mm), conforme norma D88 (ASTM, 1968)

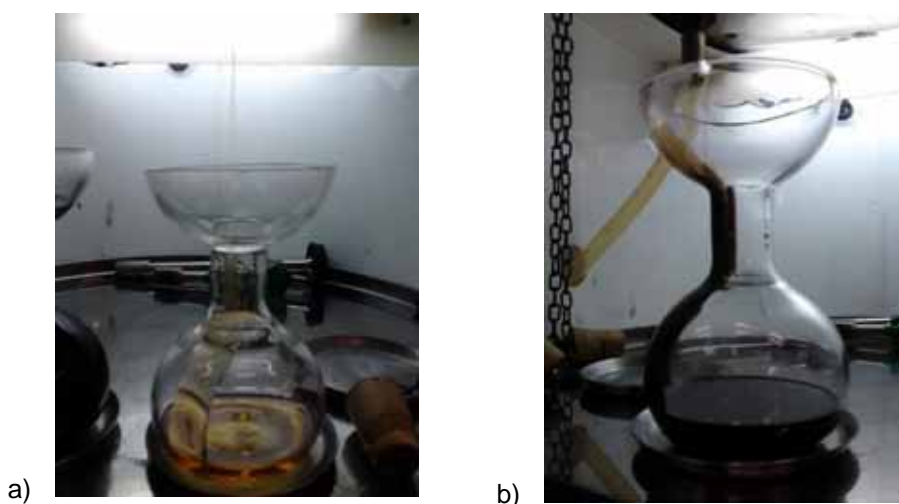


Fonte: a) Próprio autor, b) (ASTM, 1968)

A viscosidade Saybolt Furol é determinada pelo fluxo temporal, dado em segundos, de 60ml de uma determinada amostra fluindo através de um orifício

Furol calibrado sob condições específicas, conforme podemos verificar na Figura 7, até que todo o líquido escoo pelo tubo e seja depositado no recipiente (Figura 6), como podemos observar na Figura 8.

**Figura 7-** Escoamento dos ROC (a) e dos ROL (b) na determinação da viscosidade de Saybolt Furol.



**Fonte:** Próprio autor

**Figura 8-** Fotografia do recipiente contendo ROL (à esquerda) e ROC (à direita) para a realização do teste de viscosidade de Saybolt Furol.



**Fonte:** Próprio autor

O tempo é corrigido por um fator do orifício, e relatado como a viscosidade da amostra à determinada temperatura. As medidas foram realizadas, para ambas as amostras (ROC e ROL) para as temperaturas de 40°C e 100°C.

### 3.2.1.3 Determinação da Massa Específica do Agregado Miúdo

De acordo com a NBR NM 52 (ABNT, 2009), massa específica é a relação da massa com o respectivo volume, excluindo os poros permeáveis. Massa específica aparente é a relação entre a massa com o respectivo volume, incluindo poros permeáveis.

Para a realização do ensaio de obtenção da massa específica do agregado miúdo, a amostra foi coletada de acordo com o procedimento descrito na NBR NM 26 (ABNT, 2001) e reduzida para ensaio de laboratório conforme a NBR NM 27 (ABNT, 2001).

A aparelhagem utilizada no ensaio da determinação da massa específica do agregado miúdo foram as estabelecidas pela norma, como se seguem:

- ✓ Balança de Precisão;
- ✓ Frasco aferido;
- ✓ Molde troncocônico;
- ✓ Estufa;
- ✓ Bandeja metálica;
- ✓ Funil;

O frasco de aferição de volume, conforme Figura 9, foi utilizado no referido ensaio, sendo preenchido até a marcação de 200 cm<sup>3</sup>, deixando-o em repouso até que toda a água que se encontra presa à parede do frasco se escoe, de forma a completar o volume necessário e que haja a marcação correta da medida.

Em seguida, pesou-se 500g de massa de areia, isto é, o agregado miúdo (seco em estufa por 24 horas), em uma balança de precisão (erro = ± 0,1) e este foi colocado lentamente dentro do frasco, usando um funil. Agitou-se adequadamente o frasco com a areia e a água para que houvesse a eliminação de bolhas de ar, aguardando mais alguns minutos para que a água, novamente aderida à parede do frasco, pudesse escorrer e assim realizarmos a medida novamente.

**Figura 9-** Fotografia do frasco de Chapman com areia e água.



**Fonte:** Próprio autor

A massa específica do agregado miúdo é obtida pela equação 2:

$$m_{esp} = \frac{m_a}{V_a} \quad [eq\ 2]$$

onde  $m_{esp}$  é a massa específica do agregado miúdo,  $m_a$  é a massa do agregado miúdo, e  $V_a$  é o volume aferido pelo frasco ocupado pelo agregado miúdo.

Este ensaio foi realizado com duas amostras de 500g de agregado miúdo e os valores das massas específicas das duas amostras não devem diferir acima de  $0,05\text{ g.cm}^{-3}$ .

#### **3.2.1.4 Determinação da Massa Específica do Agregado Graúdo**

A determinação da densidade do agregado graúdo<sup>4</sup> é equivalente ao ensaio de absorção deste agregado (NBR NM 53, 2009). Nesta norma, com o mesmo método, é possível determinar a densidade e a absorção, diferenciando apenas o tratamento dos resultados obtidos ao final.

---

<sup>4</sup> Massa específica, neste trabalho, é o mesmo significado de densidade do material, ou seja, a relação entre a massa com o volume que esta massa ocupa espacialmente no frasco aferido, conforme NBR NM 52 (ABNT, 2009) e NBR NM 53 (ABNT, 2009).

Densidade, neste trabalho, é o mesmo significado de massa específica do material, ou seja, a relação entre a massa com o volume que esta massa ocupa espacialmente no frasco aferido, conforme NBR NM 52 (ABNT, 2009) e NBR NM 53 (ABNT, 2009).

Para a realização do ensaio, é necessário identificar a massa mínima de acordo com a dimensão máxima característica do agregado. A Tabela 8 apresenta as massas mínimas que deverão ser ensaiadas em função da dimensão máxima característica do agregado.

**Tabela 8-** Massa mínima de amostra por ensaio NBR 53 (ABNT, 2009)

<b>Dimensão máxima característica (mm)</b>	<b>Massa mínima da amostra de ensaio (g)</b>
12,5	2
19	3
25	4
37,5	5
50	8
63	12
75	18
90	25
100	40
112	50
125	75
150	125

**Fonte:** ABNT (2002).

Após a obtenção da massa mínima, a amostra deve ser lavada sobre a peneira de 4,75 mm a fim de retirar o pó ou outro material da superfície do agregado, colocadas em bandejas e secadas em estufas a uma temperatura constante de  $(105 \pm 5)$  °C. Depois de seca esta deve ser resfriada, até a possibilidade da manipulação de material e, imerso em água à temperatura ambiente, onde permanece até constância de massa.

A amostra deve ser retirada da água e espalhada sobre um tecido absorvente, com a finalidade de secar a superfície, tomando-se os cuidados para que não haja a evaporação da água dos poros. Dessa forma, é medida a massa da amostra na condição de agregado saturado com superfície seca ( $m_s$ ).

Posteriormente ao processo de secagem da superfície, a amostra deve ser colocada num recipiente vazado para que possa ser completamente imerso em água sem perda de material, à temperatura de  $(24 \pm 2)$  °C. O recipiente deve ser

anexado ao prato da balança, a qual deverá estar situada em nível superior ao do balde d'água, onde a amostra foi imersa. O conjunto balança + recipiente deverá ter sido previamente tarado, vazio e imerso em água. Assim afere-se a leitura ( $L$ ) da balança com o recipiente contendo a amostra imersa em água.

Após a medição submersa do agregado, esta é levada à estufa para secar ( $105 \pm 5$ ) °C até massa constante, esfriada à temperatura ambiente, até que seja possível sua manipulação. Mede-se sua respectiva massa, a aproximadamente 50 °C, com precisão de 1g ( $m$  – massa do agregado seco).

Para o cálculo da densidade do agregado graúdo foi utilizada a fórmula de acordo com a NBR NM 53 (ABNT, 2009):

$$d = \frac{m}{m_s - m_a} \quad [\text{eq 3}]$$

onde  $d$  é a densidade do agregado seco;  $m$  é a massa ao ar da amostra seca, em gramas;  $m_s$  é a massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca, em gramas;  $m_a$  é a massa submersa da amostra, em gramas.

A densidade do agregado na condição saturado superfície seca é calculado da seguinte forma:

$$d_s = \frac{m_s}{m_s - m_a} \quad [\text{eq 4}]$$

onde  $d_s$  é a densidade do agregado graúdo na condição saturado superfície seca.

De acordo com a norma, a diferença entre resultados, a partir de duas amostras submetidas ao ensaio, não deve ser maior que 0,02.

### 3.2.1.5 Determinação da absorção de água do agregado miúdo

Para determinação da absorção do agregado miúdo é necessária uma amostra de aproximadamente 1 kg do mesmo, que deverá ser seca em estufa até que haja constância de massa ( $m$ ), a qual deverá ser aferida e anotada para a realização dos cálculos ao final.

Em seguida a amostra deverá ser imersa em água por 24h e posteriormente estendida em uma bandeja, deixando-se passar uma suave corrente de ar quente e revolvendo a amostra da bandeja para secagem uniforme. O procedimento deve ser repetido até que haja pequena aderência entre os grãos do agregado.

Em sequência a areia deve ser colocada no molde de tronco de cone e ter aplicada sobre ela 25 golpes com haste de compactação (Figura 10) com posterior remoção vertical do molde. Enquanto houver umidade o material conservará a forma do molde, portanto caso isto ocorra é necessário continuar revolvendo a amostra a fim de promover sua secagem e assim realizar novamente o processo (sempre em intervalos frequentes) com o molde do tronco de cone até que o cone de agregado miúdo desmorone quando o molde for retirado.

Quando houver desmoronamento a massa ( $m_s$ ) da amostra deve ser aferida, pois a amostra chegou a condição de saturada superfície seca.

A absorção do agregado miúdo é dada por:

$$A = \frac{m_s - m}{m} \quad [\text{eq 5}]^5$$

onde  $A$  é a absorção do agregado, em porcentagem;  $m_s$  é a massa do agregado na condição saturada seca, em gramas;  $m$  é a massa do agregado seco, em estufa, após resfriado à temperatura ambiente, em gramas.

O valor da absorção deve ter aproximação de 0,1%, sendo que os ensaios para duas amostras não devem diferir mais de 0,05%.

---

<sup>5</sup> Pode-se notar que a diferença ( $m_s - m$ ) é numericamente igual à massa de água.

**Figura 10-** Fotografia do tronco de cone e soquete metálico para a realização do ensaio de absorção de água do agregado miúdo.



Fonte: Próprio autor

### 3.2.1.6 Determinação da absorção de água do agregado graúdo

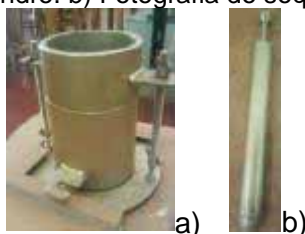
Para a determinação da absorção do agregado graúdo utilizou-se a mesma norma da determinação da densidade NBR NM 53 (ABNT, 2009). A fórmula para obter a absorção do agregado graúdo é dada pela equação 5.

## 3.2.2 Preparação das Amostras

### 3.2.2.1 Determinação da Relação Brita 1/Brita 0 (agregados graúdos)

Para a determinação da relação brita 1/brita 0, inicialmente se mediu as massas do cilindro (Figura 11) em que os agregados serão compactados e a bandeja para a pesagem dos materiais. Posteriormente, estas medidas foram utilizadas como determinadas taras.

**Figura 11-** a) Fotografia do cilindro. b) Fotografia do soquete metálico de compactação.



Fonte: Próprio autor

O cilindro foi preenchido com brita 1 até aproximadamente 33% do volume do recipiente<sup>6</sup>. Utilizando-se o soquete (Figura 11), foram dados 25 golpes com a finalidade de compactar a massa de agregado no recipiente. Após a compactação, adicionou-se mais uma determinada massa de brita 1 até completar 66% do recipiente cilíndrico e, novamente, realizou-se a compactação com 25 golpes. O processo é repetido com a adição de brita 1 até a borda do cilindro que, no final, deve ser rasado. Na sequência, é aferida a massa de agregado dentro do recipiente.

Depois de determinada a massa inicial de brita 1, esta é retirada do cilindro e uma fração de brita 0 é adicionada à mistura da massa de brita 1, até atingir uma condição de homogeneidade à mistura.

Repetiu-se todo o procedimento para a massa da nova mistura e o mesmo foi realizado para várias frações de agregados graúdos, ou seja, utilizando a mistura anterior e aumentando a fração da brita 0 até que a massa da mistura diminuísse duas vezes consecutivas. Finalmente, tomou-se como uma “mistura ótima” a última que apresentou a massa maior dentre todas as frações realizadas de brita 0 e brita 1. Como exemplo, na Tabela 9 pode-se observar as frações e as medidas de massa para determinação da brita 1 e brita 0 do ensaio realizado.

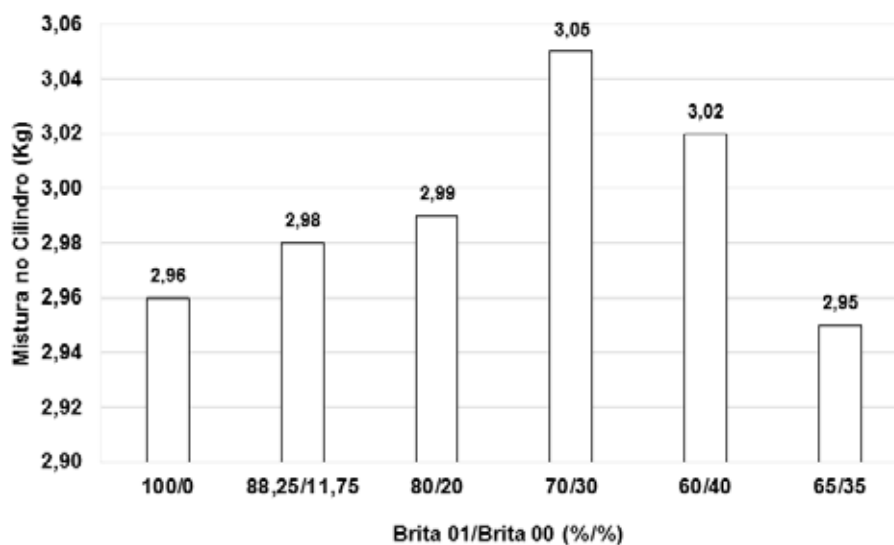
**Tabela 9-** Valores da determinação da relação Brita 1/Brita 0

<b>Brita 1/brita 0 (%/%)</b>	<b>Brita 1 (kg)</b>	<b>Brita 0 (kg)</b>	<b>Mistura no Cilindro (kg)</b>
100/0	2,52	0	2,96
88,25/11,75	2,52	0,33	2,98
80/20	2,52	0,63	2,99
70/30	2,52	1,08	3,05
60/40	2,52	1,68	3,02
65/35	2,52	1,36	2,95

A partir dos dados da Tabela 9, foi construído o Gráfico, conforme Figura 12, na qual é possível visualizar a melhor mistura de agregados graúdos na elaboração das dosagens de concretos.

<sup>6</sup> A massa de agregado da brita 1 é utilizada nesse ensaio como agregado base.

**Figura 12-** Gráfico da massa otimizada de brita 1/ brita 0.



Fonte: Próprio autor

### 3.2.2.2 Determinação da Dosagem dos Concretos

Os traços dos corpos-de-prova de referência, dos corpos-de-prova adicionados 5% e 10% de ROC e de ROL foram baseados nos traços experimentais citado por Helene e Terzian (1992), adotando um consumo de  $473 \text{ kg.m}^{-3}$  e se baseando num traço com teor de argamassa igual a 51%.

### 3.2.2.3 Moldagem, Cura e Capeamento

A moldagem dos corpos-de-prova foi realizada conforme a NBR 5738 (ABNT, 2003). Para isto realizou-se o ensaio de abatimento antes de coloca-los nos moldes. Os corpos-de-prova tiveram as seguintes geometrias:

- ✓ Cilíndricos;
- ✓ Prismáticos;

Os moldes dos corpos-de-prova cilíndricos possuíram altura igual ao dobro do diâmetro, conforme estabelecido na norma, com diâmetro de 10 cm na base e altura igual a 20 cm. Os moldes prismáticos tiveram uma seção transversal

quadrada, (150 x 150 mm<sup>2</sup>), com comprimento de 500 mm. Os moldes dos corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos foram feitos de material PVC<sup>7</sup>.

Antes de introduzir o concreto nas formas, adicionou-se uma camada de óleo nas paredes dos moldes para facilitar o desprendimento do concreto quando no estado endurecido.

A fim de retirar as bolhas de ar presentes dentro do concreto fresco e realizar o procedimento de adensamento dos corpos-de-prova, os moldes com concreto foram colocados sobre uma mesa vibratória, conforme a Figura 13. Quando começou a diminuir a quantidade de bolas de ar que saem dos corpos-de-prova, interrompeu a vibração para que não houvesse segregação do material, agregado e pasta.

**Figura 13-** Fotografia da mesa de vibração para adensamento dos corpos de provas.



**Fonte:** Próprio autor

Com a finalização do procedimento de adensamento dos corpos-de-prova do concreto, estes foram armazenados em um local protegido, dentro de uma câmara úmida a uma temperatura de  $(23 \pm 2)$  °C e umidade relativa do ar acima de 95%. Após 24 horas de moldagem, os concretos foram desprendidos de suas formas. Estes permaneceram por 30 dias dentro da câmara úmida antes dos devidos ensaios mecânicos serem realizados.

---

<sup>7</sup> PVC: *Policloreto de Polivinila*. Este é considerado, no contexto da construção civil, como um material não absorvente e não reagente com o concreto.

Os corpos-de-prova cilíndricos foram capeados<sup>8</sup> com a finalidade de obtermos uma uniformização geométrica nas superfícies que seriam utilizadas nos respectivos testes mecânicos, de maneira que não houvesse influência nas medidas.

### **3.2.3 Ensaios do Concreto Fresco**

Os ensaios no concreto fresco, apresentados neste trabalho, são os ensaios de Abatimento do Tronco de cone (“*Slump Test*”) e os ensaios de Tempo de Pega.

#### **3.2.3.1 Ensaios de Abatimento do Tronco de Cone**

Para a realização dos ensaios de abatimentos do tronco de cone foi utilizada a norma da NBR NM 67 (ABNT, 1998). Utilizou-se um molde para o corpo-de-prova de ensaio, feito de metal, com espessura igual ou superior 1,5 mm. Também foi utilizada uma haste de compactação de seção circular, reta, feita de aço, com um diâmetro de  $(16,0 \pm 0,5)$  mm, com comprimento de  $(600,0 \pm 0,5)$  mm e extremidades arredondadas. Para o apoio do cone metálico, utilizou-se uma placa plana quadrada metálica, com lados de dimensão significativamente superior ao diâmetro do cone, com uma espessura de 3 mm, conforme norma NBR NM 67 (ABNT, 1998) (Figura 14).

---

<sup>8</sup> Capear: revestir ou cobrir. Neste caso, o capeamento foi um revestimento de uma camada de enxofre nas superfícies não regulares, de forma a obter uma área mais lisa e isenta de contatos pontuais quando aplicadas cargas nestas superfícies.

**Figura 14-** Fotografia do tronco de cone para ensaio de abatimento.



**Fonte:** Próprio autor.

Umedeceu-se o molde e a placa de base (Figura 14) e colocou o molde sobre a mesma. Durante o preenchimento do molde com o concreto do ensaio<sup>9</sup>, os pés foram posicionados sobre as aletas do molde, com a finalidade de mantê-lo estável.

Encheu-se rapidamente o molde com o concreto coletado em três camadas, cada uma com aproximadamente 33% da altura do molde compactado. Para compactar o concreto dentro do molde, utilizou-se uma haste metálica, golpeando com 25 golpes cada camada, distribuindo uniformemente os golpes sobre a seção de cada camada. Após o preenchimento do molde, compactado em três camadas, rasou-se o topo do molde e o retirou do concreto, levantando-o na vertical vagarosamente, com a cautela de não desmanchá-lo do molde.

Imediatamente após a retirada do molde, mediu-se o resultado da consistência do concreto, sendo definida a medida como a diferença entre a altura do molde metálico e a altura do corpo-de-prova desmoldado. Realizou-se o ensaio de abatimento do tronco de cone para os concretos com adição de ROL e ROC.

---

<sup>9</sup> Foi retirada uma amostra de concreto fresco representativa da betoneira, conforme NBR NM 33 (ABNT, 1998).

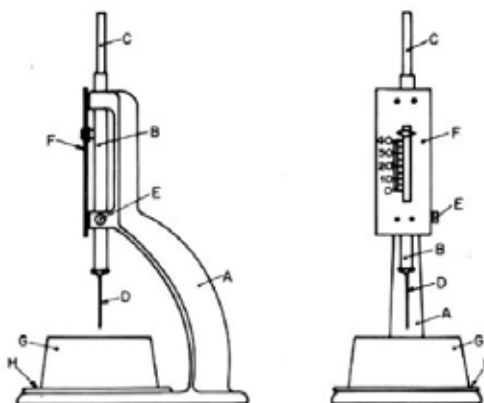
### 3.2.3.2 Ensaios de Determinação de Tempo de Pega

Para o ensaio de determinação do tempo de pega foi utilizada a norma brasileira NBR NM 65 (ABNT, 2003). O objetivo do ensaio de determinação do tempo de pega é analisar o momento em que a pasta de cimento adquire uma determinada consistência, ou seja, da constatação do desenvolvimento de resistência, comprometendo o concreto para aplicação.

De acordo com a norma NBR NM 65 (ABNT, 2003), primeiramente se faz necessário o entendimento de certas definições fundamentais para a medição dos resultados do ensaio, definindo o tempo de início de pega como “[...] o intervalo de tempo transcorrido desde a adição de água ao cimento até o momento em que a agulha de Vicat correspondente penetre na pasta até uma distância de  $(4 \pm 1)$  mm da placa base.” O tempo de fim de pega, conforme a norma NBR NM 65 (ABNT, 2003), “[...] o intervalo de tempo transcorrido desde a adição da água ao cimento até o momento em que a agulha de Vicat penetra 0,5 mm na pasta.”

O aparelho de Vicat, utilizado neste respectivo ensaio, está apresentado na Figura 15. Dispositivo que consiste em um suporte (A), que sustenta uma haste móvel (B) de metal inoxidável, em um de cujos extremos se encontra a sonda de Tetmajer (C), tendo em seu outro extremo uma agulha desmontável (D). A haste é deslizante e pode ser fixa em qualquer posição por meio de um parafuso (E) que suporta um ponteiro indicador (I), movendo-se sobre uma escala graduada em milímetro (F) fixada no suporte (A). A agulha de Vicat é exclusiva para o ensaio de determinação do tempo de pega, sendo parte integrante do aparelho de Vicat.

**Figura 15-** Representação esquemática do aparelho de Vicat e molde troncocônico utilizado na determinação dos tempos de pegadas do cimento Portland.



Fonte: NBR NM 65 (ABNT, 2003)

Instalou-se a agulha de Vicat no aparelho de Vicat, fazendo-a descer até que sua extremidade (D) repousasse sobre a placa de vidro (H), ajustando-se o indicador (F) no zero da escala graduada.

Preparou-se uma pasta com 500g de cimento e água necessária para a consistência normal e encheu o molde troncocônico, após realizada a mistura manualmente em uma bandeja metálica. As amostras foram preparadas com o traço apresentado no capítulo 3.2.4<sup>10</sup>. Dessa maneira, as britas 0 e 1 foram retirados do traço para a realização do ensaio, sendo somente considerados os materiais que compõem a matriz cimentícia. A partir do traço do concreto, foi possível pesar os materiais que compuseram a argamassa, como pode ser observado na Tabela 10.

**Tabela 10-** Quantidade de material para a elaboração da amostra ensaiada na determinação dos tempos de pega.

Componentes	Traço	Composto (kg)
Cimento	1,00	0,500
Areia	2,11	1,055
Brita	3,68	-
a/c <sup>11</sup>	0,55	0,275

<sup>10</sup> As amostras que foram selecionadas para realizar os ensaios de determinação de tempo de pega foram o traço referência, o traço contendo uma adição de 10% de resíduo de óleo vegetal (ROV) e outro traço contendo uma adição de 10% de resíduo de óleo mineral (ROL).

<sup>11</sup> A relação a/c, ou seja, relação água-cimento, é representada adimensionalmente. Isto é, para calcularmos a quantidade de água dentro do composto, multiplica-se a relação a/c com a quantidade de cimento.

O início do tempo de pega, conforme a NBR NM 65 (2003), é constatado no momento em que a agulha de Vicat, descendo sobre a pasta de consistência normal, estacionar a 1mm da placa de vidro (H) (Figura 15).

Antes do início do tempo de pega das amostras, a agulha foi abaixada primeiramente sustentando-a levemente com os dedos até a superfície da amostra contida dentro do molde troncocônico, de forma a assegurarmos uma velocidade nula na superfície do material. Após o contato, soltou-se a agulha e aferiu-se a medida 30 segundos após o início de penetração da agulha na pasta de cimento.

A partir do momento em que foi constatado o início<sup>12</sup> do tempo de pega, realizou-se leituras a intervalos de 10 minutos regularmente. Após três leituras sucessivas e iguais, superiores a 32 mm, observamos a indicação do tempo de fim de pega do ensaio. As leituras iguais, conforme a norma NBR NM 65 (ABNT, 2003), “[...] consideram-se leituras iguais àquelas que diferem entre si no máximo de 0,5 mm.”

Os resultados do ensaio de determinação do tempo de pega do cimento Portland estão apresentados no capítulo 4.1.2 deste trabalho, analisando os efeitos dos resíduos de óleo nas propriedades do concreto fresco.

### **3.2.4 Ensaios Mecânicos**

#### **3.2.4.1 Resistência à Compressão Axial**

Para a realização dos ensaios mecânicos de resistência à compressão axial dos corpos-de-prova cilíndricos e determinação do módulo de elasticidade, utilizou-se a prensa EMIC DL 30000, conforme pode ser observado na Figura 16, atendendo às especificações dos valores máximos admissíveis estabelecidos pela NBR NM ISO7500-1 (ABNT, 2004), sendo classificada como classe 1.

---

<sup>12</sup> Intervalo de tempo transcorrido desde a adição de água ao cimento até o momento em que a agulha de Vicat correspondente penetra na pasta até uma distância de  $(4 \pm 1)$  mm da placa da base.

**Figura 16-** Fotografia da máquina universal de ensaio mecânico



**Fonte:** Emic (2013).

A norma utilizada para realizar os ensaios de compressão axial foi a NBR 5739 (ABNT, 2007).

Para a determinação da carga de ruptura, os corpos-de-prova capeados foram rompidos à compressão aos 30 dias<sup>13</sup>, com tolerância de 24 horas para o procedimento de ruptura.

Antes da realização do ensaio de ruptura, é necessário que as superfícies das faces dos pratos de compressão, assim como das superfícies dos corpos-de-prova estejam bem limpas e que a centralização dos pratos esteja adequada. Utilizou-se uma escala de força conveniente com a calibração da máquina, com a aplicação de uma carga de forma contínua, com velocidade de  $(0,45 \pm 0,15)$  MPa.s<sup>-1</sup>, descarregando naturalmente quando a queda de força der início de ruptura.

O resultado do ensaio de resistência à compressão axial é obtida dividindo a carga de ruptura pela área de seção transversal do respectivo corpo-de-prova, sendo expresso em MPa, conforme a equação a seguir:

---

<sup>13</sup>Todos os corpos de prova foram rompidos aos 30 dias, sendo convencionalmente escolhido esta idade de ruptura.

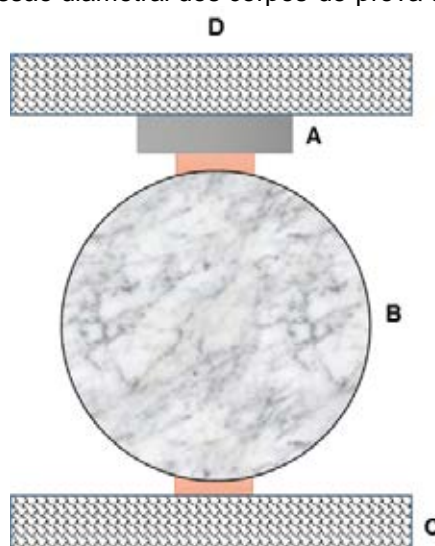
$$\vec{\sigma}_{c,a} = \frac{\vec{F}_{Rup}}{A} \quad [\text{eq 6}]$$

onde  $\vec{\sigma}_{c,a}$  é a tensão máxima de resistência à compressão aplicada na direção axial do corpo-de-prova (MPa),  $\vec{F}_{Rup}$  é a força de ruptura aplicada no corpo-de-prova (kN) e  $A$  é a área de seção transversal do respectivo corpo-de-prova (cm<sup>2</sup>).

### 3.2.4.2 Determinação da Resistência à Tração na Compressão Diametral

O ensaio brasileiro de compressão diametral para determinação da resistência à tração por compressão<sup>14</sup> consiste na aplicação de duas forças centradas e diametralmente opostas de compressão em um determinado corpo-de-prova cilíndrico, conforme podemos observar na Figura 17. A força ou carga é aplicada diametralmente no corpo-de-prova (B), desenvolvendo uma tensão de ruptura no plano paralelo à aplicação da carga, particionando o corpo-de-prova em duas partes cilíndricas côncavas.

**Figura 17-** Representação esquemática do ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral dos corpos-de-prova cilíndricos.



Fonte: Próprio autor

<sup>14</sup> O método de determinação da resistência à tração por compressão também é conhecido pelo ensaio brasileiro, método de identificação indireta da resistência à tração por compressão desenvolvido por Lobo Carneiro para concreto-cimento (FALCÃO, 2000).

A aparelhagem utilizada neste ensaio foi a mesma na determinação da resistência à compressão axial do concreto, conforme apresentada na Figura 17 (Cf. item 3.2.6.1). O ensaio consiste de duas bases (C) e (D) onde serão aplicadas as forças no corpo-de-prova, um suporte (A) para fixar um componente de madeira de forma a uniformizar a força aplicada no corpo-de-prova (B)<sup>15</sup>.

A norma utilizada para realizar o ensaio de determinação da resistência à tração na compressão foi a NBR NM 7222 (ABNT, 1994), a qual estabelece o tipo de aparelhagem necessário para a execução do ensaio, os procedimentos e os resultados a serem observados.

Colocaram-se os corpos-de-prova sobre o prato da máquina de compressão, de modo que ficasse em repouso ao longo de uma geratriz NBR NM 7222 (ABNT, 1994). Para continuar o processo, ajustaram-se os pratos da máquina até que fosse possível uma compressão capaz de manter em posição o corpo-de-prova em questão.

A carga foi aplicada continuamente, com uma velocidade da tensão de tração próxima de  $(0,05 \pm 0,02)$  MPa.s<sup>-1</sup>, até que houvesse a ruptura do corpo-de-prova. Com o valor obtido é calculada a resistência à tração do corpo-de-prova rompido por compressão diametral, através da seguinte expressão:

$$\vec{\sigma}_R = \frac{2F}{100\pi DH} \quad [\text{eq 7}]$$

onde  $\vec{\sigma}_R$  é a resistência à tração, dada em MPa;  $F$  é a força de ruptura, dada em N;  $D$  é o diâmetro do corpo-de-prova, dado em cm e  $H$  é a altura do corpo-de-prova, dado em cm.

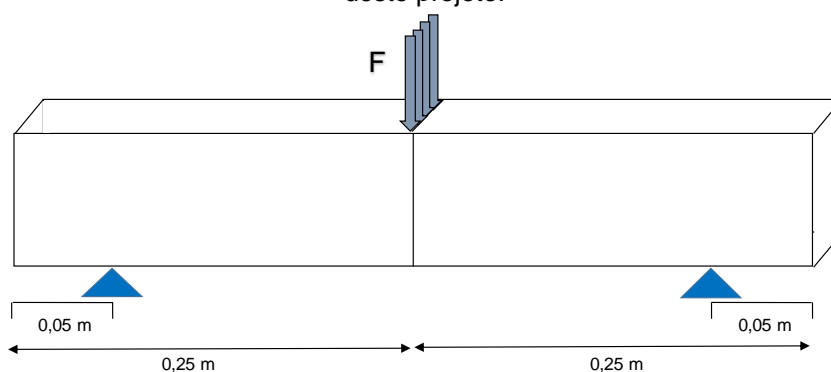
---

<sup>15</sup> O vetor normal da seção transversal do corpo-de-prova está saindo para fora da página, indicando que está apoiado no mesmo plano de sua geratriz.

### 3.2.4.3 Determinação da Resistência à Tração na Flexão

Para a realização dos ensaios de resistência à tração na flexão, dos corpos-de-prova de seção prismática<sup>16</sup>, foi utilizada a norma NBR NM 12142 (ABNT, 1991). Para que o ensaio fosse realizado corretamente, é necessário que as vigotas estejam demarcadas quanto à posição dos apoios, estando distantes 5 cm de cada face em direção ao centro da viga e o ponto de aplicação de carga no centro geométrico de uma das faces de maiores áreas, conforme podemos observar na Figura 18.

**Figura 18-** Representação esquemática do ensaio de flexão simples sob carga centrada nas vigas deste projeto.



Fonte: Próprio autor

A ruptura do concreto no respectivo ensaio ocorre geralmente nas proximidades do centro da viga, ou seja, no centro do corpo-de-prova. Isto se deve ao fato de que o momento fletor ( $M$ ) é máximo no centro da viga. Da Equação 8 a 10 é apresentado o cálculo para obtenção do momento fletor.

$$\vec{M} = \frac{\vec{F}}{2} \times \vec{r} \quad [\text{eq 8}]$$

<sup>16</sup> Conforme NBR NM 5738 (ABNT, 2003). Cf. item 3.2.4.3 – Moldagem, Cura e Capeamento.

$$\vec{r} = \left(\frac{L}{2} - 5\right) \hat{r} \quad [\text{eq 9}]$$

$$\vec{M} = \frac{\vec{F}}{2} \times \left(\frac{L}{2} - 5\right) \hat{r} \quad [\text{eq 10}]$$

onde  $\vec{M}$  é o momento fletor no centro da viga (kN.cm),  $\vec{F}$  é a força ou carga aplicada na viga durante o ensaio (kN) e o  $L$  é o comprimento da viga (cm).

A resistência à flexão do teste é definida por:

$$\vec{\sigma}_r = \frac{\vec{M}}{I_z} \times \vec{y} \quad [\text{eq 11}]$$

onde  $\vec{\sigma}_r$  é a resistência à tração na flexão simples sob força centrada (kN.cm<sup>-2</sup>),  $M$  é o momento fletor no centro do corpo-de-prova (kN.cm),  $I_z$  é o momento de inércia da seção transversal da viga (cm<sup>4</sup>) e  $\vec{y}$  é a distância da base da seção transversal do corpo-de-prova ao próprio centro de massa (cm).

#### 3.2.4.4 Determinação do Módulo de Elasticidade

A máquina de ensaio utilizada para a realização do ensaio de determinação do módulo de elasticidade do concreto foi a mesma utilizada na determinação da resistência à compressão axial<sup>17</sup>. No entanto, para que haja a verificação da deformação causada pela aplicação das tensões, foi necessária a implementação de um tipo de medidor de deformação, ficando equidistantes dos extremos do corpo-de-prova, em conformidade com a norma utilizada para a determinação do módulo de elasticidade NBR 8522 (ABNT, 2008).

Inicialmente foram realizados os ensaios de resistência à compressão e para ser determinado o módulo de elasticidade foram utilizados corpos-de-prova<sup>18</sup> com a mesma geometria. Estes foram devidamente centralizados nos pratos das

<sup>17</sup> Ver capítulo 3.2.6.1 o modelo da máquina utilizada no ensaio respectivo e de acordo com a NBR NM ISO 7500-1 (ABNT, 2004).

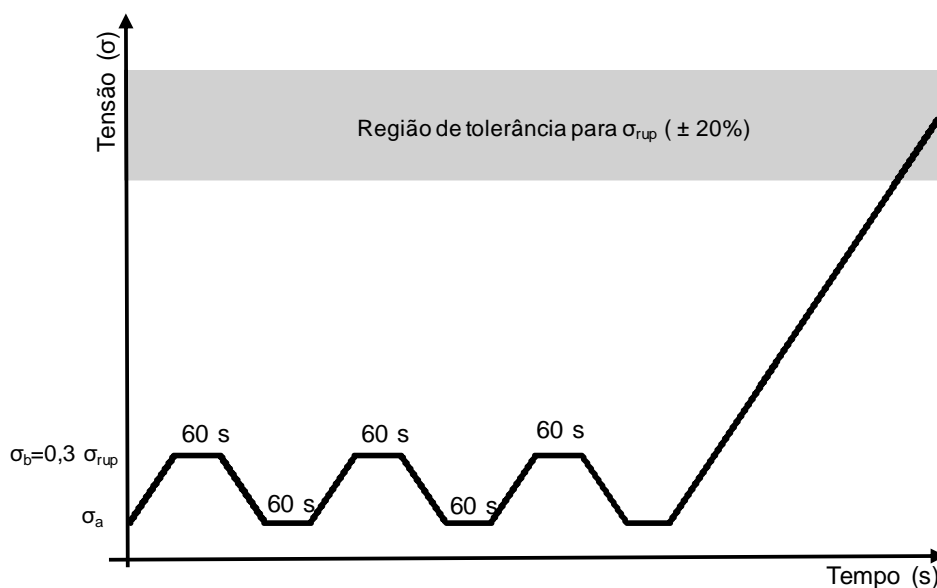
<sup>18</sup> Corpos-de-prova moldados conforme NBR NM 5738 (ABNT, 2003). Esta norma estabelece a metodologia e as especificações para corpos-de-prova cilíndricos e corpos-de-prova prismáticos, conforme apresentado no item 3.2.4.3.

máquinas de ensaios, de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 1994). Os ensaios de resistência à compressão axial possibilitou identificar os níveis de carregamento que seria utilizado na carga do ensaio de determinação do módulo estático de elasticidade dos concretos.

Aplicou-se o carregamento e aumentou a tensão de forma regular e periódica a uma velocidade de  $(0,25 \pm 0,05) \text{ MPa.s}^{-1}$  até um limite de tensão próxima a 30% da resistência à compressão axial do concreto. Quando este nível foi alcançado, manteve-se a carga constante por 60 segundos, reduzindo a carga de 30% da resistência à compressão para 0,5 MPa, permanecendo por mais 60 segundos nesta tensão básica.

Realizaram-se dois ciclos adicionais de mesma carga e descarga, mantendo as tensões extremas constantes, alternadamente, durante períodos de 60 segundos cada ciclo, conforme podemos observar na Figura 19.

**Figura 19-** Representação esquemática do carregamento para a determinação do módulo de elasticidade.



Fonte: ABNT (2008).

Após o último ciclo de carga e descarga, registrou-se as deformações específicas lidas durante a carga de 30% da resistência de ruptura da tensão e as deformações específicas durante a descarga até o nível de tensão básica de 0,5 MPa,

todas aferidas no máximo em 30 segundos. Dessa forma, o módulo de elasticidade ( $E_{ci}$ ), em GPa, é expresso pela equação 12, dada por:

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \cdot 10^{-2} \quad [\text{eq 12}]$$

onde  $E_{ci}$  é o módulo estático de elasticidade (GPa),  $\Delta\sigma$  é a variação de tensão<sup>19</sup> e  $\Delta\varepsilon$  é a variação da deformação específica média dos corpos-de-prova ensaiados. Os resultados dos ensaios de determinação do módulo de elasticidade dos concretos estão apresentados no capítulo 4.2.1.4, nos resultados e discussões.

### **3.2.5 Análise Química das Amostras Líquidas de ROL e ROC e Microscópica dos Concretos com ROL e ROC.**

#### **3.2.5.1 Espectroscopia por Fluorescência de Raios-X das Amostras Líquidas de ROC e ROL.**

Para a realização da análise dos componentes químicos dos ROC e ROL foi utilizada a norma D6481 (ASTM, 2010), utilizando a técnica de Espectroscopia de Raios-X com energia dispersiva. O equipamento utilizado na análise química foi o espectrômetro de fluorescência de raios-X por energia dispersiva EDX-720/800HS, ilustrado na Figura 20.

---

<sup>19</sup>A variação de tensão  $\Delta\sigma$ , é dado por,  $\Delta\sigma = \sigma_b - \sigma_a$ , onde  $\sigma_b$  é a tensão de 30% da tensão de ruptura  $\sigma_{rup}$  obtida por meio do ensaio de resistência à compressão axial (Cf. item 3.2.6.1) e  $\sigma_a$  é a tensão básica (0,5 MPa).

**Figura 20-** Fotografia do espectrômetro de fluorescência de Raios-X por energia dispersiva.



**Fonte:** Próprio autor

Esta técnica permite determinar quantitativamente os elementos presentes em uma determinada amostra líquida, através da aplicação de raios X na superfície da amostra e a posterior análise dos fluorescentes raios-X emitidos.

A fluorescência de raios-X (XRF) utiliza sinais de raios-X para excitar uma amostra desconhecida. Os elementos individuais, presentes na amostra, emitem seus raios-X característicos (fluorescentes). O EDX (detector de energia dispersiva) detecta estes raios-X e, qualitativamente, determina quais elementos estão presentes no material em estudo.

### **3.2.5.2 Microcaracterização do Concreto por Microscopia Eletrônica de Varredura (EDS)**

O ensaio de microcaracterização do concreto foi determinado pela Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), com objetivo de analisar a presença de metais pesados no concreto e se estes estariam reativos. Caso a amostra líquida de ROL apresente em sua composição traços de metais pesados, é suposto que estes metais pesados ficassem inertes após a reação com o cimento, através da estabilização e/ou solidificação de metais pesados.

O MEV é um equipamento capaz de produzir imagens de alta ampliação e resolução, consistindo na emissão de feixes de elétrons por um filamento

capilar de tungstênio, mediante a aplicação de uma diferença de potencial que pode variar de 0,5 à 30 kV.

A técnica do MEV permite a obtenção de uma imagem ampliada e tridimensional da amostra a partir da interação de um feixe de elétrons com o material, desde que não seja transparente aos elétrons (GOLDSTEIN et al., 1998).

A detecção dos raios-X emitidos pela amostra pode ser realizada pela medida de sua energia, através de detectores de energia, tal como o *Energy Dispersive X-ray Detector* (EDS ou EDX). O EDS é um acessório essencial no estudo de caracterização microscópica de materiais. A sensibilização energética que os feixes de elétrons causam sobre o mineral são medidos através do EDS acoplado ao MEV, instalado na câmara de vácuo.

A origem dos sinais energéticos detectados pelo MEV podem ser gerados de duas maneiras:

- Excitação de raios-X Bremsstrahlung<sup>20</sup> ou raios-X contínuos;
- Ionização de camadas internas, dando origem à emissão dos raios-X característicos;

O componente característico identifica o átomo ou átomos presentes dentro de um determinado volume de interação e o componente contínuo é devido à radiação gerada pela presença de radiação de frenamento.

O elétron do feixe incidente pode interagir com os elétrons das camadas mais internas causando a ejeção do mesmo e deixando uma vacância nesta camada. Ficando num estado excitado (estado energético) e cuja tendência é voltar ao estado fundamental, em apenas frações de picossegundos os elétrons sofrem uma série de transições permitidas para preencher dessas vacâncias. Como os elétrons de um determinado átomo possuem diferentes níveis energéticos, pode se observar, no ponto de incidência do feixe de elétrons, quais os elementos químicos estão presentes em um local especificamente e, assim, identificar em instantes, quais elementos estão presentes em uma determinada amostra (DEDAVID; GOMES; MACHADO, 2007).

Sendo de fundamental importância para determinação da composição dos minérios em um determinado material sólido, o EDS constitui uma ferramenta

---

<sup>20</sup> Efeito Bremsstrahlung é o fenômeno físico que ocorre quando um elétron de uma determinada energia é desacelerado pela interação com o núcleo pesado da amostra, transferindo totalmente ou parcialmente sua energia cinética na forma de radiação, como um fóton de raios-X.

indispensável na caracterização e distribuição espacial de elementos químicos, permitindo identificar elementos de metais pesados dentro de um determinado material. Os resultados da caracterização microestrutural dos concretos com ROC e ROL, o concreto referência, serão apresentados no capítulo de Resultados e Discussões.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Caracterização dos Materiais

#### 4.1.1 Areia

As massas retidas, em gramas, porcentagem e a massa acumulada das duas amostras de areia, estão apresentadas na Tabela 11.

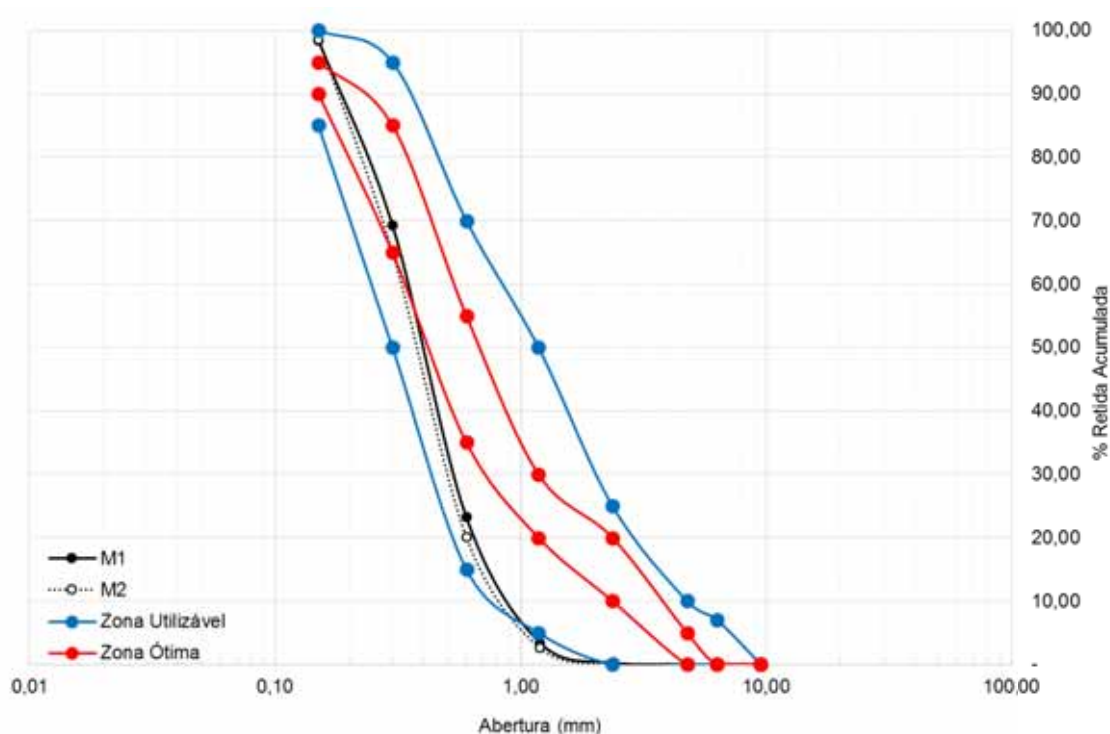
**Tabela 11-** Resultado do Ensaio Granulométrico das amostras M<sub>1</sub> e M<sub>2</sub> de areia

Abertura das Peneiras	M1			M2		
	Massa retida (g)	Massa retida (%)	Massa Retida Acumulada (%)	Massa retida (g)	Massa retida (%)	Massa Retida Acumulada (%)
4,80	0,20	0,04	0,04	-	-	-
2,40	1,09	0,22	0,26	0,78	0,16	0,16
1,20	15,57	3,12	3,38	12,47	2,50	2,65
0,60	99,21	19,87	23,25	87,18	17,47	20,12
0,30	229,79	46,03	69,28	224,06	44,89	65,01
0,15	145,56	29,16	98,44	167,28	33,51	98,52
Fundo	7,77	1,56	100,00	7,37	1,48	100,00
<b>Total</b>	<b>499,19</b>			<b>499,14</b>		

As duas amostras de areia, ou seja, do agregado miúdo do composto, resultou em uma diferença percentual de 0,16 e 0,17% para as amostras M<sub>1</sub> e M<sub>2</sub> respectivamente com relação à massa inicial de areia utilizada no ensaio de granulometria do agregado miúdo.

As amostras M<sub>1</sub> e M<sub>2</sub> não apresentaram diferenças superior à 0,3% entre si, diferindo somente em 0,01%, conforme Tabela 11. Pode-se observar na Figura 21 a curva granulométrica das duas amostras e os limites da zona ótima e zona utilizável do agregado miúdo.

**Figura 21-** Gráfico da curva granulométrica do agregado miúdo das amostras M1 e M2.



**Fonte:** Do próprio autor.

Sendo a dimensão máxima característica do material analisado o valor da porcentagem acumulada retida igual ou imediatamente superior a 5% em massa, temos que a  $D_{m\acute{a}x}$  do agregado miúdo (areia) é 1,20 mm e o módulo de finura (MF) de 2,86 (areia média), conforme norma NBR 7211 (ABNT, 2009).

A massa específica do agregado miúdo (Cf. item 3.2.1.3) obtida foi de 2,604 g.cm<sup>-3</sup>. O ensaio de absorção do agregado miúdo foi realizado conforme descrito no item 3.2.1.4. Os resultados encontrados neste ensaio para a massa na condição saturada superfície seca,  $m_s$ , foi de 1.050,00 gramas e para a massa seca em estufa,  $m$ , foi de 1.000,00 gramas. Utilizando a equação 5 temos que, o agregado miúdo, apresentou uma absorção,  $A$ , de 5,0%.

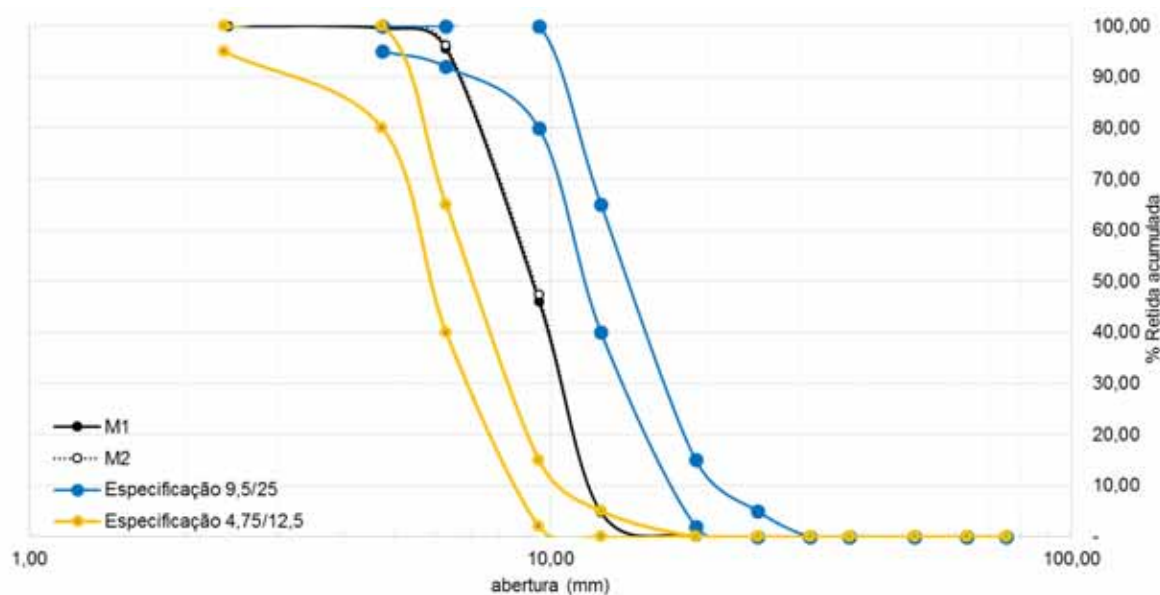
#### 4.1.2 Brita 0

Os resultados dos ensaios granulométricos das duas amostras (M<sub>1</sub> e M<sub>2</sub>) da brita 0 estão apresentados na Tabela 12.

**Tabela 12-** Ensaio granulométrico da brita 0 das amostras M<sub>1</sub> e M<sub>2</sub>.

Peneira	M <sub>1</sub>			M <sub>2</sub>		
	Massa Retida (g)	Massa Retida (%)	Massa Retida Acumulada (%)	Massa Retida (g)	Massa Retida (%)	Massa Retida Acumulada (%)
19,00	-	-	-	-	-	-
12,50	238,91	4,79	4,79	239,04	4,79	4,79
9,50	2.060,60	41,33	46,12	2.122,30	42,56	47,36
6,30	2.463,40	49,41	95,54	2.434,40	48,82	96,18
4,80	198,70	3,99	99,52	179,30	3,60	99,77
2,40	23,80	0,48	100,00	11,30	0,23	100,00
Fundo	-	-	100,00	-	-	100,00
<b>Total</b>	<b>4.985,41</b>			<b>4.986,34</b>		

A curva granulométrica das duas amostras do agregado graúdo (brita 0), está apresentada na Figura 13.

**Figura 22-** Curva granulométrica do agregado graúdo (brita 0), amostras M1 e M2.

**Fonte:** Do próprio autor.

Como podemos observar na Figura 22, a curva granulométrica do agregado graúdo (brita 0) está dentro dos limites das especificações 4,75/12,5 e 9,5/25. Conforme a Tabela 12, as duas amostras (M<sub>1</sub> e M<sub>2</sub>) resultaram em uma diferença de 0,29 e 0,27% respectivamente, verificando que a diferença das massas iniciais e finais de cada amostra não foi superior a 0,3%, sendo considerada uma amostra validada e caracterizada, conforme NBR 248 (ABNT, 2003). Embora a curva granulométrica

deste material não esteja dentro da especificação 9,5/25 e nem da especificação 4,75/12,5, pela dimensão máxima e mínima é caracterizado comercialmente como brita 0, devido ao tamanho de grão máximo ser de 12,5 mm e o mínimo de 4,75 mm.

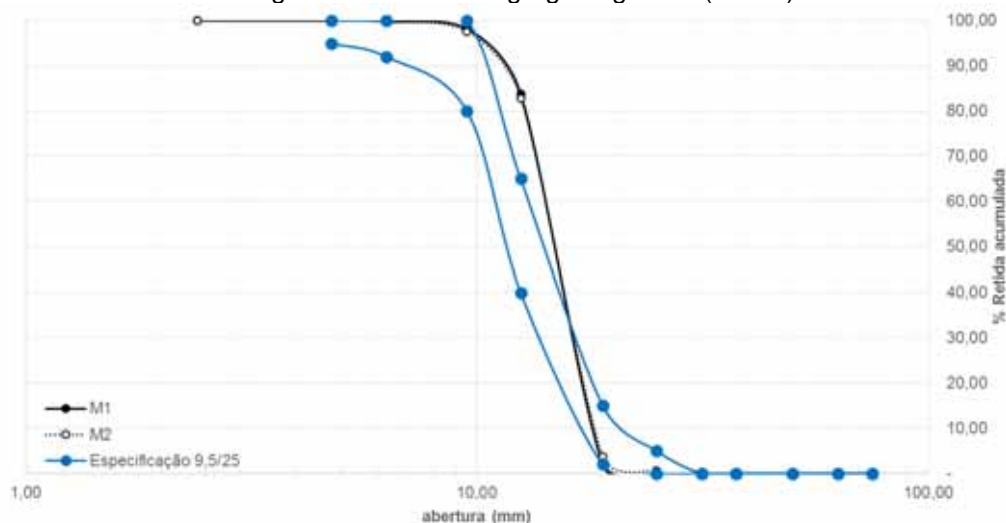
#### 4.1.3 Brita 1

Assim como os procedimentos dos ensaios de granulometria foram feitos com a brita 0, estes mesmos foram realizados com a brita 1. Os resultados dos ensaios de granulometrias podem ser vistos na tabela 13 com a respectiva curva mostrada na Figura 14 para as duas amostras respectivamente.

**Tabela 13-** Ensaio granulométrico da brita 1 das amostras M<sub>1</sub> e M<sub>2</sub>.

Peneira	M1			M2		
	Massa Retida (g)	Massa Retida (%)	Massa Retida Acumulada (%)	Massa Retida (g)	Massa Retida (%)	Massa Retida Acumulada (%)
25,00	-	-	-	30,00	0,60	0,60
19,00	100,00	2,00	2,00	160,00	3,20	3,80
12,50	4.090,00	81,80	83,80	3.950,00	79,00	82,80
9,50	720,00	14,40	98,20	740,00	14,80	97,60
6,30	80,00	1,60	99,80	110,00	2,20	99,80
4,80	10,00	0,20	100,00	10,00	0,20	100,00
2,40	-	-	100,00	-	-	100,00
Fundo	-	-	100,00	-	-	100,00
<b>Total</b>	<b>5.000,00</b>			<b>5.000,00</b>		

**Figura 23-** Gráfico da curva granulométrica do agregado graúdo (brita 1) das amostras M1 e M2



**Fonte:** Do próprio autor.

Neste ensaio não houve diferença de massa inicial e final e a dimensão máxima característica do agregado graúdo foi de 19,0 mm. Observamos que, de acordo com a Figura 23, para a dimensão máxima do agregado de 19 mm, o percentual de massa retida se encontra dentro dos limites da especificação 9,5/25, conforme a Tabela 7.

Na Tabela 14 se pode observar os resultados do ensaio de obtenção da massa específica da brita 0 e brita 1.

**Tabela 14-** Massa específica do agregado seco ( $d$ ) e massa específica do agregado na condição saturado superfície seca ( $d_s$ )

Tipo Agregado Graúdo	Brita 0	Brita 1
$m_s$ (g)	5.040,0	3.797,3
$m_a$ (g)	3.288,4	2.501,5
$m$ (g)	4.985,0	3.731,1
$d_s$ ( $g.cm^{-3}$ )	2,88	2,93
$d$ ( $g.cm^{-3}$ )	2,94	3,03

Como podemos observar, a brita 0 apresentou uma absorção relativa de 1,1%, enquanto que a brita 1 mostrou 1,77% de absorção, ou seja, 61% aproximadamente maior que a brita 0.

#### 4.1.4 Determinação do Ponto de Fulgor das Amostras de ROL e ROC

Os resultados dos ensaios de determinação do ponto de fulgor estão apresentados na Tabela 15.

**Tabela 15-** Resultado do ponto de fulgor das amostras ROC e ROL

<b>Amostra</b>	<b>Ponto de Fulgor (°C)</b>
ROC	320
ROL	106

Como pode ser notada a amostra de ROL possuem um ponto de fulgor 35% abaixo do ponto de fulgor da amostra de ROC.

#### 4.1.5 Determinação da Viscosidade de Saybolt das Amostras de ROL e ROC

Os resultados dos ensaios de determinação da viscosidade das amostras de líquido estão apresentados na Tabela 16.

**Tabela 16-** Resultado da viscosidade de Saybolt das amostras de ROL e ROC

<b>Temperatura</b>	<b>Viscosidade Saybolt (SUS)</b>	
	<b>ROL</b>	<b>ROC</b>
40°C	329,6	68,5
100°C	219,8	57,8

Conforme podemos observar na Tabela 16, os resultados da viscosidade de Saybolt à 40°C são significativamente superior nas amostras de ROL com relação às amostras de ROC, aproximadamente 4,81 vezes maior.

No entanto, os valores das viscosidades são alteradas abruptamente para as amostras de ROL quando submetidas a uma temperatura de 100°C, diminuindo de 329,6 SUS para 219,8 SUS, reduzindo aproximadamente 33% da

viscosidade à 40°C. Nas amostras de ROC, a redução foi pequena comparada com as amostras de ROC. Para uma temperatura de 100°C, a viscosidade diminuiu de 68,5 SUS para 57,8 SUS, apresentando uma redução de 16%.

Dessa maneira, constatou-se que a diminuição relativa da viscosidade de Saybolt das amostras de ROL apresentou o dobro quando comparada com as amostras de ROC.

## 4.2 Concreto Fresco

Os traços utilizados na preparação dos corpos-de-prova deste trabalho estão resumidos no Quadro 1.

**Quadro 1-** Classificação dos corpos-de-prova<sup>21</sup>.

<b>Corpos-de-prova</b>	<b>Denominação</b>
Referência	Corpos-de-prova sem resíduo de óleo
CP5-C	Corpos-de-prova com adição de 5% de ROC
CP10-C	Corpos-de-prova com adição de 10% de ROC
CP5-L	Corpos-de-prova com adição de 5% de ROL
CP10-L	Corpos-de-prova com adição de 10% de ROL

As substituições percentuais de resíduos de óleo nos corpos-de-prova são com relação à quantidade de água de amassamento utilizada no estudo. Todos os corpos-de-prova elaborados neste trabalho foram realizados com o traço mestre, apresentado na Tabela 18. Variou-se a quantidade de óleo e água.

<sup>21</sup> Os corpos-de-prova relacionados no Quadro 1, que contêm a letra **C** como diferenciação, são os resíduos de óleo de cozinha (**ROC**), advindos de resíduos de óleo de cozinha utilizados dos restaurantes da cidade de Ilha Solteira. Os corpos-de-prova que contêm a letra **L** como diferenciação são os resíduos de óleo lubrificantes utilizados e contaminados (**ROL**), advindos dos postos de gasolina da cidade de Ilha Solteira. As adições percentuais de resíduos de óleo corpos-de-prova são com relação à quantidade de água de amassamento utilizada no estudo.

**Tabela 17-** Traço do concreto utilizado para a elaboração dos corpos-de-prova

Componentes	Traço	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )
Cimento	1,00	3,05
Areia	2,11	2,60
Brita	3,68	2,80
<b>Total</b>	<b>7,34</b>	

O traço de referência alcançou o abatimento desejado com a relação água/cimento igual a 0,55. Sendo assim, a relação (água + óleo) / cimento para os corpos-de-prova com resíduo de óleo deveria ser 0,55. Contudo, os ROC ao substituírem a água não alcançaram o abatimento desejado (6,5 cm + 1 cm), alterando a razão *a/c* do concreto.

#### 4.2.1 Ensaios de Abatimento de Tronco de Cone

Os ensaios de abatimento foram realizados conforme foi apresentado no item 3.2.3.1. Os resultados dos ensaios de abatimento das amostras estão apresentados na Tabela 18.

**Tabela 18-** Resultado do ensaio de abatimento das amostras

Corpo-de-prova	Relação água/cimento	Relação (Água + óleo) /cimento	Traço em massa para um CP cilíndrico (kg) cimento:areia:brita:água:óleo	Abatimento (±1cm)
Referência	0,55	0,55	0,6 : 1,27 : 2,21 : 0,330:0,000	6,5
CP5-C	0,55	0,57	0,6 : 1,27 : 2,21 : 0,327:0,016	6,7
CP10-C	0,52	0,57	0,6 : 1,27 : 2,21 : 0,310:0,030	7,0
CP5-L	0,52	0,55	0,6 : 1,27 : 2,21 : 0,313:0,016	6,8
CP10-L	0,50	0,55	0,6 : 1,27 : 2,21 : 0,297:0,030	7,0

Para a amostra referência<sup>22</sup>, o resultado de abatimento para a relação água-cimento igual a 0,55 apresentou uma boa trabalhabilidade e uma medida de consistência compatível com a literatura<sup>23</sup> (Figura 25a). Entretanto, o resultado de abatimento das amostras que possuíam adições de ROC em suas misturas, apresentaram um abatimento nulo ou “*zero-slump*”<sup>24</sup>. Para manter o abatimento das amostras contendo ROC, semelhante ao concreto referência, foi necessário aumentar a quantidade de água em sua mistura. Conforme podemos ver na Tabela 19, foi acrescentado 4% do valor inicial de água. Este acréscimo se deu após o decréscimo da mesma de 5 e 10% da substituição da água por ROC. De qualquer maneira, a relação a/c, quando não consideramos o óleo, diminuiu. Para o caso do acréscimo de 5% de ROC, este decréscimo somente se refletirá na terceira casa após a vírgula, conforme se pode confirmar com o traço em massa para um corpo de prova (Tabela 19).

No caso das amostras contendo ROL não foi necessário o acréscimo de água para o abatimento desejado. A substituição da água pelo ROL em 5 e 10% foi efetiva, diminuindo a relação água-cimento.

Observando a viscosidade dos dois resíduos de óleos (Tabela 16) podemos afirmar que o resíduo de maior viscosidade foi o que imprimiu maior consistência no concreto. Com os resultados deste trabalho pode-se afirmar que a viscosidade do óleo influi na consistência do concreto.

Pressupunha, anteriormente à execução deste estudo, que os resíduos de óleo agiriam, na estrutura do concreto fresco, plasticamente, de forma que a consistência do concreto melhorasse. Confirmou-se este pressuposto e ainda podemos afirmar que o ROL apresentou maior influência na consistência do concreto.

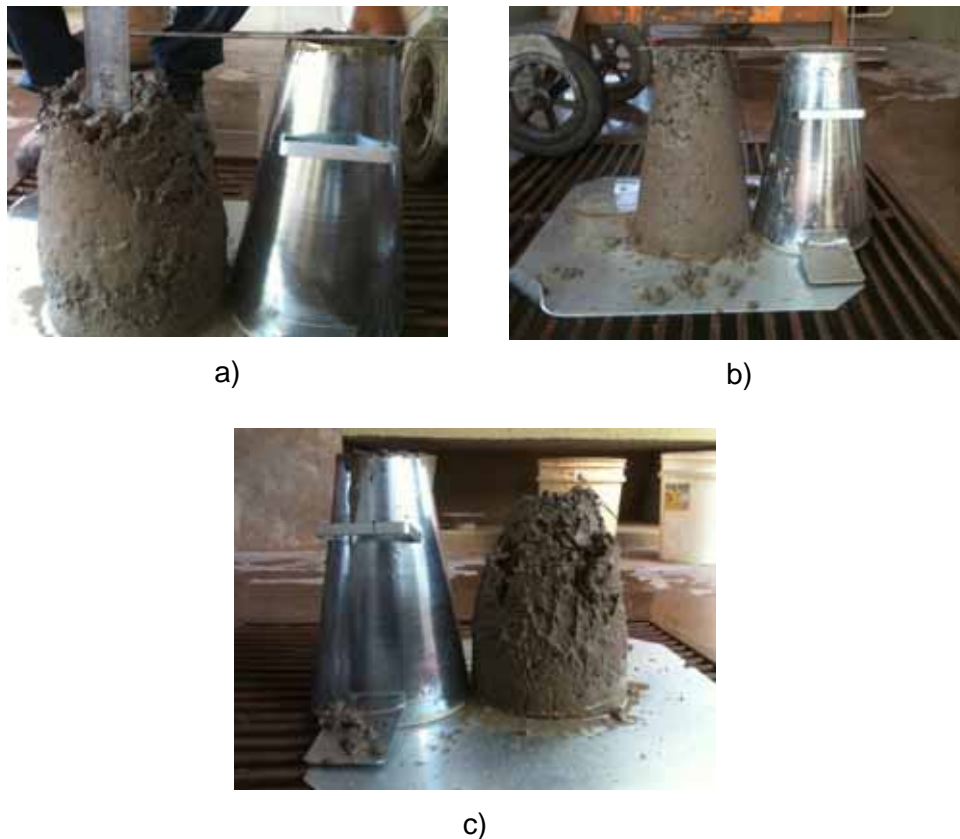
---

<sup>22</sup> Todas as amostras, conforme explanado no capítulo 3.2.4 – *Preparação das Amostras*, possuem o mesmo traço, sendo somente diferenciado pela adição de resíduo de óleo, seja de cozinha ou lubrificante, e em concentrações diferentes, 5 e 10%, dentro da mistura.

<sup>23</sup> Relação entre Trabalhabilidade e Grandeza de Abatimento do Tronco de Cone, apresentado no item 3.2.5.1. Ensaio de Abatimento do Tronco de Cone. (Neville, 1997)

<sup>24</sup> “*Slump*”: Terminologia apresentada na língua inglesa como abatimento. “*Zero-Slump*” significa uma pasta ou concreto de alta consistência e baixa trabalhabilidade.

**Figura 24-** Resultados dos ensaios de abatimento do tronco de cone. a) Concreto referência. b) Concreto com adição de 10% de ROC (CP10-C). c) Concreto com adição de 10% ROL (CP10-L)



**Fonte:** Próprio autor

Os resultados obtidos neste trabalho estão de acordo com os trabalhos de (HAMAD et al., 2003; AJAGBE et al., 2012; DIAB, 2012), em que observaram uma melhora na taxa de fluidez e aumento no teor-de-ar dentro do concreto no estado fresco, melhorando o abatimento. Pois, no presente trabalho, foi alcançado o abatimento desejado com menor quantidade de água em relação ao concreto sem óleo.

Em relação ao trabalho de Abdelaziz (2007) os resultados foram adversos. As amostras de concreto no estado fresco contendo ROL apresentaram uma consistência maior. Este resultado pode ser devido à alta viscosidade do ROL utilizado, sendo necessário um estudo mais detalhado nesse aspecto pelo autor.

#### 4.2.2 Ensaios de Tempo de Pega

Os resultados dos ensaios de determinação do tempo de pega da amostra de referência, contendo 10% de ROC e 10% de ROL estão apresentadas nas Tabelas 19 a 21, assim como a representação gráfica na Figura 25.

**Tabela 19-** Estudo da determinação do tempo de pega da argamassa livre de resíduo de óleo (Amostra de Referência)

<b>Horário (hh:mm)</b>	<b>Altura (±0,1mm)</b>
10:30	-
12:33	0,5
12:44	6,0
12:55	9,0
13:06	29,5
13:17	31,0
13:28	31,5
13:39	32,0
13:49	32,5

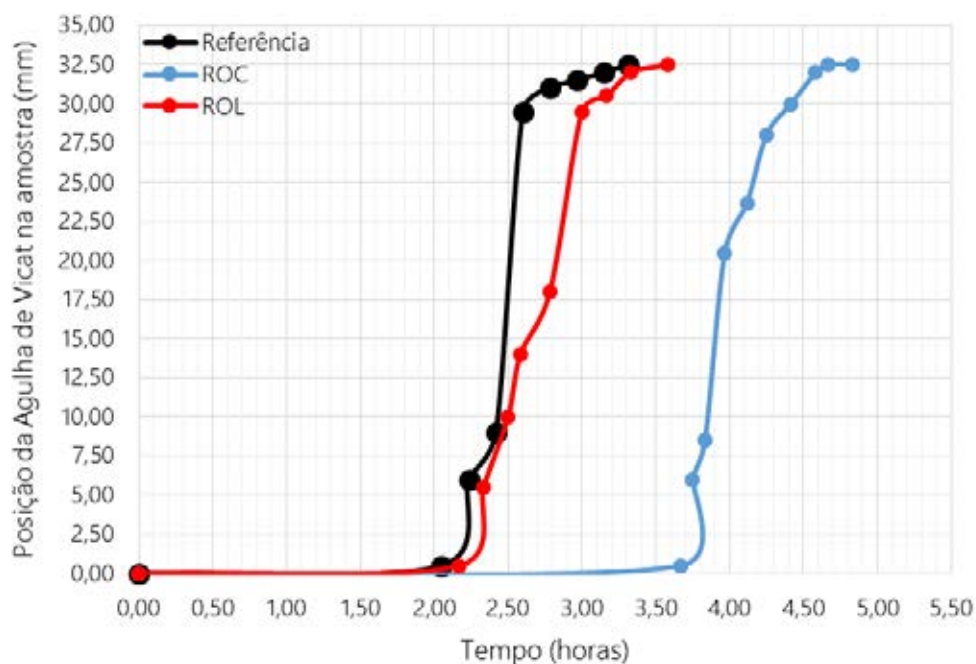
**Tabela 20-** Estudo da determinação do tempo de pega da argamassa com 10% ROC

<b>Horário (hh:mm)</b>	<b>Altura (±0,1mm)</b>
09:45	-
13:25	0,5
13:30	6,0
13:35	8,5
13:43	20,5
13:52	23,7
14:00	28,0
14:10	30,0
14:20	32,0
14:25	32,5
14:35	32,5

**Tabela 21-** Estudo da determinação do tempo de pega da argamassa com 10% de ROL

<b>Horário (hh:mm)</b>	<b>Altura (±0,1mm)</b>
14:30	-
16:40	0,5
16:50	5,5
17:00	10,0
17:05	14,0
17:17	18,0
17:30	29,5
17:40	30,5
17:50	32,0
18:05	32,5

**Figura 25-** Gráfico do tempo de pega das amostras de referência, 10% ROC (CP10-C) e 10% ROL (CP10-L).



**Fonte:** Do próprio autor.

Pode-se observar que a amostra contendo 10% de ROL apresentou um tempo de início de pega muito semelhante ao concreto de referência. No entanto, a amostra contendo 10% de ROC obteve um tempo de início de pega significativamente maior com relação ao concreto de referência (71% aproximadamente) e ao concreto com 10% de ROL.

Este aumento do tempo de pega da amostra do concreto com ROC pode ser devido ao resultado dos ensaios de viscosidade, apresentando um resultado muito menor que o ROL. Dessa maneira, como a viscosidade é relativamente baixa, acredita-se que o ROC envolve mais rapidamente as moléculas de água, diminuindo a taxa de reação de hidratação do cimento, aumento o tempo de pega desta amostra. Por outro lado, o ROL apresentou uma viscosidade relativamente maior ao ROC, não agindo na mesma taxa de envolvimento das partículas responsáveis pela reação de hidratação, não alterando o tempo de pega.

Os resultados dos tempos de pega para o concreto com ROC estão de acordo com alguns autores da literatura (ABDELAZIZ, 2007; HAMAD et al., 2003). De acordo com Abdelaziz (2007), o tempo de início de pega do concreto fresco aumentou com o aumento de quantidade de resíduo óleo mecânico nas misturas de concreto.

Contudo, um aumento significativo foi observado somente acima de 15% de ROL, de acordo com o autor.

### 4.3 Concreto Endurecido

#### 4.3.1 Ensaios Mecânicos

##### 4.3.1.1 Resistência à Compressão Axial

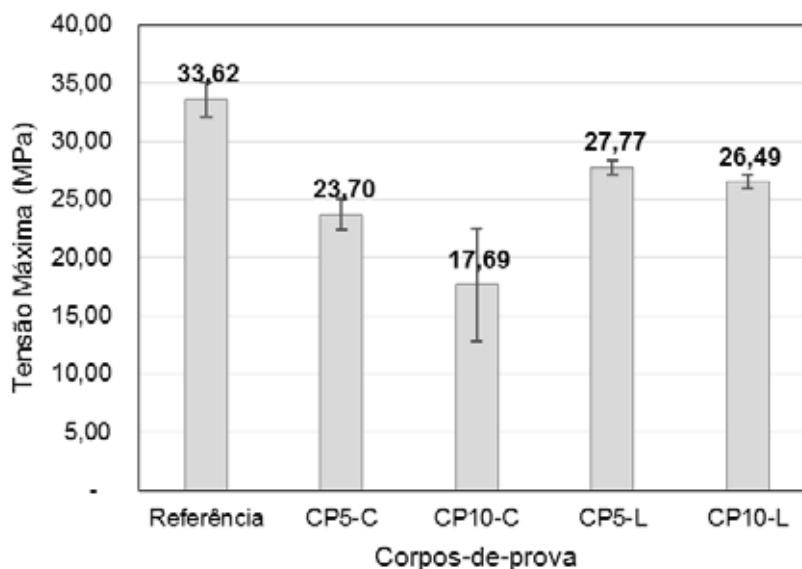
O resultado das resistências à compressão axial, dos corpos-de-prova de referência e adicionados com resíduos de óleo, aos 30 dias, estão apresentados na Tabela 22.

**Tabela 22-** Resultado de tensão máxima de resistência à compressão axial (MPa)

Corpo-de-prova	Referência	CP5-C	CP10-C	CP5-L	CP10-L
CP1	34,90	22,14	20,02	27,64	25,80
CP2	33,97	24,41	20,94	27,25	26,92
CP3	31,99	24,54	12,10	28,43	26,74
<b>Média</b>	<b>33,62</b>	<b>23,70</b>	<b>17,69</b>	<b>27,77</b>	<b>26,49</b>
<b>Desvio-padrão</b>	<b>1,49</b>	<b>1,35</b>	<b>4,86</b>	<b>0,60</b>	<b>0,60</b>
<b>VES</b>	<b>35,11</b>	<b>25,05</b>	<b>22,55</b>	<b>28,37</b>	<b>27,09</b>
<b>VEI</b>	<b>32,13</b>	<b>22,35</b>	<b>12,83</b>	<b>27,17</b>	<b>25,89</b>

Como se pode observar na Tabela 22, os resultados de resistência à compressão axial, dos corpos-de-prova contendo resíduos de óleo, apresentaram uma tensão máxima menor que a amostra de concreto de referência. A partir dos resultados da Tabela 22, foi elaborado o gráfico (Figura 26) dos valores das tensões máximas de acordo com os tipos de corpos-de-prova.

**Figura 26-** Resultado da resistência à compressão axial média dos corpos-de-prova rompidos aos 30 dias



**Fonte:** Do próprio autor.

A resistência à compressão axial dos corpos-de-prova contendo 10% ROL apresentou uma diminuição de 21,2% em comparação com a resistência à compressão da amostra de referência.

O valor da resistência média dos corpos-de-prova com adição de 10% de ROC apresentou uma redução de 47,4% com relação à amostra de referência. Observou-se que, para a mesma concentração, mas com diferentes resíduos de óleo dentro da mistura do concreto, obtiveram-se resultados de resistência à compressão axial com variações significativas, em que as amostras com 10% de ROC apresentaram uma redução relativa de 33,2% aproximadamente com relação às amostras com 10% de ROL.

Pode-se notar que o corpo-de-prova CP3 (Tabela 23) correspondente às amostras com 10% de ROC mostrou um resultado muito discrepante com relação aos dois corpos-de-prova (CP1 e CP2) de ROC. Se este corpo-de-prova fosse retirado da amostra, a média da resistência à compressão axial tornar-se-ia 20,48 MPa e o desvio-padrão diminuiria para 0,65 MPa. Neste caso a resistência à compressão axial apresentaria uma redução de 39,1%, sendo ainda uma diminuição considerável.

As amostras de com 5% de ROL mostraram uma redução de 17,4% na resistência à compressão axial, enquanto as amostras com 10% de ROL apresentaram 21,2% de redução com relação à amostra de referência. Ao

compararmos o concreto com 10 e 5% de ROL, podemos observar que o acréscimo de mais 5% de ROL na mistura do concreto, ou seja, a mistura com 10% de ROL apresentou uma redução relativa de 4,6%. Ao dobrar a concentração de ROL a redução relativa se tornou pequena. Portanto, após a colocação de ROL, o aumento do mesmo não influenciou significativamente na resistência à compressão do concreto.

A diferença dos resultados das resistências entre as amostras de ROC e ROL podem ser atribuídas aos resultados do tempo de pega das mesmas. Conforme analisado anteriormente, estas amostras apresentaram diferentes tempos de pega, sendo associados hipoteticamente aos valores relativos de viscosidade dos resíduos.

Os resultados de resistência à compressão axial se mostraram semelhantes aos resultados de alguns autores, tais como (DIAB, 2012; AJAGBE, 2012; AL-ATTAR, 2013; EJEH; UCHE, 2009; BŁASZCZYŃSKI, 2002). Entretanto, Hamad et al. (2003) adicionaram quantidades menores de óleo: 0,075; 0,15 e 0,30% em relação à quantidade de cimento. Os resultados dos ensaios de resistência de compressão axial com ROL nessas concentrações não mostraram alterações significativas em relação ao concreto de referência. Variações importantes poderiam ser observadas se os autores aumentassem as concentrações de óleo dentro do concreto com ROL, condizendo com os resultados deste trabalho.

#### **4.3.1.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral**

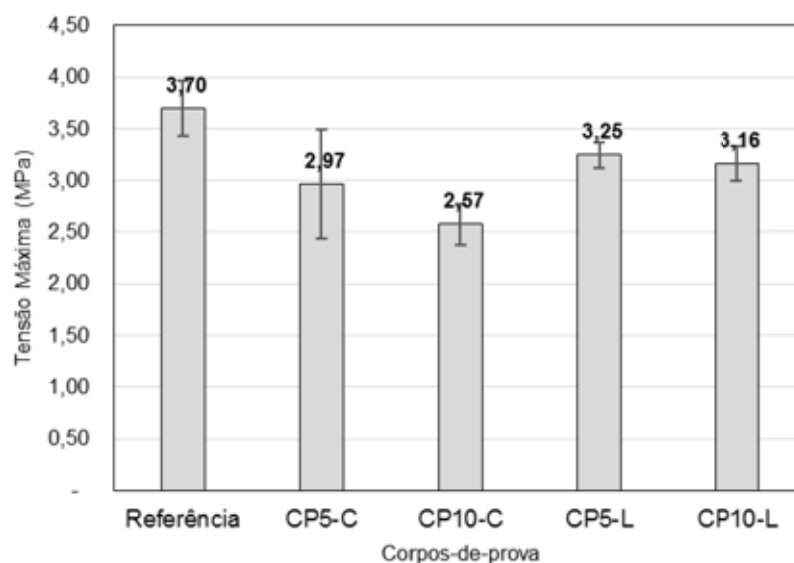
Os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral estão apresentados na Tabela 23. Esta traz os resultados de três corpos de prova, conforme requerido pela norma.

**Tabela 23-** Resultado de Tensão Máxima de resistência à tração por compressão dos corpos-de-prova

Corpo-de-prova	Referência	CP5-C	CP10-C	CP5-L	CP10-L
CP1	3,59	2,98	2,53	3,33	3,20
CP2	3,51	3,48	2,79	3,16	3,32
CP3	4,01	2,44	2,41		2,98
<b>Média</b>	<b>3,70</b>	<b>2,97</b>	<b>2,57</b>	<b>3,25</b>	<b>3,16</b>
<b>Desvio-padrão</b>	<b>0,27</b>	<b>0,52</b>	<b>0,20</b>	<b>0,12</b>	<b>0,17</b>
<b>VES</b>	<b>3,97</b>	<b>3,49</b>	<b>2,77</b>	<b>3,37</b>	<b>3,33</b>
<b>VEI</b>	<b>3,43</b>	<b>2,44</b>	<b>2,38</b>	<b>3,12</b>	<b>3,00</b>

A partir da Tabela 23, construiu-se o gráfico da média das tensões máximas (MPa) em função do tipo de corpos-de-prova, conforme podemos analisar na Figura 27.

**Figura 27-** Resultado da resistência à tração por compressão diametral média dos corpos-de-prova rompidos aos 30 dias



**Fonte:** Do próprio autor.

Como pode ser observado os resultados dos ensaios de resistência à compressão diametral apresentaram uma diminuição nas amostras que continham resíduos de óleo, tanto ROC quanto ROL.

Os corpos-de-prova CP5-L e CP10-L apresentaram uma diminuição de resistência à tração por compressão diametral de 12,3 e 14,5% respectivamente com relação a amostra de referência. Os corpos-de-prova CP5-C e CP10-C

apresentaram uma redução média de 19,9 e 30,4% respectivamente na resistência à tração por compressão diametral.

Nas amostras contendo 10% de resíduo de óleo, as medidas de resistência à tração por compressão foram bastante discrepantes entre si (CP10-L e CP10-C). De fato, assim como as medidas de resistência à compressão axial mostraram que as amostras CP10-C tiveram reduções de resistências maiores que as amostras de CP10-L, observou-se o mesmo nos ensaios por compressão diametral, em que a redução da resistência à tração por compressão fora maior no CP10-C que no CP10-L.

Quanto à concentração de resíduos de óleo na mistura de concreto, pode-se notar que as amostras CP5's, ou seja, as amostras com 5% a menos de resíduos de óleo nas misturas, não apresentaram um aumento significativo nos valores das resistências à tração, conforme pode ser observado na Tabela 21. Novamente, este resultado concordou com os resultados dos ensaios de compressão axial. Para a amostra CP5-L, a redução na resistência foi de 12,3%, enquanto que a adição de mais 5% (CP10-L) apresentou uma diminuição de 14,5%, ou seja, houve uma redução de 2,5% com o incremento de mais 5% de resíduo na mistura com relação à amostra de referência.

Os resultados obtidos neste ensaio com as amostras contendo resíduos de óleo foram semelhantes às obtidas por alguns autores, tais como (HAMAD et al., 2000; AYININUOLA, 1999; AJAGBE et al., 2012; ABDUL-AHAD; MOHAMMED, 2000). No trabalho de Abdul-Ahad e Mohammed (2000) foi observada uma alta redução da resistência à tração por compressão diametral, próximo de 11%, quando o concreto esteve mergulhado em ROL. Hamad et al. (2003) observaram uma redução de 17% na resistência à tração por compressão axial de concretos contendo ROL com relação àqueles sem a adição destes. Não houve, na literatura, resultados sobre as resistências à tração por compressão de ROC.

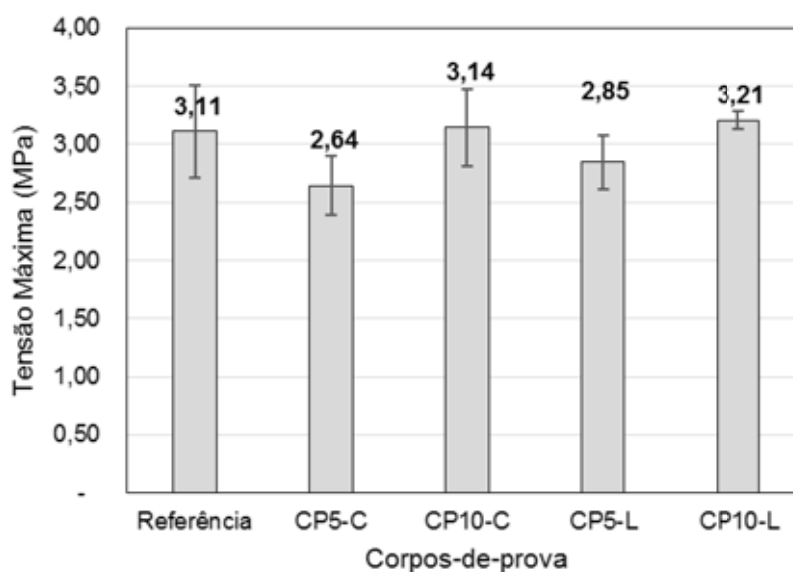
#### **4.3.1.3 Resistência à Tração na Flexão**

Os resultados do ensaio de resistência à tração por flexão estão apresentados na Tabela 24.

**Tabela 24-** Resultado de tensão máxima de resistência à Tração na Flexão (MPa)

Corpo-de-prova	Referência	CP5-C	CP10-C	CP5-L	CP10-L
CP1	2,70	2,90	3,41	2,61	3,12
CP2	3,15	2,63	3,25	3,08	3,22
CP3	3,48	2,40	2,77	2,85	3,28
<b>Média</b>	<b>3,11</b>	<b>2,64</b>	<b>3,14</b>	<b>2,85</b>	<b>3,21</b>
<b>Desvio-padrão</b>	<b>0,39</b>	<b>0,25</b>	<b>0,33</b>	<b>0,24</b>	<b>0,08</b>
<b>VES</b>	<b>3,50</b>	<b>2,89</b>	<b>3,47</b>	<b>3,08</b>	<b>3,29</b>
<b>VEI</b>	<b>2,71</b>	<b>2,39</b>	<b>2,81</b>	<b>2,61</b>	<b>3,13</b>

A partir da Tabela 24, construiu-se o gráfico da tensão máxima (MPa) em função dos tipos de corpos-de-prova (Figura 28).

**Figura 28-** Resultado da resistência à tração por flexão média dos corpos-de-prova rompidos aos 30 dias

**Fonte:** Do próprio autor.

De acordo com a Tabela 24, os valores médios das resistências à tração na flexão não mostraram diferenças significativas com relação às amostras de concreto de referências e as amostras contendo resíduos de óleo, com adição de 10%.

Conforme podemos observar na Figura 29, o resultado da resistência das amostras de CP10-C e CP10-L não variaram significativamente em comparação com a amostra de referência, quando levamos em conta a variação dos resultados. Dessa forma, pode-se notar que os resíduos de óleo, quando adicionados ao

composto de concreto, não influenciaram significativamente as propriedades mecânicas de resistência à tração por flexão.

Conforme apresentado por Castro (2000) e Giublin et al. (2010) no capítulo 3.2, a resistência de tração na flexão característica dos pavimentos de concreto é adotada como 4,5 MPa, na maioria dos projetos de pavimentação urbana. Neste estudo, a amostra do concreto de referência está com a resistência à tração na flexão abaixo da referência normalmente adotadas em projetos. No entanto, a finalidade deste trabalho é comparar resultados de concreto com e sem resíduos de óleos para aplicação em pavimentos. As propriedades de resistência à tração por flexão, que é uma das principais propriedades mecânicas para pavimentos, apresentaram poucas variações, indicando a possibilidade da disposição dos resíduos para aplicação desejada.

#### 4.3.1.4 Módulo Estático de Elasticidade

Os resultados dos ensaios de determinação do módulo de elasticidade dos corpos-de-prova estão apresentados na Tabela 26.

**Tabela 25-** Resultado da determinação do módulo de elasticidade dos corpos-de-prova (MPa)

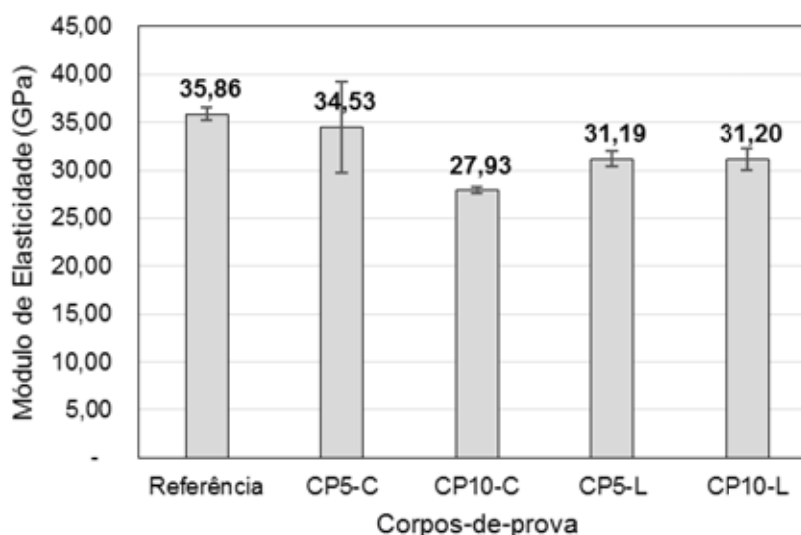
Corpo-de-prova	Referência	CP5-C	CP10-C	CP5-L	CP10-L
CP1	-	-	-	31.810,28	30.513,86
CP2	36.341,57	37.904,50	28.193,96	30.311,65	30.559,12
CP3	35.369,40	31.162,81	27.669,66	31.452,05	32.521,59
<b>Média</b>	<b>35.855,49</b>	<b>34.533,66</b>	<b>27.931,81</b>	<b>31.191,33</b>	<b>31.198,19</b>
<b>Desvio-padrão</b>	<b>687,43</b>	<b>4.767,09</b>	<b>370,74</b>	<b>782,60</b>	<b>1.146,32</b>
<b>VES</b>	<b>36.542,91</b>	<b>39.300,75</b>	<b>28.302,55</b>	<b>31.973,92</b>	<b>32.344,51</b>
<b>VEI</b>	<b>35.168,06</b>	<b>29.766,56</b>	<b>27.561,07</b>	<b>30.408,73</b>	<b>30.051,87</b>

Os resultados dos valores dos módulos de elasticidade da Tabela 25 estão apresentados graficamente na Figura 29. Conforme podemos analisar, o resultado obtido dos módulos de elasticidades das amostras CP10-L e CP5-L foram 31,20 e 31,19 GPa respectivamente, apresentando aproximadamente uma redução de 13% com relação à amostra de referência em ambas as amostras.

Entretanto, essa diferença foi mais sensível com o acréscimo de 10% de ROC. O acréscimo de 5% de ROC não foi muito sensível para o módulo de

elasticidade. No entanto, as duas concentrações de ROL mostraram sensibilidade para o módulo de elasticidade, com resultados bastante próximos (Figura 29).

**Figura 29-** Resultado da determinação do módulo de elasticidade médio dos corpos-de-prova rompidos aos 30 dias.



**Fonte:** Do próprio autor.

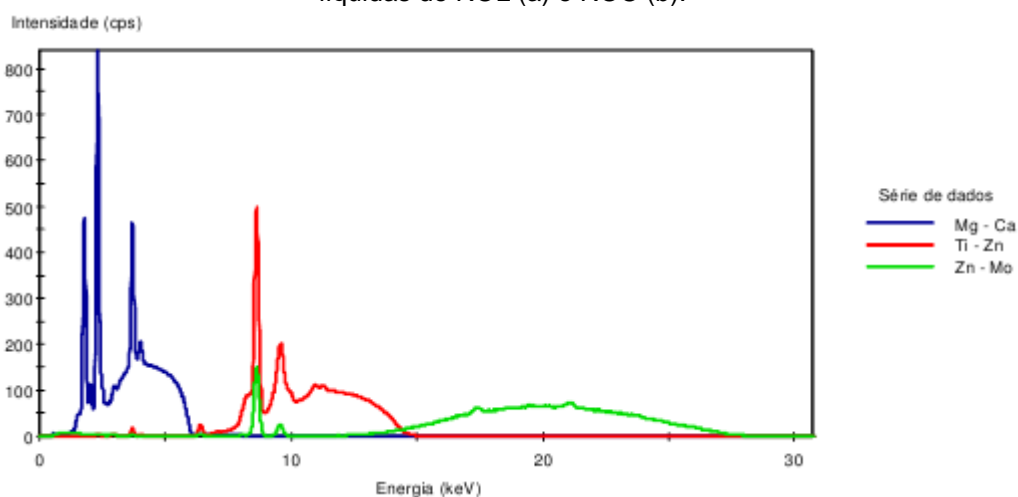
Também foi observada neste ensaio a influência dos resíduos de óleo ROC e ROL. Com a adição de 10% em massa de óleo dentro da mistura do concreto, as amostras que continham ROC (CP10-C) apresentaram em média uma diferença de 10,5% menor que o módulo de elasticidade obtido para as amostras contendo ROL (CP10-L), mostrando novamente que o ROC reduziu as propriedades mecânicas dos concretos que àqueles cujas amostras foram adicionadas ROL.

Os resultados obtidos neste trabalho estão de acordo com alguns autores (ABDELAZIZ, 2007; HAMAD et al., 2003; DIAB, 2012). Hamad et al. (2003) e Abdelaziz (2007) observaram uma pequena alteração de 6% do módulo de elasticidade dos concretos contendo 0,60%, em relação ao cimento, de ROL. A presença de ROL em concretos diminuiu o módulo de elasticidade, aumentou, contudo, a consistência do concreto (DIAB, 2012). No entanto, estas propriedades foram mantidas constantes através da diminuição de água dentro da mistura, diminuindo a razão água-cimento (ABDELAZIZ, 2007; HAMAD et al., 2003).

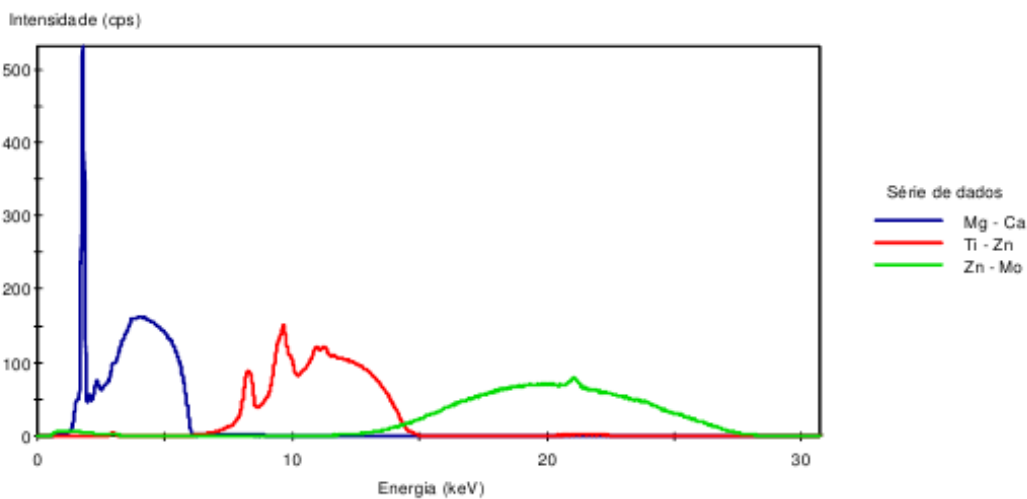
#### 4.4 Espectroscopia por Fluorescência de Raios-X das Amostras de ROC e ROL.

Os resultados da espectroscopia por fluorescência de raios-x das amostras líquidas estão apresentados, em faixas de análise de compostos, na Figura 30.

**Figura 30-** Espectroscopia por Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva das amostras líquidas de ROL (a) e ROC (b).



**a. ROL**



**b. ROC**

**Fonte:** Do próprio autor.

Através das análises da espectroscopia de raios-X por energia dispersiva, (ver Figura 30), foi possível analisarmos as composições químicas das amostras dos ROC e ROL e, a partir de então, construir a Tabela 26.

**Tabela 26-** Resultado da composição química das amostras líquidas de ROL e ROC (ppm – partes por milhão)

Elementos	Concentração	
	ROL	ROC
Mg	653,6	-
Al	8,3	19,8
P	906,0	61,0
S	6.224,0	-
Cl	66,7	3,8
Ca	1.098,0	45,0
Ti	2,0	-
V	0,5	-
Cr	5,0	1,1
Mn	2,3	-
Fe	109,7	3,5
Co	4,4	1,5
Ni	4,9	4,6
Cu	33,4	-
Zn	924,0	6,0
Mo	53,6	0,9
Sn	48,3	7,4
Pb	7,0	-

Pode-se notar que, através da Figura 30 e da Tabela 26, a série de dados que contempla Mg à Ca (linha azul), a amostra de ROL possui quantidades superiores em concentração de Mg, S, Cl e Ca, sendo somente em menor quantidade para a concentração de Al. Na faixa de Ti à Zn (linha vermelha), houve diferenças significativas nas composições de Fe e Cu das duas amostras, sendo as de ROL possuindo as maiores quantidades destes elementos, enquanto que houve pequenas diferenças em Cr, Co, Ni nas mesmas. Na faixa de Mo à Pb (linha verde), pôde-se observar que a amostra de ROL possui alta concentração em Mo, Sn e Pb quando comparado com a amostra de ROC.

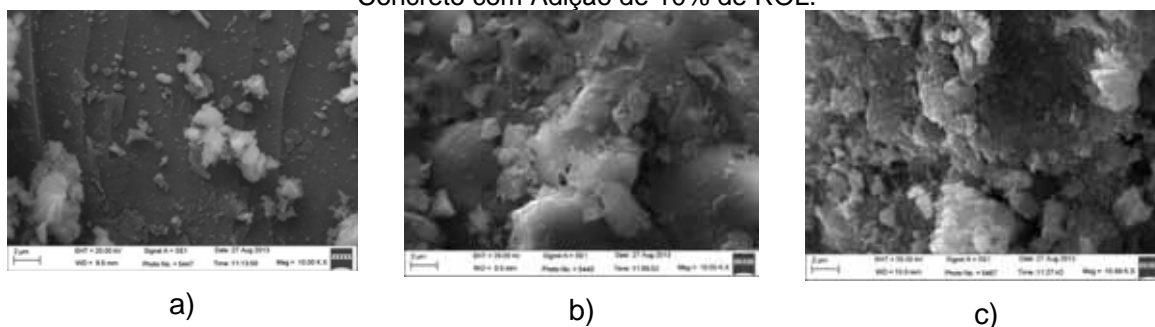
De fato, a análise de espectroscopia de raios-x possibilitou identificar a composição química das amostras líquidas de ROL e ROC. A amostra de ROL apresentou quantidades apreciáveis de metais pesados em sua composição química, tais como: Zn, Sn, Mo, Cu e Pb.

Constatada a presença destes metais pesados, a imobilização destes se torna de fundamental importância para este estudo. Portanto, os resultados do MEV em concretos com ROL e ROC permitirá identificarmos se estes elementos foram estabilizados.

#### 4.5 Estudo da Reatividade dos Metais Pesados nos Concretos com ROC e ROL

Os resultados das microcaracterizações do concreto referência, do concreto contendo 10% de ROL (CP10-L) e do concreto contendo 10% de ROC (CP10-C) estão apresentados na Figura 31.

**Figura 31-** Imagem ampliada 10.000 vezes das amostras dos concretos de referência, CP10-L e CP10-C por meio do MEV. a) Concreto de Referência, b) Concreto com Adição de 10% de ROC, c) Concreto com Adição de 10% de ROL.

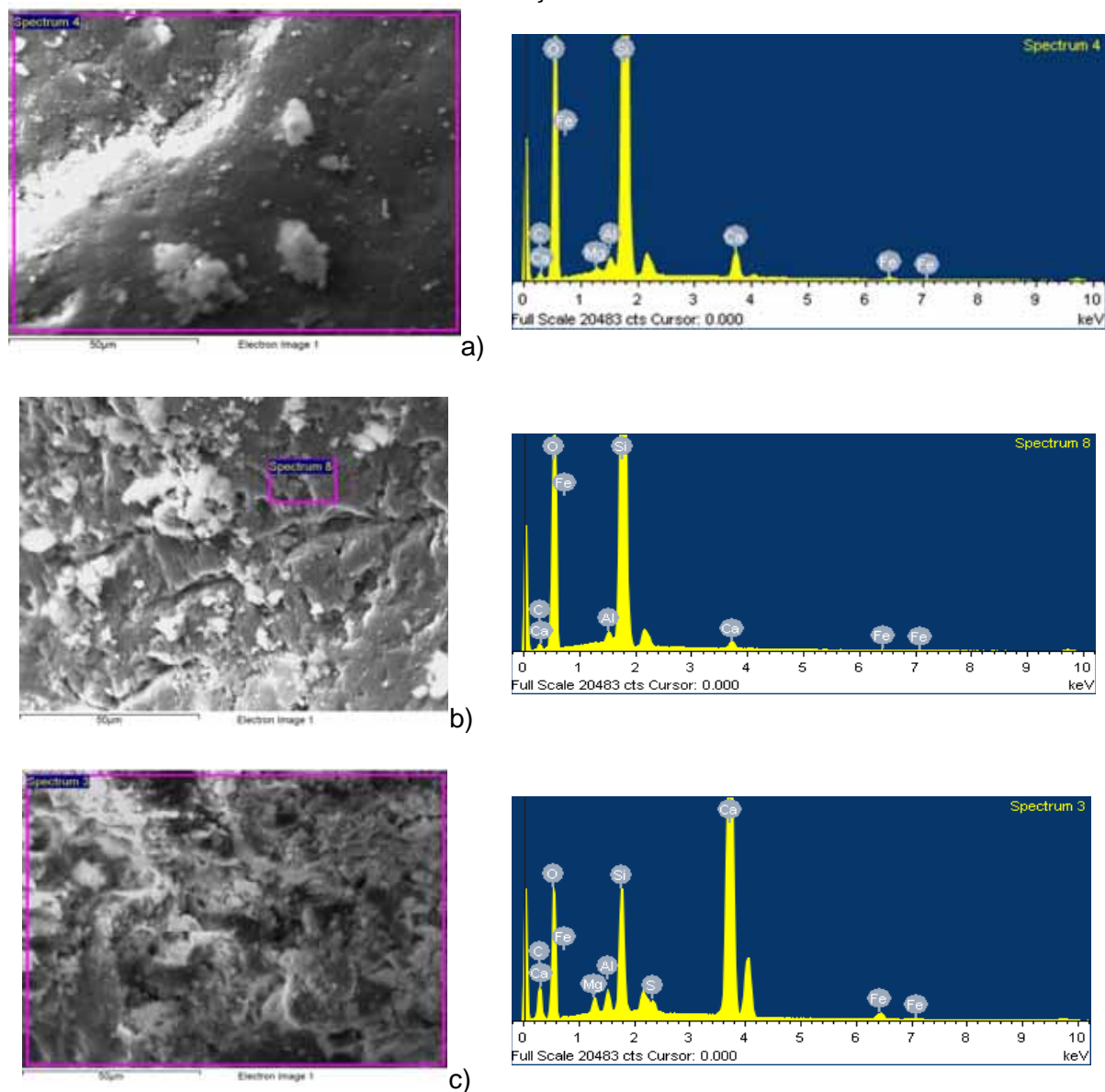


Fonte: Do próprio autor.

Como podemos observar nas imagens da Figura 31, a morfologia dos concretos contendo ROL e ROC alteram significativamente a superfície quando comparados com o concreto de referência.

Através do acoplamento do EDS no MEV, foi possível obtermos as informações de quais elementos químicos estão presentes nas amostras de concretos em estudo. Dessa forma, a Figura 32 apresenta a região onde foi focado feixe de elétrons e, conseqüentemente, detectada as energias provindas dos elementos específicos.

**Figura 32:** Microcaracterização do concreto com análise dos elementos por meio de MEV com sistema EDS acoplado. a) Concreto de Referência. b) Concreto com Adição de 10% de ROC. c) Concreto com Adição de 10% de ROL.



**Fonte:** Do próprio autor

Como pode ser observado na Figura 32, as amostras dos concretos de referência e contendo 10% de ROC apresentaram um padrão similar no que se refere às composições percentuais dos elementos nos concretos. Entretanto, a amostra com 10% de ROL mostrou um aumento significativo de Ca e diminuições em O e Si.

Embora seja apresentado um aumento de intensidade na detecção energética de raios-X característicos de Ca, linhas  $K\alpha$  (3,690 keV) e  $K\beta$  (4,012 keV), este aumento pode ser devido à outras linhas características de outros elementos. O elemento Sn (estanho) possui emissões características de fótons de raios-X, em uma faixa de energia com limite superior até 10keV, as linhas  $L\alpha$  (3,443 keV) e  $L\beta$  (3,662 keV). Como foi observada uma presença considerável de Sn nas amostras líquidas de ROL, é possível que o MEV tenha detectado traços deste elemento. No entanto, observando a Figura 32c, não é observada a linha espectral  $L\alpha$ , indicando talvez uma sobreposição das linhas  $L\alpha$  e  $L\beta$ .

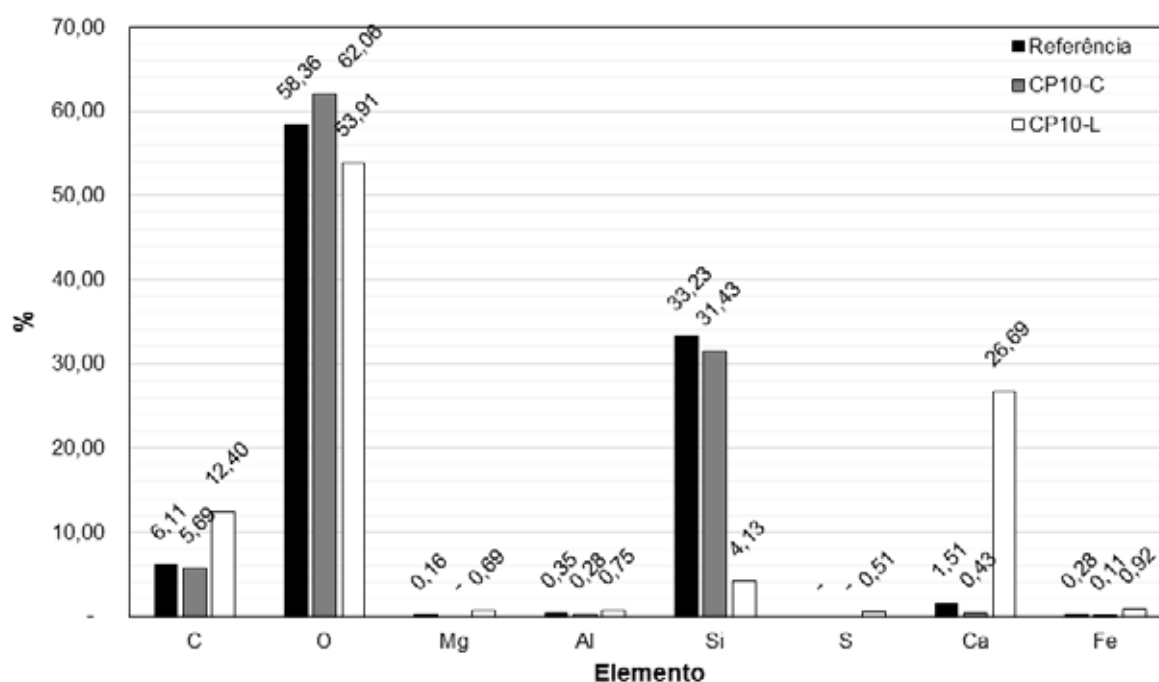
Para analisar melhor estes resultados, a Tabela 27 apresenta a composição percentual em massa e em peso atômico dos elementos químicos das amostras do concreto de referência, com ROC e ROL.

**Tabela 27-** Composição percentual da massa e do peso atômico dos elementos químicos das amostras de concretos.

Elemento	Referência		CP10-C		CP10-L	
	% Massa	% Peso Atômico	% Massa	% Peso Atômico	% Massa	% Peso Atômico
C	6,11	9,42	5,69	8,63	12,40	19,47
O	58,36	67,53	62,06	70,59	53,91	63,53
Mg	0,16	0,12	-	-	0,69	0,54
Al	0,35	0,24	0,28	0,19	0,75	0,52
Si	33,23	21,90	31,43	20,36	4,13	2,77
S	-	-	-	-	0,51	0,30
Ca	1,51	0,70	0,43	0,20	26,69	12,56
Fe	0,28	0,09	0,11	0,03	0,92	0,31
<b>Total</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>

Os dados da Tabela 27 estão representados graficamente na Figura 33. Podemos observar as variações significativas dos elementos químicos da amostra CP10-L com relação à amostra de referência e à amostra CP10-C.

**Figura 33-** Análise da composição percentual em massa dos elementos químicos dos concretos por meio do MEV com EDS acoplado.



**Fonte:** Do próprio autor.

Nota-se que a composição percentual em massa dos elementos da amostra de concreto contendo 10% de ROL alterou significativamente. A quantidade de carbono na amostra com ROL dobrou com relação às amostras de referência e com ROC. No que se refere ao percentual de oxigênio, o CP10-L reduziu em 7,6% com relação à amostra de referência.

Outra grande influência do ROL dentro da mistura de concreto foi a redução significativa da quantidade de sílica em seus constituintes. Conforme podemos observar na Tabela 27, houve uma redução de aproximadamente 87,7% com relação à amostra referência. Verificou-se a presença de enxofre na amostra com ROL, visto que não fora encontrado nenhum sinal deste elemento nas amostras com ROC e de referência.

Outro ponto importante a ressaltar é a quantidade de Ca identificada dentro da amostra com ROL. Como podemos notar na Tabela 26, o cálcio, que representou uma composição percentual em massa de 0,43% à 1,51% (CP10-C e

referência respectivamente), na amostra com ROL representou quase 26,7% de composição em massa no concreto.

Através da análise química dos resíduos líquidos de óleo e da análise de MEV destas amostras de concreto, foi verificado que a estabilização e a solidificação dos metais pesados foi alcançada, permanecendo inertes dentro do concreto endurecido.

#### **4.6 Considerações Finais**

Embora os concretos com ROC e ROL tenham obtido melhor consistência, permitindo a diminuição da relação água cimento, estes apresentaram queda de resistência mecânica. O concreto com adição de ROL teve melhor desempenho mecânico em relação ao concreto com ROC, isso ocorreu para todos os ensaios mecânicos.

O ensaio mecânico que apresentou maior influência nos resultados dos concretos com ROC e ROL foi o ensaio de resistência à compressão axial. De acordo com este resultado e sabendo que no ensaio de compressão o corpo de prova de rompe por cisalhamento, pode-se afirmar que o acréscimo de óleo mostrou maior influência no modo de ruptura por cisalhamento.

O modo de ruptura que foi mais afetado foi o modo que o concreto apresenta maior resistência. Já no modo de tração por flexão não, houve queda de resistência quando foram acrescentados 10% dos resíduos. Sendo que o modo de ruptura por tração é o mais crítico do concreto.

Uma análise mais profunda de MEV deve ser levada em consideração, havendo possibilidade de sobreposições de linhas espectrais de energia do SC na faixa de energia entre 3,4 e 4,4 keV, sobrepondo com as linhas do Ca.

## **5 CONCLUSÕES**

As amostras de ROC e ROL apresentaram resultados importantes tanto no aspecto de concreto fresco quanto concreto endurecido. No aspecto fresco, no ensaio de abatimento, ambas as amostras apresentaram redução da relação água-cimento, indicando uma melhora na consistência. No que se refere ao tempo de pega,

as amostras de ROC apresentou um tempo relativamente maior, podendo ser devido à baixa viscosidade encontrada nestas amostras.

No aspecto endurecido, nos ensaios mecânicos, as amostras contendo resíduos de óleo reduziram significativamente suas propriedades mecânicas. Observou-se que as amostras contendo ROC sofreram mais influências nestas propriedades mecânicas que as amostras contendo ROL, sendo possível a influência destes resíduos nas reações de hidratação do cimento, principal reação de ganho de resistência mecânica dos concretos. Constatou-se também que as reduções das propriedades mecânicas das amostras contendo resíduos de óleo são afetadas proporcionalmente com a adição destes na mistura do concreto. No entanto, observou-se que os valores médios das resistências à tração na flexão não sofreram alterações significativas com a adição de óleo.

A análise química das amostras de ROL indicou a presença de metais pesados em sua composição, tais como Zn, Mo, Pb e Sn. No entanto, na análise microestrutural do concreto por MEV, não foi constatada a presença destes metais pesados nas amostras de ROC, exceto nas amostras de ROL, em que pode ter havido uma sobreposição de linhas espectrais de Sn com as linhas de Ca.

Finalmente, este trabalho concluiu que a possibilidade de destinação de resíduos de óleo, ROC e ROL, como adição de concretos para aplicação em pavimentos é viável, pois: apresentou pouca influência na resistência à tração à flexão quando adicionado óleo à mistura de concreto; não apresentou sinais de metais pesados em ambas as amostras, indicando a efetividade do cimento como estabilizador químico, tornando menos reativo; o ROL mostrou ser mais indicado na aplicação em pavimentos, não apresentando alterações significativas com relação ao concreto referência.

## REFERÊNCIAS

- ABDELAZIZ, G., Utilization of used-engine oil in concrete as a chemical admixture. **HBRC JOURNAL**, Shoubra, v.5, n. 3, 2009.
- ABDUL-AHAD, R. B., MOHAMMED A.A. Compressive and tensile strength of concrete loaded and soaked in crude oil. **Engineering Journal of the University of Qatar**, Cidade de publicação, v. 13, n. 1, 123-140, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10.004**: resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 53**: determinação da massa específica aparente e absorção de água de agregados graúdos. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 7215**: resistência à compressão do cimento Portland. Rio de Janeiro, 1996.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 7222**: argamassa e concreto – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 52**: determinação da massa específica aparente e absorção de água de agregados miúdos. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 26**: agregados – amostragem. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 27**: agregados – redução da amostra de campo para ensaios em laboratório. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 248**: agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM ISO 3310**: peneiras de ensaio – requisitos técnicos e verificação – parte 1: peneiras de ensaio com tela de tecido metálico. Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 7211**: agregados para concretos – especificação. Rio de Janeiro, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 5738**: concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 5739**. Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 67**: concreto determinação da consistência pela abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 65**: Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega, Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 11581**: cimento portland – determinação dos tempos de pega. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 12142**: concreto – determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova Prismáticos. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM ISO 7500-1**: materiais metálicos – calibração de máquinas de ensaio estático uniaxial – parte 1: máquinas de ensaio de tração/compressão – calibração do sistema de medição de força. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR NM 8522**: concreto – determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 10.007**: amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro. 2004.

ABDELAZIZ, G. E. **Utilization of used-engine oil in concrete as a chemical admixture**. Shoubra: Faculty of Engineering in Shoubra, Benha University, 2007.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE- **ACI 212.3R-91**: manual of concrete practice: chemical admixture for concrete. Silver Spring, 1991.

ADJUKIEWICZ, A.; KLISZCZEWICZ, A. Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. **Cement & Concrete Composites**, Gliwice, v. 24, n. 1, p. 269-279, 2002.

AJAGBE, W. O.; OMOKEHINDE, O. S.; ALADE, G. A.; AGBEDE, O. A. Effect of crude oil impacted sand on compressive strength of concrete. **Construction and Building Materials**, Ibadan, v. 26, p. 9-12, 2012.

AJAGBE, W.O.; AGBEDE, O.A.; DAHUNSI, B.I.O. Effect of crude oil impacted sand on the properties of concrete. In: WEST AFRICA BUILT ENVIRONMENT RESEARCH CONFERENCE- WABER, 4., 2012, Abuja. **Proceedings...** Abuja: Ibadan, 2012. p. 177-189.

AL-ATTAR, T. S., A quantitative evaluation of bond strength between coarse aggregate and cement mortar in concrete. **European Scientific Journal**, Iraq, v. 9, n. 6, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE COLETA, SENSIBILIZAÇÃO E RECICLAGEM DE RESÍDUOS DE ÓLEO DE COZINHA- ECÓLEO. **Óleo**: descarte inadequado. São Paulo: [s.n.], 2012. Disponível em: <[www.ecoleo.org.br](http://www.ecoleo.org.br)>. Acessado em: dia mês abreviado 2013.

ASLI, H.; AHMADINIA, E.; ZARGAR, M.; KARIM, M. R. Investigation on physical properties of waste cooking oil: rejuvenated bitumen binder. **Construction and Building Materials**, Kuala Lumpur, v. 37, n. 1, p. 398-405, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TEST AND MATERIALS- ASTM. **D6481**: standard test method for determination of phosphorus, sulfur, calcium, and zinc in lubrication oils by energy x-ray fluorescence spectroscopy. Conshohocken, 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TEST AND MATERIALS- ASTM. **D92-52**: standard test method for flash fire points by cleveland open cup tester. Conshohocken, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TEST AND MATERIALS- ASTM. **D88 - 56**: standard test method for saybolt viscosity. Conshohocken, 1968.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND- ABCP. **Pavimento de concreto é alternativa para melhoria das rodovias**. São Paulo: [s.n.], 2012. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/conteudo/imprensa/pavimento-de-concreto-e-alternativa-para-melhoria-das-rodovias>>. Acesso em: 30 jun 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇOS DE CONCRETAGEM- ABESC. **Pavimento urbano de concreto**. São Paulo: [s.n.], 2013. Disponível em: <http://www.abesc.org.br/tecnologias/tec-pavimento.html>>. Acesso em: 1 maio 2013.

AYININUOLA, G. M. Influence of diesel oil and bitumen on compressive strength of concrete. **Journal of civil Engineering**, Ibadan, v. 37, n. 1, p. 65-71, 2009.

BALBO, J. T. **Pavimentos de concreto**. São Paulo: Oficinas de Textos, 2009. p. 471.

BEDDU, S.; NURUDDIN, M. F.; SHAFIQ, N. Effects of used engine oil as chemical admixtures on the properties of high strength concrete. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONSTRUCTION AND BUILDING TECHNOLOGY- ICCBT, 16., 2008, Malásya. ICCBT. Malásya: Malásya, 2008. p. 185-190.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Dispõe sobre a política nacional de resíduos sólidos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2010.

BRASIL. Resolução nº 362, de 23 de junho de 2005. Diretrizes para licenciamento ambiental de atividades ligadas aos óleos lubrificantes. **Diário Oficial da União- DOU**, Brasília, DF, 2005.

BŁASZYŃSKI, T. RC Structures in crude oil products environment. **Foundations Of Civil and Environmental Engineering**, Politechnika, v. 1, n. 2, p. 7-15, 2002.

BŁASZYŃSKI, T. Assessment of RC structures influenced by crude oil products. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, Poznan, v. 11, n. 1, p. 5-18, 2011.

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. 2007. 280 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos- EESC, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CARNEIRO, F. L. Um novo método para determinação da resistência à tração dos concretos. In: REUNIÃO ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 5., 1943, Rio de Janeiro. **Reunião...Rio de Janeiro**, Inst. Nac. Tecnol., 1943. (Comunicação, 5).

CASTRO, B. A. C. **Dimensionamento dos pavimentos rodoviários de concreto**: construção de estradas e vias urbanas. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais- UFMG – Escola de Engenharia, 2000. Notas de aula.

CHAKRADHARA, M.; BHATTACHARYYA, S. K. M.; BARAI, S.V. Behavior of recycled aggregate concrete under drop-weight impact load. **Construction and Building Materials**, India, v. 25, n. 1, p. 69-80, 2011.

CHEN, Q. Y.; TYRER, M.; HILLS, M.; YANG, X. M.; CAREY, P. Immobilization of heavy metal in cement-based solidification/stabilization: A review. **Waste Management**, Shanghai, v. 29, n. 1, p. 390-403, 2009.

CHIN, S. C.; SHAFIQ, N.; NURUDDIN, M. F. Effects of used engine oil in reinforced concrete beams: the structural behavior. **World Academy of Science, Engineering and Technology**, Kampur, v. 63, n. 1, p. 390-403, 2012.

CHOI, S. Y.; PARK, J. S.; JUNG, W. T. A study on the shrinkage control of fiber reinforced concrete pavement. **Procedia Engineering**, South Korea, v. 14, n. 1, p. 2815-2822, 2011.

NATIONAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION- NRMCA. **Concrete in practice**. Nova York, Spring Hills, 2001.

COPPOLA, L.; CERULLI, T.; SALVIONI, D., **Sustainability development and durability of self-compacting concretes**. Italy: Milan, 2003. p. 29-50.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras em materiais poliméricos, metálicos e semicondutores**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007. 60 p.

DIAB, H. Compressive strength performance of low- and high-strength concrete soaked in mineral oil. **Construction and Building Materials**, Assiut, v. 33, n. 1, p. 25-31, 2012.

DÍEZ, J. M.; MADRID, J.; MACÍAS, A. Character of cement-stabilized Cd wastes. **Cement and concrete Research**, Madrid, v. 27, n. 3, pp. 337-343, 1997.

EJEH, S. P.; UCHE, A. O. A. U. Effect of crude oil spill on compressive strength of concrete materials. **Journal of Applied Sciences Research**, Kano, v. 5, n. 10, p. 1756-1761, 2009.

EUROPEAN NORMS- EN. **197-1**: cement – part 1: composition, specifications and conformity criteria for common cements, UK, 2010.

FALCÃO, M. F.; SOARES, J. B. **Considerações sobre o ensaio de compressão diametral no estudo de materiais de pavimentação**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2000. p. 13.

GIERICZNY, Z.; KRÓL, A. Immobilization of heavy metals (Pb, Cu, Cr, Zn, Cd, Mn) in the mineral additions containing concrete composites. **Journal of Hazardous Materials**, Opole, v. 160, n.1, p. 247-255, 2008.

GOLDSTEIN J. I. et al. **Scanning electron microscopy and x-ray microanalysis**. Nova York: Plenum Press, 1998. 682 p.

HAMAD, B. S.; RTEIL, A. A.; EL-FADEL, M. Effect of used engine oil on properties of fresh and hardened concrete. **Construction and Building Materials**, Beirut, v. 17, n. 1, p. 311-318, 2003.

HAMAD, B. S.; RTEIL, A. A. Effect of used engine oil on structural behavior of reinforced concrete elements. **Construction and Building Materials**, Beirut, v. 17, n. 1, p. 203-211, 2003.

GIUBLIN, C. R.; MASCHIO, A.; NETO, J. M.; RODRIGUEZ, J. R. P.; DAHER, C. H. S.; DAHER, C. Z. Corredor de ônibus em pavimento de concreto na linha verde de Curitiba. **Revista Ibracon Melhores Práticas – Concreto e Construções**, Porto Alegre, v. 58, n. 1, p. 15-23, 2010.

ISAIA, G. C. High-performance concrete for sustainability construction. **Waste Materials in Construction**, Santa Maria, v. 1, n. 1, p. 344-354, 2000.

KATSIOTI, M.; KATSIOTIS, N.; ROUNI, G.; BAKIRTZIS, D; LOIZIDOU, M. The effect of bentonite/cement mortar for the stabilization/solidification of sewage sludge containing heavy metals. **Cement and Concrete Composites**, Roma, v. 30, n.10, p.1013-1019, 2008.

LAMBERT, P.; BRUECKNER, R.; ATKINS, C. Degradation of cement and concrete. **Ceramic Materials**, Altrincham, v.1, p. 2348-2368, 2010.

LEUNG, D. K. Y. Concrete as a building material. In: **ENCYCLOPEDIA of materials: science and technology**. New York: Elsevier, 2001. p. 1471-1479. ISBN: 0-08-0431526.

MATO GROSSO (Estado). Lei nº 7.862, de 19 de dezembro de 2002. Dispõe sobre a Política Estadual de Resíduos Sólidos no Estado do Mato Grosso. **Diário Oficial da União - DOU**, Brasília, DF, 19 dez. 2002, p.8.

MODRO, N. L. R.; MODRO, N. R.; MODRO, N. R.; OLIVEIRA, A. P. N.; Avaliação de concreto de cimento portland contendo resíduos de PET. **Revista Matéria**, Laguna, v. 14, n. 1, p. 725-736, 2009.

MEHTA, P. K. Reducing the environmental impact of concrete: concrete can be durable and environmentally friendly. **Concrete International**, Farmington Hills, v. 1, n. 1, p. 6, Out/2001.

NAIK, T. R. **Sustainability of the cement and concrete industries**: UWM center for by-products utilization. Milwaukee: University of Wisconsin, 2007.

NAIK, T. R.; MORICONI, G. **Environmental-friendly durable concrete made with recycled materials for sustainable concrete construction**: UWM center for by-products utilization. Milwaukee: University of Wisconsin, 2005. 13 p.

NAIK, T. R.; ASCE, F. Sustainability of concrete construction. **Practice Periodical on Structural design and Construction**, Milwaukee, v. 13, n. 2, p. 98-103, 2008.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. New York: Bookman, 2013. p. 472.

OIL WORLD. **The Independent forecasting service for oilseeds, oils & meals**. Hamburg: Germany, 2013. Disponível em: <<http://www.oilworld.biz/app.php?fid=1061&fpar=YToyOntzOjEzOiJQdWJsaWNhdGlvbkljtzOjQ6IjgXMjMiO3M6NDoiVHlwZSI7aTowO30%3D&isSSL=0&aps=0&blub=036afaa46f7dbfc0b0a316b4ecfb1af&ista=zcmfkdqqy>>. Acesso em: 31 jul. 2013.

OLIVEIRA, B. M. G.; SOMMERLATTE, B. R. **Programa de erenciamento integrado de resíduo óleo de cozinha**- PGIROC. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente - FEAM, 2008. p. 16.

PUKHOV, I. E. Effect of Mineral Oil on the Reinforced-Concrete Floors of the Uglich and Rybinsk Hydroelectric Power Plants. **Hydrotechnical Construction**, Springer, v. 35, n. 7, p. 372-374, 2001.

RESOLUÇÃO CONAMA 362 DE 2005. **Diretrizes para licenciamento ambiental de atividades ligadas aos óleos lubrificantes usados ou contaminados**. [S.l.]: Coordenação do Grupo de Monitoramento Permanente – GMP, 2005.

SALOMON, V. G. **Avaliação dos efeitos da presença de metais pesados nos resíduos co-processados quando utilizados como combustíveis alternativos e matéria-prima na indústria cimenteira**. 2002. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2002.

SÃO PAULO (Estado). Lei nº 12.047, de 21 de setembro de 2005. Institui o programa estadual de tratamento e reciclagem de óleos e gorduras de origem vegetal ou animal e uso culinário. **Diário Oficial da União- DOU**. Brasília, DF, 22 set. 2005.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY- USEPA. **Test Methods for Evaluation Solid Waste, Physical and Chemical Methods**. New York: [s.n.], 1994.

VAN EIJK, R. J.; BROUWERS, H. J. H. Modelling the effects of wastes components on cement hydration. **Waste Management**, Enschede, v. 21, n. 1, p. 279-284, 2001.

YU, Q.; NAGATAKI, S.; JINMEI LIN; SAEKI, T.; HISADA, M. The leachability of heavy metals in hardened fly ash cement and cement-solidified fly ash. **Cement and Concrete Research**, Guangzhou, v. 35, n. 1, p. 1056 – 1063, 2005.

YOUSUF, M.; MOLLAH, A.; VEMPATI, R. K.; LIN, T. C.; COCKE, D. L. The Interfacial Chemistry of Solidification/Stabilization of Metals in Cement and Pozzolanic Materials Systems. **Waste Management**, Beaumont, v. 15, n. 2, p.137-148, 1995.

ZHANG, J.; WANG, Z.; JU, X. **Application of ductile fiber reinforced cementitious composite in jointless concrete pavements**. Beijing: Department of Civil Engineering and Key Laboratory of Safety and Durability, 2013. p. 224-231.

**BIBLIOGRAFIAS**

- ALTOUBAT, S. A.; ROESLER, J. R.; LANGE, D. A.; RIEDER, K. A. Simplified method for concrete pavement design with discrete structural fibers. **Construction and Building Materials**, Sharjah, v. 22, n.1, p. 384-393, 2008.
- CABRAL, A. E. B.; SCHALCH, V.; DAL MOLIN, D. C. C.; RIBEIRO, J. L. D.; RAVINDRARAJAH S. R. Desempenho de concretos com agregados reciclados de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, Fortaleza, v. 55, n. 1, p. 448-460, 2009.
- CEYLAN, H. et al. Sensitivity Quantification of Jointed Plain Concrete Pavement Mechanistic-Empirical Performance Predictions. **Construction and Building Materials**, Ames, v. 43, n. 1, p. 545-556, 2013.
- FILHO, C. G. C.; PAGOTTO, L. D.; BARBOSA, R. M.; FILLETI, R. A. P. Avaliação de um Projeto Social de Coleta de Óleo da Unicamp. **Revista de Ciência do Ambiente**, Campinas, v. 6, n. 3, p. 68-70, dez. 2010.
- HASSAN, H. F.; RAWAS, A. A.; HAGO, A. W.; JAMRAH, A.; AL-FUTAISI, A.; AL-SABQI, T. Investigation of Permeability and Leaching of Hot Mix Asphalt Concrete Containing Oil-Contaminated Soils. **Construction and Building Materials**, Muscat, v. 22, n. 1, p. 1239-1246, 2008.
- GLASSER, F. P. Fundamental Aspects of Cement Solidification and Stabilization. **Journal of Hazardous Materials**, Aberdeen, v. 52, n. 1, p. 151-170, 1997.
- MARTINEZ-SOTO, I. E.; MENDOZA-ESCOBEDO, C. J. Comportamiento Mecánico de Concreto Fabricado con Agregados Reciclados. **Investigación y Tecnología**, UNAM, v. 7, n. 3, p. 151-164, 2006.
- WERLE, A. P.; KAZMIERCZAK, C. S.; KULAKOWSKI, M. P. Carbonatação em Concretos com Agregados Reciclados de Concreto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 11, n. 2, p. 213-228, abr./jun.2011.
- ZARGAR, M.; AHMADINIA, A.; ASLI, H.; KARIM, M. R. Investigation of the Possibility of Using Waste Cooking Oil as a Rejuvenating Agent for Aged Bitumen. **Journal of Hazardous Materials**, Kuala Lumpur, v. 233-234, n. 1, p. 254-258, 2012.
- MALISKA, A. M. **Microscopia eletrônica de varredura**. Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina- UFSC, [200-]. Apostila de Laboratório de Caracterização Microestrutural e Análise de Imagens – LCMAI.