**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**
**INSTITUTO DE QUÍMICA DE SÃO CARLOS**
**INSTITUTO DE FÍSICA SÃO CARLOS**
**ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

Francis Rodrigues de Souza

# Compósito de lodo de estação de tratamento de água e serragem de madeira para uso como agregado graúdo em concreto

**SÃO CARLOS**

2010

**Francis Rodrigues de Souza**

# Compósito de lodo de estação de tratamento de água e serragem de madeira para uso como agregado graúdo em concreto

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo, para a obtenção do título de Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais.

Área de Concentração: Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais.
Orientador:Prof. Dr. Almir Sales.

**SÃO CARLOS**

2010

**AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Serviço de Biblioteca e Informação IFSC/USP**

Souza, Francis Rodrigues de
Compósito de lodo de estação de tratamento de água e serragem de madeira para uso como agregado graúdo em concreto/ Francis Rodrigues de Souza; orientador Almir Sales – edição revisada -- São Carlos, 2009.
209 p.

Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais. Área de Concentração: Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos da Universidade de São Paulo.

1. Lodo de estação de tratamento de água. 2. Serragem de madeira. 3. Compósito. 4. Concreto. I. Título.

Este exemplar foi revisado e alterado em relação a versão original, sob a exclusiva responsabilidade do autor.

São Carlos, 25 de Maio de 2010.

Francis Rodrigues de Souza

# DEDICATÓRIA

“Meu querido Mestre e Amigo Jesus Cristo de Nazaré, eu lhe dedico este trabalho, pois o teu amor, os teus ensinamentos, a tua compreensão e o teu incansável apoio e proteção, durante todo o período de elaboração e desenvolvimento deste trabalho, capacitaram-me a realizá-lo”.

# AGRADECIMENTOS

Muito Obrigado.

Meu Deus, por eu ter o porquê e para quem agradecer.

Minha mãe Apparecida Rodrigues de Souza e minha companheira Vivian Ramirez Mantovani, por vocês existirem.

Prof. Dr. Almir Sales, por tudo que você fez por mim em todos os anos que trabalhamos juntos, pela sua amizade, pela sua orientação e pela confiança no meu trabalho.

Prof. Dr. Carlito Calil Jr., pela sua amizade e atenção sempre que precisei.

Prof. Dr. Wilson Nunes dos Santos, pela sua colaboração na realização dos ensaios experimentais de determinação das propriedades térmicas dos concretos em estudo. Ensaios realizados no Laboratório de Propriedades Térmicas do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos.

Prof. Dr. Antônio Carlos Hernandes e Geraldo José Mangerona Frigo, pela colaboração na realização dos ensaios experimentais de porosimetria de mercúrio. Ensaios realizados no Laboratório de Tecnologia do Pó, Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Prof. Dr. Máximo Siu Li e Nelson José Heraldo Gallo, pela colaboração na realização dos ensaios experimentais de microscopia eletrônica de varredura. Ensaios realizados no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura, Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Prof. Dr. Victor Carlos Pandolfelli e Paulo Roberto Teruo Tiba, pela colaboração na realização dos ensaios de determinação da durabilidade dos concretos em estudo por deterioração por abrasão. Ensaios realizados no Laboratório de Cerâmicas Especiais e Materiais Refratários, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos.

Profa. Dr. Lucia Helena Mascaro e Dr. Alexsandro Mendes Zimer, pela colaboração na realização dos ensaios químicos relacionados classificação dos resíduos do concreto em estudo. Ensaios realizados no Laboratório Interdisciplinar de Eletroquímica e Cerâmica, Departamento de Química, Universidade Federal de São Carlos.

Prof. Dr. Kleber Franke Portella e José Carlos Alves Galvão, pela colaboração na realização dos ensaios de durabilidade dos concretos em estudo. Ensaios realizados no Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Curitiba.

Prof. Dr. Holmer Savastano Jr. e Prof. Dr. Juliano Fiorelli, pela colaboração na realização dos ensaios de picnometria de hélio. Ensaios realizados na Universidade de São Paulo, Pirassununga.

Carlos Roberto da Costa, Sidnei Muzetti e Luiz Antonio Leal, amigos do corpo técnico do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, pela colaboração na realização dos ensaios de caracterização dos materiais.

Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais e CAPES, pelo apoio financeiro através da bolsa de estudos concedida.

Meus amigos, pelo importante apoio emocional.

Tudo e todos que me ajudaram a valorizar este trabalho tentando me fazer desistir.

*“O trabalho enobrece o homem,*
*transforma o resíduo em material de produção;*
*descobrir para ele uma função é nossa obrigação”.*

**Francis Rodrigues de Souza**

# RESUMO

DE SOUZA, F. R. **Compósito de lodo de estação de tratamento de água e serragem de madeira para uso como agregado graúdo em concreto.** 2009. 209 p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

Nos países em desenvolvimento, como o Brasil, os resíduos gerados nos decantadores e filtros das estações de tratamento de água são geralmente dispostos nos mesmos rios e córregos que suprem água para o tratamento. Outro problema ambiental está relacionado à disposição irregular dos resíduos de madeira. As indústrias de base florestal geram grande quantidade deste resíduo desde a exploração florestal até a manufatura do produto final. Este trabalho avalia a possibilidade de combinar estes dois resíduos e produzir um compósito leve para uso como agregado graúdo em concreto. O lodo seco e moído foi misturado com água e serragem e moldado manualmente na forma de pelotas redondas de 14±02 mm. A relação em massa da serragem, lodo e água foi 1:6:4,5. Depois de seco, os grãos do compósito foram imersos em óleo de linhaça cozido por 1 min. Este tempo foi considerado o menor período de imersão necessário para estabilizar a resistência mecânica, reduzir a absorção de água e evitar a quebra dos grãos durante a preparação e aplicação do concreto. Depois que o óleo foi aplicado, os grãos foram secos à temperatura ambiente. A massa unitária do compósito no estado seco e solto foi 672 kg/m$^3$. A serragem de madeira usada no desenvolvimento e produção do compósito foi do gênero *Pinnus*. Esta madeira apresentou diâmetro médio dos poros de 17,8 μm e diâmetro do lúmen de 23 μm. A análise granulométrica do lodo mostrou que 45% dos grãos são menores que 17 μm. Os grãos do lodo preencheram os poros da madeira formando um material compósito. O concreto contendo o compósito foi preparado com a total substituição da pedra britada. A relação em massa do cimento:areia:compósito:água foi 1:2,5:0,67:0,6 Nenhum aditivo complementar foi usado para evitar que os resultados fossem associados ao uso destes materiais. O concreto produzido com o compósito apresentou massa específica aparente de 1.848 kg/m$^3$, resistência à compressão axial de 11,1 MPa,

resistência à tração de 1,2 MPa, absorção de água de 8,7%, caracterizando-se como um concreto leve não estrutural. O concreto produzido com o compósito apresentou calor específico de 839 J/kg.K, difusividade térmica de $1{,}220.10^{-6}$ $m^2/s$ e condutividade térmica de 1,894 W/m.K. As propriedades térmicas do concreto produzido com o compósito sugerem a sua aplicação em elementos não estruturais de peso leve para vedação e isolação térmica. O resíduo sólido do concreto produzido com o compósito foi classificado segundo a NBR 10004:2004 como resíduo sólido não perigoso e não inerte. Uma comparação da concentração de alumínio no lodo e no extrato solubilizado do concreto contendo o compósito revelou uma significante redução na redução do metal, o que confirma a eco-eficiência do compósito para uso em concreto. A concentração de alumínio encontrada no extrato solubilizado do concreto com compósito foi 19,96 mg/L, enquanto no lodo de tratamento de água foi apresentada uma concentração de alumínio de 11.100 mg/L. É possível produzir um compósito com estes resíduos e diminuir a degradação ambiental.

Palavras-chave: Lodo de estação de tratamento de água. Serragem de madeira. Compósito. Concreto.

# ABSTRACT

DE SOUZA, F. R. **Composite of sludge from water treatment and sawdust for use as aggregate in concrete.** 2009. 209p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

In developing countries such as Brazil, the wastes generated in the decanters and filters of water treatment plants are usually discharged into the same rivers and streams that supply water for treatment. Another environmental problem is related to unregulated discard of wood wastes. The lumber and wood products industry generates large quantities of this waste, from logging to the manufacture of the end product. This study evaluates the possibility of combining these two wastes and produces a lightweight composite for use as aggregate in concrete. The dried and ground sludge was mixed with water and sawdust and molded by hand into rounded pellets with a diameter of 14±02 mm. The mass ratio of sawdust, sludge and water was 1:6:4,5. After drying, the composite grains were immersed in boiled linseed oil for 1 min. This time was considered the shortest period of immersion required to stabilize the mechanical strength, reduce water absorption and prevent the grains from crumbling during the preparation and application of the concrete. After the oil was applied, the grains were dried at room temperature. The unitary mass of the composite in the dry and loose state was 672 kg/m$^3$. The softwood sawdust used for the development and production of the composite was from Pinnus species. This wood presented a median pore diameter of 17,8 μm and a lumen diameter of 23 μm. Granulometric analysis of the sludge showed that 45% of the grains are smaller than 17 μm. The sludge grains filled the wood pores forming a composite material. The concrete containing the composite was prepared with the total substitution of crushed stone. The mass ratio of cement:sand:composite:water was 1:2,5:0,67:0,60. No complementary additives were used in order to avoid having the results associated with such materials. The concrete produced with composite presented an apparent specific mass of 1.848 kg/m$^3$, an axial compressive strength of 11,1 MPa, a tensile strength of 1,2 MPa and a water absorption of 8,7%, characterizing it as a lightweight nonstructural concrete. The concrete produced with the composite presented a

specific heat of 839 J/kg.K, a thermal diffusivity of 1,220.$10^{-6}$ $m^2$/s and a thermal conductivity of 1,894 W/m.K. The thermal properties obtained suggest the applicability of the concrete produced with the composite in lightweight nonstructural elements for sealing and thermal insulation. The solid waste of the concrete produced with composite was classified, according to the Brazilian ABNT NBR 10004:2004 standard, as non-harmful and non-inert solid wastes. A comparison of the concentration of aluminum in the sludge and the concentration of aluminum in the solubilized extract of the concrete containing the composite revealed a significant reduction in the concentration of the metal, which confirms the eco-efficiency of the composite for use in concrete. The concentration of aluminum in the solubilized extract of the concrete with composite was found to be 19,96 mg/L, while the water treatment sludge was showed an aluminum concentration of 11.100 mg/L. It's possible produce a composite with these wastes and reduce environmental degradation.

Keywords: Water treatment sludge. Sawdust. Composite. Concrete.

# LISTA DE FIGURAS


Figura 01 Fluxograma de classificação dos compósitos em função do material de reforço..... 32
Figura 02 Fluxograma para a classificação dos materiais compósitos em função da morfologia da fase dispersa..... 34
Figura 03 Fluxograma de causas físicas de deterioração do concreto ..... 62
Figura 04 Fluxograma de deterioração do concreto por reações químicas..... 63
Figura 05 Organograma do trabalho realizado..... 68
Figura 06 Estação de Tratamento de Água do município de São Carlos/SP..... 73
Figura 07 Limpeza do decantador da ETA de São Carlos..... 74
Figura 08 Disposição irregular do lodo no Córrego Monjolinho..... 74
Figura 09 Momento escolhido para coleta do lodo..... 75
Figura 10 Lodo no leito de drenagem..... 75
Figura 11 Fase sólida do lodo seco em estufa à temperatura 105±5$^{o}$C..... 76
Figura 12 Moagem da fase sólida do lodo seco..... 77
Figura 13 Macro-moinho Marconi MA-680 utilizado na moagem da madeira..... 78
Figura 14 Serragem de madeira *Pinnus elliotti* composta por partículas de tamanho menor ou igual a 0,841 mm ..... 79
Figura 15 Porosímetro Micromeritics Poro Sizer 9310 utilizado nos ensaios de porosimetria de mercúrio ..... 80
Figura 16 Peneirador automático utilizado na determinação da composição granulométrica do agregado miúdo natural..... 83
Figura 17 Peneirador automático utilizado na determinação da composição granulométrica do agregado graúdo natural..... 87
Figura 18 Preparo do compósito..... 91
Figura 19 Grãos do compósito preparados com o traço definido, e secos à temperatura ambiente..... 92
Figura 20 Imersão dos grãos do compósito em óleo de linhaça cozido ..... 93

Figura 21 Mistura manual dos grãos do compósito em argamassa após a imersão dos mesmos em óleo de linhaça e secagem à temperatura ambiente..... 94
Figura 22 Preparo manual do concreto com o compósito..... 95
Figura 23 Amassamento em betoneira do concreto com o compósito..... 95
Figura 24 Utilização do vibrador mecânico no preparo do concreto com o compósito..... 96
Figura 25 Resultado de erro de dosagem na produção do concreto com o compósito..... 97
Figura 26 Corpo-de-prova após ruptura por compressão axial do concreto produzido com o compósito e preparado com a dosagem definida..... 97
Figura 27 Grãos do compósito imersos em água, durante o ensaio de determinação da massa específica e da absorção de água..... 98
Figura 28 Seção de corpo-de-prova cilíndrico de 10 x 20 cm utilizada para a análise da aderência do compósito com a argamassa matriz... 99
Figura 29 Determinação da consistência dos concretos em estudo pelo abatimento do tronco de cone..... 101
Figura 30 Corpo-de-prova cilíndrico de concreto preparado para o ensaio de determinação dos módulos de elasticidade e deformação..... 102
Figura 31 Corpo-de-prova cilíndrico de concreto sendo preparado para o ensaio de determinação da tração por compressão diametral..... 102
Figura 32 Corpo-de-prova cilíndrico de concreto imerso em água durante o ensaio de determinação da absorção de água e da massa específica..... 103
Figura 33 Posicionamento dos fios para a determinação das propriedades térmicas dos concretos em estudo pelo Método do Fio Quente Paralelo..... 106
Figura 34 Colocação do concreto nas fôrmas de madeira sobre a mesa vibratória..... 107
Figura 35 Corpo-de-prova preparado para a aplicação da corrente elétrica contínua no Fio Quente Central..... 108

Figura 36 Corpos-de-prova de concreto preparados em fôrmas de madeira sob mesa vibratória para ensaio de resistência à abrasão..... 109
Figura 37 Erosímetro SOLOTEST Série 1183 utilizado na determinação da resistência à abrasão dos concretos em estudo..... 110
Figura 38 Agitador magnético micro química MQAMA 301 utilizado no preparo da solução de extração..... 112
Figura 39 pHmetro UltraBasic utilizado na medição do pH da solução de extração..... 112
Figura 40 Aparato utilizado na filtração da solução de extração..... 113
Figura 41 Amostra do concreto produzido com o compósito na forma de partículas com dimensões menores que 9,5 mm..... 114
Figura 42 Curva cumulativa, e logarítmica diferencial, do volume de intrusão do mercúrio em função do diâmetro dos poros da serragem de madeira..... 121
Figura 43 Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura utilizadas na determinação do comprimento e espessura das fibras da serragem de madeira *Pinnus elliotti*..... 122
Figura 44 Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura utilizadas na determinação do diâmetro do lúmen e da espessura da parede celular da serragem de madeira *Pinnus elliotti*..... 123
Figura 45 Composição granulométrica da areia quartzosa do rio Mogi-Guaçu entre os limites da zona granulométrica 3..... 129
Figura 46 Curva de inchamento da areia quartzosa do rio Mogi-Guaçu..... 132
Figura 47 Composição granulométrica da pedra britada da pedreira Bandeirantes entre os limites de graduação granulométrica 1, estabelecidos pela NBR 7211:1983 (77)..... 134
Figura 48 Curva cumulativa e logarítmica diferencial do volume de intrusão de mercúrio em função do diâmetro do poro do compósito..... 141
Figura 49 Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura da parte interna do compósito desenvolvido..... 142

Figura 50 Micrografia óptica com aproximação de 400x da região de transição entre o compósito e a matriz de argamassa..... 143
Figura 51 Diagrama deformação x tensão do corpo-de-prova 10 do concreto produzido com o compósito 146
Figura 52 Diagrama deformação x tensão do corpo-de-prova 01 do concreto referência..... 149

# LISTA DE TABELAS


Tabela 01 Densidade do lodo de estação de tratamento de água em relação à concentração de sólidos..... 38

Tabela 02 Propriedades e características físico-químicas dos lodos das estações de tratamento de água de Araraquara, Rio Claro e São Carlos..... 39

Tabela 03 Densidade básica das madeiras *Pinnus elliotti* juvenil e adulta... 51

Tabela 04 Dimensões médias das fibras de madeira *Pinnus elliotti* juvenil e adulta..... 51

Tabela 05 Relações entre as dimensões fundamentais das fibras da madeira *Pinnus elliotti* juvenil e adulta..... 52

Tabela 06 Diferenças entre propriedades físicas da pedra britada e da argila expandida 2215 da empresa Cinasita..... 58

Tabela 07 Diferenças entre propriedades térmicas de concreto leve produzido com argila expandida e de concreto convencional..... 65

Tabela 08 Propriedades características da manta geotêxtil utilizada para a drenagem do lodo..... 76

Tabela 09 Resultado da análise granulométrica do lodo seco e moído realizada por sedimentação sem aplicação de defloculante..... 118

Tabela 10 Resultados do ensaio de determinação do teor de umidade de umidade da serragem de madeira..... 119

Tabela 11 Propriedades e características da serragem de madeira determinadas por porosimetria de mercúrio..... 119

Tabela 12 Variação do diâmetro dos poros da serragem de madeira em função da pressão aplicada para intrusão de mercúrio..... 120

Tabela 13 Densidade básica e dimensões médias das fibras da serragem da madeira *Pinnus elliotti* utilizada na produção do compósito.... 124

Tabela 14 Propriedades e características do óleo de linhaça cozido..... 124

Tabela 15 Propriedades e características do Cimento Portland CPV-ARI-Plus comparados aos limites estabelecidos pela NBR 5733:1991 (99)..... 125

Tabela 16 Valores obtidos no ensaio experimental de determinação da resistência à compressão segundo a NBR 7215:1996 (100), comparados aos valores fornecidos pelo fabricante do CPV-ARI-Plus e aos limites estabelecidos pela NBR 5733:1991 (99)..... 127
Tabela 17 Composição granulométrica da areia quartzosa do rio Mogi-Guaçu e limites granulométricos de agregado miúdo definidos pela NBR 7211:1983 (77)..... 128
Tabela 18 Resultados do ensaio experimental de determinação da massa unitária da areia quartzosa do rio Mogi-Guaçu no estado seco e solto..... 129
Tabela 19 Resultados do ensaio experimental de determinação da massa unitária da areia quartzosa do rio Mogi-Guaçu no estado compactado seco..... 130
Tabela 20 Determinação da massa específica da areia quartzosa do rio Mogi-Guaçu pelo método do Frasco de Chapman..... 130
Tabela 21 Massa unitária e coeficiente de inchamento de amostras da areia quartzosa do rio Mogi-Guaçu com teores de umidade de 0 a 7%..... 131
Tabela 22 Composição granulométrica da pedra britada basáltica da pedreira Bandeirantes e limites granulométricos de agregado graúdo definidos pela NBR 7211:1983 (77)..... 133
Tabela 23 Resultados do ensaio de determinação da massa unitária no estado seco e solto da pedra britada da pedreira Bandeirantes.. 135
Tabela 24 Resultados do ensaio experimental de determinação da massa unitária no estado compactado seco da pedra britada da pedreira Bandeirantes..... 135
Tabela 25 Resultados do ensaio experimental de determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água da pedra britada da pedreira Bandeirantes..... 136
Tabela 26 Resultados do ensaio experimental de determinação do teor de materiais pulverulentos na pedra britada basáltica da pedreira Bandeirantes..... 137

Tabela 27 Composição granulométrica do agregado graúdo natural utilizada para a determinação do índice de forma do agregado.. 137
Tabela 28 Valores de comprimento e de espessura dos grãos do agregado graúdo natural utilizados na determinação do índice de forma..... 138
Tabela 29 Propriedades e características do compósito..... 139
Tabela 30 Variação da absorção do óleo de linhaça pelo compósito em função do tempo de imersão..... 139
Tabela 31 Variação do diâmetro dos poros da serragem de madeira em função da pressão aplicada para intrusão de mercúrio..... 140
Tabela 32 Propriedades e características do compósito determinadas por porosimetria de mercúrio..... 141
Tabela 33 Resultados dos ensaios de determinação da resistência à compressão axial e dos módulos de elasticidade e de deformação secante do concreto produzido com o compósito.... 145
Tabela 34 Carga de ruptura e resistência à tração por compressão diametral do concreto produzido com o compósito..... 146
Tabela 35 Resultados do ensaio de determinação da absorção de água, do índice de vazios e da massa específica real, seca e saturada do concreto produzido com o compósito..... 147
Tabela 36 Resultados dos ensaios de determinação da resistência à compressão axial e dos módulos de elasticidade e de deformação secante do concreto-referência..... 148
Tabela 37 Resultados do ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral do concreto-referência..... 148
Tabela 38 Resultados do ensaio de determinação da absorção de água, do índice de vazios e da massa específica real, seca e saturada, do concreto-referência..... 150
Tabela 39 Propriedades térmicas dos concretos em estudo..... 150
Tabela 40 Valores da densidade e da condutividade térmica dos concretos em estudo e de concretos com argila expandida apresentados pela NBR 15220-2:2005 (122)..... 151

Tabela 41 Resultados do ensaio de determinação da durabilidade do concreto produzido com o compósito a partir da deterioração por abrasão..... 152
Tabela 42 Resultado do ensaio de determinação da durabilidade do concreto-referência a partir da deterioração por abrasão..... 152
Tabela 43 Concentração de metais nos extratos solubilizados e lixiviados dos concretos em estudo e limites estabelecidos pela NBR 10004:2004 (11)..... 153

# SUMÁRIO


| | | |
|---|---|---|
| **1** | **INTRODUÇÃO** ..... | 27 |
| **2** | **OBJETIVOS** ..... | 29 |
| **3** | **REVISÃO DA LITERATURA** ..... | 31 |
| 3.1 | Materiais compósitos ..... | 31 |
| 3.1.1 | Classificação dos compósitos ..... | 32 |
| 3.2 | Resíduos sólidos ..... | 35 |
| 3.2.1 | Caracterização e classificação dos resíduos sólidos ..... | 35 |
| 3.3 | O lodo de estação de tratamento de água ..... | 36 |
| 3.3.1 | A origem do lodo em estações de tratamento de água ..... | 36 |
| 3.3.2 | Características gerais de lodos de estações de tratamento de água ..... | 37 |
| 3.3.3 | Alternativas de disposição final para o lodo de estação de tratamento de água e o impacto ambiental causado pela disposição irregular ..... | 40 |
| 3.3.4 | A quantidade de lodo gerada em uma estação de tratamento de água convencional ..... | 42 |
| 3.3.5 | Alternativas de tratamento e reciclagem para o lodo de estação de tratamento de água ..... | 43 |
| 3.4 | Resíduos de madeira ..... | 45 |
| 3.4.1 | Propriedades e características da madeira ..... | 46 |
| 3.4.2 | A madeira *Pinnus elliotti* ..... | 50 |
| 3.4.3 | Classificação dos resíduos de madeira ..... | 52 |
| 3.4.4 | Alternativas de reciclagem para os resíduos de madeira ..... | 53 |
| 3.5 | Agregados para concreto ..... | 56 |
| 3.5.1 | Classificação dos agregados ..... | 56 |
| 3.5.2 | Agregado leve ..... | 57 |
| 3.5.3 | Correlação entre as propriedades dos agregados e dos concretos. | 60 |
| **4** | **MATERIAIS E MÉTODOS** ..... | 67 |
| 4.1 | Organização do trabalho, formulação da idéia, e ensaios preliminares ..... | 67 |
| 4.2 | Coleta, transporte e caracterização dos materiais e resíduos ..... | 71 |

4.2.1 O lodo de estação de tratamento de água utilizado no desenvolvimento e na produção do compósito ..... 72
4.2.2 A serragem de madeira utilizada no desenvolvimento e na produção do compósito ..... 78
4.2.3 O óleo de linhaça utilizado no desenvolvimento e na produção do compósito ..... 81
4.2.4 O aglomerante hidráulico utilizado na produção dos concretos em estudo ..... 81
4.2.5 O agregado miúdo natural utilizado na produção dos concretos em estudo..... 82
4.2.6 O agregado graúdo natural utilizado na produção dos concretos em estudo ..... 86
4.3 Desenvolvimento, caracterização e aplicação do compósito como agregado graúdo em concreto ..... 91
4.4 Determinação das propriedades físicas e mecânicas dos concretos em estudo ..... 100
4.5 Determinação das propriedades térmicas dos concretos em estudo ..... 105
4.6 Determinação da deterioração dos concretos em estudo por abrasão..... 108
4.7 Classificação dos resíduos dos concretos em estudo em função do risco potencial ao meio ambiente..... 110
4.7.1 Determinação do extrato lixiviado dos concretos em estudo ..... 111
4.7.2 Determinação do extrato solubilizado dos concretos em estudo..... 114
4.7.3 Determinação da concentração de metais nos extratos lixiviados e solubilizados dos concretos em estudo, e classificação dos resíduos ..... 115
**5 RESULTADOS**..... 117
5.1 Propriedades e características do lodo da Estação de Tratamento de Água de São Carlos..... 117
5.2 Propriedades e características da madeira *Pinnus elliotti*..... 118
5.3 Propriedades e características do óleo de linhaça cozido..... 124

5.4 Propriedades e características do cimento Portland de alta resistência inicial..... 125
5.5 Propriedades e características da areia quartzosa..... 127
5.6 Propriedades e características da pedra britada basáltica..... 132
5.7 Propriedades e características do compósito leve para concreto.... 138
5.8 Propriedades físicas e mecânicas dos concretos em estudo..... 144
5.8.1 Propriedades físicas e mecânicas do concreto produzido com o compósito..... 144
5.8.2 Propriedades físicas e mecânicas do concreto-referência..... 147
5.9 Propriedades térmicas dos concretos em estudo..... 150
5.10 Deterioração por abrasão dos concretos em estudo..... 151
5.11 Classificação dos resíduos dos concretos em estudo..... 153
**6 CONCLUSÕES**..... 155
**7 SUGESTÕES PARA A CONTINUIDADE DO TRABALHO**..... 159
**REFERÊNCIAS** 161
**APÊNDICE A** – Porosimetria de mercúrio. 175
**APÊNDICE B –** Índice de forma 189
**APÊNDICE C** – Módulo de Elasticidade e Deformação 195

Capítulo 1

# INTRODUÇÃO

A geração de resíduos em um processo industrial de tratamento e/ou produção de materiais é praticamente inevitável. Quando não há uma tecnologia adequada para o reaproveitamento ou reciclagem de um resíduo, certamente esse material será depositado na natureza e poderá ocasionar inúmeros problemas para o meio-ambiente. O problema pode não estar relacionado à falta de tecnologia para a reciclagem, mas à falta de legislação e fiscalização mais rigorosa que puna os responsáveis pela disposição irregular desses resíduos. A falta de conhecimento e conscientização da população é outro fator que agrava o problema, uma vez que a solução não depende de ações unilaterais.

As estações de tratamento de água para abastecimento público transformam a água bruta, inadequada para o consumo humano, em água potável e, do processo de tratamento aplicado, gera o resíduo sólido denominado lodo de estação de tratamento de água.

O lodo de estação de tratamento de água é um resíduo composto por matéria orgânica e inorgânica no estado sólido, líquido e gasoso que tem uma composição variável com relação a suas características físicas, químicas e biológicas (01).

Embora atualmente já existam diversas alternativas para reciclar o lodo de estação de tratamento de água, no Brasil existem aproximadamente 7.500 estações de tratamento de água que lançam os resíduos produzidos nos mesmos córregos e rios de onde é retirada a água para o tratamento (02).

Entre as alterações prejudiciais ao meio ambiente causadas pela disposição irregular deste resíduo estão a redução do oxigênio dissolvido e o aumento da concentração de alumínio e outros metais nos cursos d'água receptores.

Entre as possíveis alternativas de reciclagem atualmente existentes para o lodo de estação de tratamento de água destacam-se: a recuperação do alumínio

presente no lodo e a utilização do mesmo no tratamento de efluentes domésticos, o espargimento do lodo no solo para fins agrícolas e a recuperação de áreas degradadas, a aplicação do lodo na produção de solo-cimento, pigmentos de argamassa, materiais cerâmicos e concretos.

Assim como o lodo de estação de tratamento de água, os resíduos de madeira também são dispostos irregularmente no meio-ambiente, principalmente nos países em desenvolvimento como o Brasil. As indústrias de base florestal geram grande quantidade deste resíduo, desde a exploração florestal até a manufatura de seus produtos finais. Aproximadamente 50% do volume original das toras tornam-se resíduos e, apesar de haverem diversas alternativas de reciclagem, nem sempre elas são utilizadas.

Entre as possíveis alternativas de reciclagem, estão a fabricação de painéis de madeira compensada, a queima para a produção de energia e a utilização destes resíduos como fibras na produção de concretos com potencial de isolação térmica e acústica.

Além da disposição irregular de resíduos, outro problema ambiental está relacionado à extração de matérias primas. O consumo de materiais naturais está crescendo na mesma proporção do crescimento da economia e da população. Entre 1970 e 1995, o consumo de materiais no mundo cresceu de 5,7 bilhões de toneladas para 9,5 bilhões de toneladas. Devido a este crescimento, as reservas de muitos materiais começam a ficar escassas, especialmente nas grandes cidades onde já é necessário extrair algumas matérias primas a distâncias cada vez maiores (03). Por exemplo, a pedra britada para uso como agregado graúdo em concreto, cujo preço no mercado cresceu muito nos últimos anos.

Buscar o desenvolvimento de materiais a base de resíduos, a caracterização e a proposição de possíveis aplicações para os mesmos é de extrema importância para o equilíbrio econômico e ecológico de um país.

Capítulo 2

# OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver um compósito a base de lodo de estação de tratamento de água e serragem de madeira, e avaliar a sua possível aplicação como agregado graúdo para concreto. Com base no objetivo principal, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- Definir o traço ideal dos materiais de produção do compósito.
- Caracterizar o compósito e comparar suas propriedades com as propriedades de um agregado graúdo natural.
- Avaliar a possível substituição total do agregado graúdo natural pelo compósito na produção de concreto.
- Definir o traço ideal para a produção de concreto com o compósito.
- Comparar as propriedades físicas, mecânicas e térmicas do concreto produzido com o compósito com as propriedades de um concreto-referência produzido com o agregado graúdo natural.
- Avaliar o desgaste superficial por abrasão do concreto produzido com o compósito e compará-lo com o de um concreto referência produzido com o agregado graúdo natural.
- Verificar a eco-eficiência da reciclagem dos resíduos na produção do compósito para uso como agregado graúdo em concreto, classificando o resíduo do concreto produzido com o compósito em função do seu risco potencial para o meio ambiente.

Se os objetivos alcançados forem positivos, e com os conhecimentos gerados, este trabalho poderá fomentar para as agências de saneamento e para as indústrias de base florestal uma nova alternativa para a disposição final de seus resíduos e, para a indústria de construção civil, um novo material produzido a base de resíduos que possa substituir uma matéria prima natural cada vez mais escassa na natureza.

# Capítulo 3 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo estão apresentados os conceitos técnicos e científicos, encontrados na literatura, que complementam este trabalho como base e justificativa para o mesmo.

## 3.1 Materiais compósitos

Compósito é uma mistura física de dois ou mais materiais combinados para formar um novo material útil com propriedades diferentes aos seus componentes puros (04).

Os materiais compósitos são constituídos de um ou mais materiais dispersos em uma matriz, chamados de materiais de reforço ou de carga. Os materiais de reforço têm o objetivo de fornecer resistência ao compósito e podem ser constituídos de fibras curtas, longas, contínuas, descontínuas e outras. Abaixo de um comprimento mínimo, as fibras deixam de atuar como reforço e fazem o papel de enchimento ou carga. A matriz é o material que envolve o material de reforço dando forma ao compósito (05).

O importante em material compósito é o efeito sinérgico que se observa no sistema onde suas propriedades finais são uma mistura melhorada das propriedades de seus componentes (06).

De acordo com Panshin e Zeeuw (07), a madeira é um exemplo natural de compósito, altamente complexo, composto por fibras, principalmente celulose, dispersa numa matriz de lignina e hemicelulose.

O conceito de compósito é amplo e constitui uma denominação empregada para os mais diversos materiais desenvolvidos pelo homem. Historicamente, pode-

se dizer que o termo compósito é usado para descrever desde as primeiras misturas de argila reforçada com palha, usadas para tijolos no antigo Egito, até o os novos compósitos metal/matriz, cerâmica/matriz, e carbono/carbono utilizado para aplicações a altas temperaturas (08).

### 3.1.1 Classificação dos compósitos

Um compósito deve ser um material multifase, com propriedades superiores a cada fase de sua composição. Uma dessas fases deve ser um aglomerante e, a outra, um material de reforço. Em função do material de reforço, os compósitos podem ser classificados em três grupos: compósitos reforçados com partículas, compósitos reforçados com fibras e compósitos estruturais (Figura 01) (06).

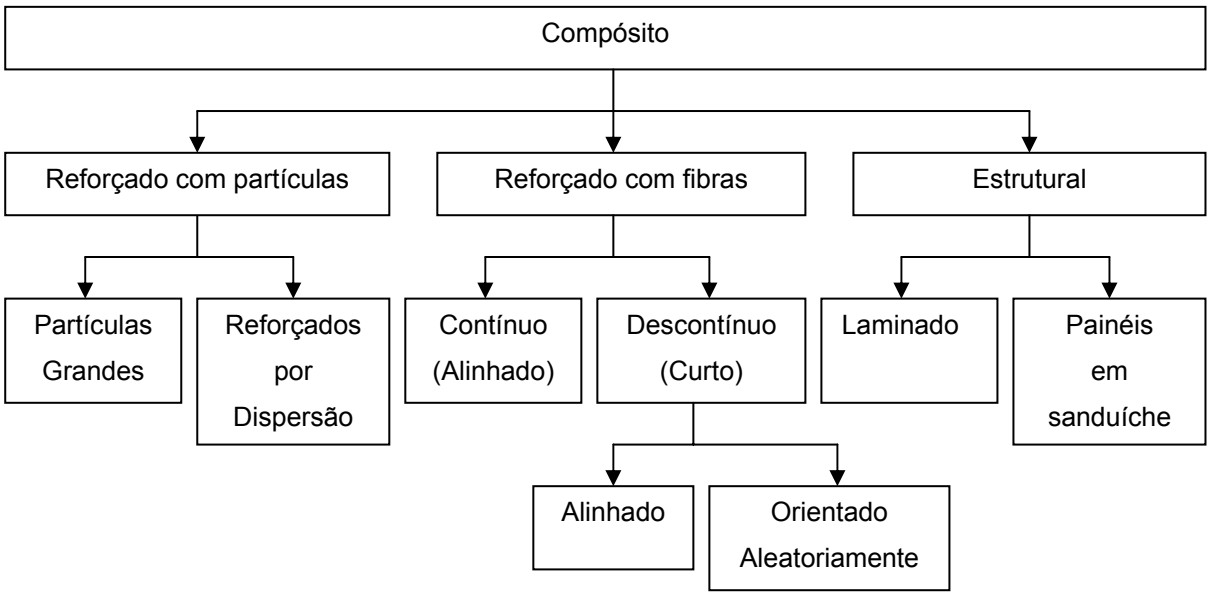



Figura 01 – Fluxograma de classificação dos compósitos em função do material de reforço.

Bittencourt (09) classifica os compósitos bifásicos em três grandes grupos, dependendo do tipo, da geometria e da orientação da fase reforçadora:

- Compósitos granulares são compósitos formados por partículas de vários tamanhos e formas, dispersos aleatoriamente na matriz. Devido a essa

aleatoriedade, tais compósitos podem ser considerados quase homogêneos e quase isotrópicos, se examinados numa escala maior que o tamanho das partículas.

- Compósitos de fibras descontínuas são compósitos que apresentam como reforço pequenas fibras, que podem ser dispostas aleatoriamente ou ao longo de uma direção. No primeiro caso, o compósito pode ser considerado quase isotrópico e, no segundo caso, tende a ser anisotrópico ou, mais especificamente, ortotrópico.
- Compósitos de fibras contínuas são compósitos, reforçados por fibras longas e contínuas, mais eficientes do ponto de vista de rigidez e resistência mecânica. As fibras podem ser todas paralelas (unidirecional), dispostas perpendicularmente (bidirecional) ou orientadas em vários ângulos (multidirecional).

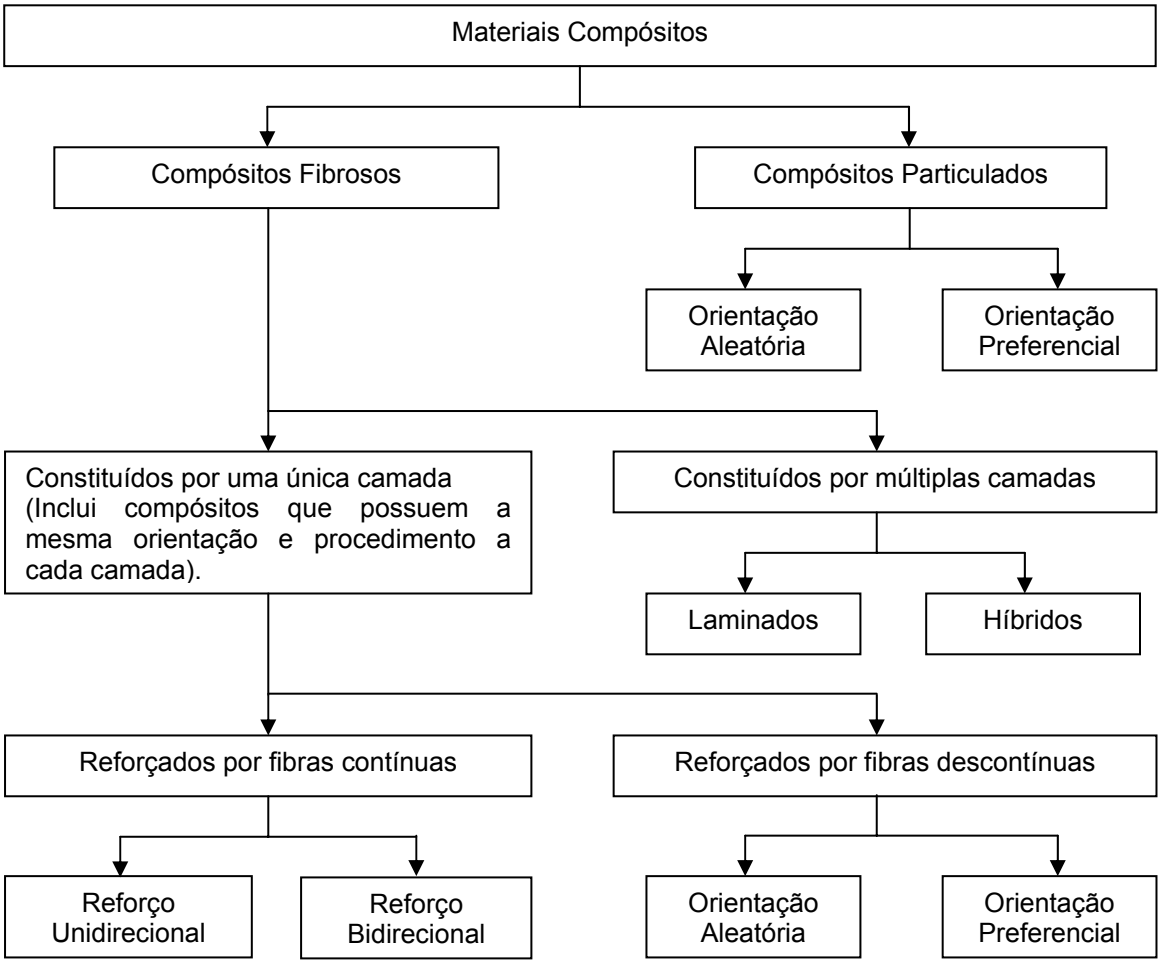
De acordo com a morfologia da fase dispersa, os compósitos classificam-se em fibrosos e particulados. As partículas são componentes do compósito que apresentam relação, entre a maior e a menor dimensão do corpo, menor do que três (10). Na Figura 02 pode ser observado o fluxograma apresentado por Ratner et al (10) para a classificação dos materiais compósitos em função da morfologia da fase dispersa.

De acordo com Tita (05), Bittencourt (09) e Callister (06), com base na fase matriz, os compósitos podem ser classificados em quatro grupos principais, divididos em:

- Compósitos de matriz polimérica. Estes compósitos dividem-se em termorrígidos (epóxi, poliamida, poliéster) e termoplásticos (poli-éter-cetona, poli-sulfona, poli-éterimida), são reforçados com fibras de vidro, carbono aramida (Keviar) ou boro e, são usados, fundamentalmente, em aplicações a baixa temperatura.
- Compósitos de matriz metálica. Estes compósitos consistem em ligas metálicas (alumínio, magnésio, titânio, cobre) reforçadas com fibras de boro, carbono ou cerâmicas. A temperatura de serviço máxima destes compósitos é definida em função da temperatura de fusão da matriz.
- Compósitos de matriz cerâmica. Este compósitos consistem de cerâmica (carbeto de silício, óxido de alumínio, vidro, nitreto de silício) reforçada

com fibras cerâmicas. Estes compósitos são indicados para aplicações a altas temperaturas.

- Compósitos carbono/carbono. Consistem de matriz e reforço de carbono ou grafite. Apesar da mesma composição, fibra e matriz apresentam diferentes propriedades físicas e mecânicas. Apresentam a propriedade única de resistência relativamente alta a altas temperaturas associada à baixa massa específica e expansão térmica.




Fonte: Ratner et al (10).

Figura 02 – Fluxograma para a classificação dos materiais compósitos em função da morfologia da fase dispersa.

Os compósitos laminados são constituídos de finas camadas de diferentes materiais colados juntos, como os bi-metais, compensados e fórmica (09).

## 3.2 Resíduos Sólidos

São denominados resíduos sólidos os resíduos nos estados sólido e semi-sólido que resultam de atividades da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola e de serviços de varrição. Também são denominados resíduos sólidos os lodos provenientes de estações de tratamento de água, os resíduos gerados em equipamentos e instalações de poluição e os líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou que exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis diante da melhor tecnologia disponível (11).

### 3.2.1 Caracterização e classificação de resíduos sólidos

A NBR 10004:2004 (11) classifica os resíduos sólidos em função de sua periculosidade em duas classes principais: Resíduos Classe I – Perigosos, e Resíduos Classe II – Não Perigosos. Os Resíduos Classe II são divididos em duas classes: Resíduos Classe II A – Não Inertes, e Resíduos Classe II B – Inertes.

De acordo com a NBR 10004:2004 (11), um resíduo é classificado como perigoso quando houver o enquadramento do mesmo nas listagens de seus anexos A e B ou quando o resíduo apresenta uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxidade e patogenicidade.

São classificados como resíduos não inertes, os resíduos que não se enquadram como Resíduos Classe I – Perigosos ou como Resíduos Classe II B – Inertes e que caracterizam-se por apresentar uma das seguintes propriedades: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água (11).

São enquadrados como Resíduos Classe II B – Inertes, os resíduos que, quando amostrados segundo a NBR 10007:2004 (13) e submetidos a um contato estático ou dinâmico com água destilada ou deionizada à temperatura ambiente, conforme teste de solubilização definido pela NBR 10006:2004 (14), não apresentarem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações

superiores aos padrões de potabilidade da água, definidos no anexo G da NBR 10004:2004 (11), excetuando os padrões de aspecto, cor, turbidez e sabor (11).

### 3.3 O lodo de estação de tratamento de água

As estações de tratamento de água (ETAs) para abastecimento público transformam a água bruta inadequada para o consumo humano em água potável, e, do processo de tratamento aplicado, gera-se o resíduo sólido denominado lodo de estação de tratamento de água.

O lodo de estação de tratamento de água é classificado pela NBR 10004:2004 (11) como um resíduo sólido não inerte (15).

O lodo de estação de tratamento de água é um resíduo composto de água e sólidos suspensos contidos na fonte, acrescido dos produtos aplicados durante o processo de tratamento da água (16).

Na composição do lodo destacam-se os hidróxidos de alumínio e, em alguns casos, polímeros condicionantes provenientes dos produtos químicos utilizados nos processos de tratamento da água (17).

#### 3.3.1 A origem do lodo em estações de tratamento de água

Dentre as tecnologias utilizadas nas estações de tratamento de água, o tratamento convencional ou completo é o mais utilizado no Brasil. O tratamento convencional é composto das etapas de coagulação química, floculação, decantação e filtração das partículas presentes na água bruta para a clarificação da água, e da etapa final de desinfecção da água para completar o processo. Para que este tratamento seja bem sucedido, é necessária a aplicação de produtos químicos, tais como sais de ferro ou sais de alumínio, os quais, através de suas cargas, são capazes de provocar a desestabilização das partículas presentes na água bruta (18).

Dependendo da natureza físico-química da água bruta, da eficiência hidráulica das unidades de processo e do tipo e da dosagem do coagulante

aplicado; entre 60 a 95% da quantidade total de lodo gerado na estação de tratamento de água convencional é acumulado nos decantadores, e, o restante, nos filtros (19).

### 3.3.2 Características gerais de lodos de estações de tratamento de água

As características do lodo de estação de tratamento de água podem variar com o tipo de coagulante, com os auxiliares utilizados no processo de tratamento da água e com a própria qualidade da água bruta que varia sazonalmente (20).

Para Saron e Leite (21), as propriedades e características do lodo de ETA também podem variar em função da tecnologia usada no tratamento da água.

A água presente nos lodos de estações de tratamento de água pode ser classificada em quatro categorias:

- Água livre – parcela de água que se move livremente por gravidade e que pode ser removida com relativa facilidade por meio de sistemas mecânicos ou, naturalmente, por drenabilidade e evaporação. É importante lembrar que o tempo de remoção dessa água é o fator decisivo para a definição da forma de remoção a ser adotada.
- Água de floco – essa parcela está intimamente ligada à partícula floculada. Portanto, para a sua remoção, é necessária uma quantidade relativa de energia.
- Água capilar – a água capilar está fortemente ligada à partícula sólida por intermédio de pontes de hidrogênio. A diferença entre a água capilar e a água de floco é que a água de floco está livre para se mover, enquanto a água capilar se move com a partícula. Assim, para a sua remoção, há a necessidade de aplicação de força mecânica, se o floco estiver quebrado.
- Água adsorvida – parcela ligada quimicamente à partícula sólida coloidal. A remoção dessa água somente é possível com a aplicação de alta temperatura ou com aplicação de elevada quantidade de energia elétrica (22).

As partículas presentes na água a ser tratada são colóides que lhe conferem cor e turbidez. Os colóides têm tamanho que varia de nanômetro a milímetro, característica que dificulta a remoção da água livre dos lodos (02).

A concentração de sólidos totais presentes em um lodo de estação de tratamento de água varia de 1.000 a 40.000 mg/L (0,1 a 4%). Aproximadamente, 75 a 90% dos sólidos totais são sólidos suspensos, entre 20 a 35% são compostos voláteis e existe uma pequena porção biodegradável prontamente oxidável (16).

Na Tabela 01, desenvolvida por Richter (16), observa-se que a massa específica do lodo de estação de tratamento de água varia de acordo com as concentrações de sólidos presentes, oscilando de 1.002 kg/m$^3$ para lodos com teores de sólidos de 1% até 1.236 kg/m$^3$ para lodos com teores de sólidos de 30%, após o processo de desidratação.

Tabela 01 – Densidade do lodo de estação de tratamento de água em relação à concentração de sólidos.

| **Concentração de Sólidos (%)** | **Variação da densidade (kg/m$^3$)** |
|---|---|
| 1 | 1.002 – 1.006 |
| 3 | 1.007 – 1.019 |
| 6 | 1.014 – 1.040 |
| 10 | 1.024 – 1.068 |
| 15 | 1.036 – 1.106 |
| 20 | 1.048 – 1.146 |
| 25 | 1.061 – 1.189 |
| 30 | 1.074 – 1.236 |

Fonte: Richter (16).

Cordeiro (02), ao comparar as características físico-químicas dos lodos das estações de tratamento de água de São Carlos, de Araraquara e de Rio Claro, (Tabela 02), destaca o sistema de remoção dos lodos dos decantadores e flotadores como o responsável pelas características finais do lodo, principalmente no que se refere à concentração de partículas.

Enquanto, na Estação de Tratamento de Água (ETA) de Araraquara, o lodo é removido até três vezes ao dia, nas ETAs de São Carlos e de Rio Claro a remoção é realizada em intervalos de tempo de até três meses, dependendo da qualidade da água bruta que varia durante o ano, por exemplo, pela ação de intempérie. As concentrações de metais são mais elevadas em São Carlos e Rio Claro, evidenciando o prejuízo que o acúmulo de lodos nos tanques de decantação pode acarretar quando descartados (02).

Tabela 02 – Propriedades e características físico-químicas dos lodos das estações de tratamento de água de Araraquara, Rio Claro e São Carlos.

| **Propriedades e características físico-químicas** | **Lodos da Estação de Tratamento de Água** | | |
|---|---|---|---|
| | **Araraquara** | **Rio Claro** | **São Carlos** |
| Concentração de sólido em % | 0,14 | 5,49 | 4,68 |
| pH | 8,93 | 7,35 | 7,2 |
| Cor (uC) | 10.650 | - | - |
| Turbidez (uT) | 924 | - | - |
| DQO (mg/L) | 140 | 5.450 | 4.800 |
| Sólidos Totais (mg/L) | 1.620 | 57.400 | 58.630 |
| Sólidos Suspensos (mg/L) | 775 | 15.330 | 26.520 |
| Sólidos Dissolvidos (mg/L) | 845 | 42.070 | 32.110 |
| Alumínio (mg/L) | 2,16 | 30 | 11.100 |
| Zinco (mg/L) | 0,10 | 48,53 | 4,25 |
| Chumbo (mg/L) | 0,00 | 1,06 | 1,60 |
| Cádmio (mg/L) | 0,00 | 0,27 | 0,02 |
| Níquel (mg/L) | 0,00 | 1,16 | 1,80 |
| Ferro (mg/L) | 2,14 | 4.200 | 5.000 |
| Manganês (mg/L) | 3,33 | 30 | 60,00 |
| Cobre (mg/L) | 1,70 | 0,91 | 2,06 |
| Cromo (mg/L) | 0,19 | 0,86 | 1,58 |

Fonte: Cordeiro (02).

As substâncias químicas freqüentemente usadas no tratamento da água são: sulfato de alumínio ($Al_2(SO_4)_3.18H_2O$), cloreto férrico ($FeCl_3.6H_2O$), cloreto ferroso ($FeCl_2.4H_2O$) e sulfato férrico ($FeSO_4.7H_2O$) (23). A adição destas substâncias químicas durante o tratamento da água pode resultar em um lodo rico em ferro ou alumínio. Estas concentrações de sais podem ser altas o bastante para serem tóxicas para a biota aquática, se elas não forem tratadas antes de serem depostas. Os lodos de estações de tratamento de água também podem conter outros metais pesados provenientes da água bruta ou de contaminantes da adição dos coagulantes (24).

### 3.3.3 Alternativas de disposição final para o lodo de estação de tratamento de água e o impacto ambiental causado pela disposição irregular

A disposição final do lodo de estação de tratamento de água é uma das tarefas mais difíceis no tratamento de água, pois envolve transporte e restrições do meio ambiente. Entre as alternativas de disposição final mais utilizadas estão o lançamento em corpos d'água, o lançamento direto na rede de esgoto sanitário e a aplicação no solo e em aterro sanitário (16).

A disposição irregular do lodo de estação de tratamento de água em corpos d'água pode provocar diversas alterações prejudiciais ao meio ambiente, entre elas a redução do oxigênio dissolvido no corpo d'água receptor pela decomposição da matéria orgânica contida no resíduo, o aumento da concentração de metais, como o alumínio, o ferro e o manganês, e a conseqüente destruição da fauna e flora (25).

O alumínio é o terceiro elemento mais abundante da crosta terrestre, sendo precedido apenas pelo silício e pelo oxigênio (26). No homem, sua toxidade está reconhecidamente associada a várias complicações clínicas, destacando-se disfunções neurológicas como o mal de Alzheimer (27) e a mobilização do fosfato ósseo (28).

O lançamento do lodo de estação de tratamento de água em corpos d'água pode ser uma alternativa de disposição final viável caso o corpo d'água possua

capacidade de absorção da carga lançada ou o mesmo não seja destinado ao abastecimento público (29).

O lançamento direto do lodo de estação de tratamento de água na rede de esgoto sanitário pode ser considerado uma das alternativas mais baratas de disposição final para este resíduo (20). Entretanto, de acordo com Richter (16), esta alternativa apenas transfere o problema do tratamento e disposição do lodo de estação de tratamento de água para a estação de tratamento de esgoto.

A aplicação do lodo de estação de tratamento de água no solo pode trazer benefícios, tais como a melhoria estrutural do solo, a adição de traços minerais, o ajuste do pH, o aumento da capacidade de retenção de água e a melhoria das condições de aeração. No entanto, a aplicação sem controle pode levar hidróxidos de alumínio e ferro presentes no lodo a reagirem e a indisponibilizarem o fósforo no solo ou, até mesmo, causar a toxidade do alumínio com pH superior a 6,5, o carregamento do nitrato do solo e a contaminação da água subterrânea (30).

A disposição do lodo de estação de tratamento de água em aterro sanitário consiste em uma colocação controlada do lodo em células previamente impermeabilizadas e cobertas com terra. Este lançamento pode ser realizado em aterro exclusivo ou municipal de resíduos urbanos. Neste último caso, o lodo deve estar desidratado (16).

Silva, Bidone e Marques (17), afirmam que no Brasil o aterro sanitário pode ser uma alternativa viável para a disposição final dos lodos de estações de tratamento de água, principalmente em cidades de pequeno e médio porte, com disponibilidade de áreas economicamente acessíveis. Entretanto, Reali (20), não acredita nesta alternativa como meio de disposição, devido ao alto custo de implantação e as restrições quanto a umidade máxima para o recebimento do lodo.

De acordo com Cordeiro (29), para a escolha da melhor disposição final, devem ser avaliados e considerados alguns aspectos, tais como: a quantidade e a característica do lodo e o custo das possíveis alternativas.

### 3.3.4 A quantidade de lodo gerada em uma estação de tratamento de água convencional

A concentração de sólidos que entram no decantador pode ser relacionada à turbidez da água bruta, sendo multiplicada por um valor que pode variar de 1,5 a 2,2. Dessa forma, a concentração de partículas que entram no decantador pode ser determinada pela Equação 01,

$$C_e = 1,5.T \quad (01)$$

onde:

$C_e$ = concentração de partículas que entram no decantador;

T = turbidez da água bruta (31).

Caso seja utilizado sulfato de alumínio como coagulante, aproximadamente 44% da dosagem utilizada estabilizam-se na forma de sólido. Portanto, o balanço da produção de sólidos em decantadores é melhor representada pela Equação 02,

$$W = 0,0864.Q.(0,44.D + 1,5.T + A) \quad (02)$$

onde:

W = quantidade de lodo produzida por dia (kg/d);

Q = vazão de adução de água (L/s);

D = dosagem de sulfato de alumínio (mg/L);

T = turbidez da água bruta (uT);

A = dosagem de “auxiliares” ou outros produtos adicionados (mg/L) (31).

Uma estação de tratamento de água convencional, com capacidade de tratar 2.400 L/s, produz aproximadamente 1,8 ton/d de lodo. No Brasil, a quantidade de lodo produzido em estações de tratamento de água não é comumente mensurada devido ao não-gerenciamento dos resíduos produzidos (32).

### 3.3.5 Alternativas de tratamento e reciclagem para o lodo de estação de tratamento de água

Entre os métodos comumente utilizados para melhorar as condições dos lodos de estações de tratamento de água antes de sua disposição final, destacam-se a desidratação natural em lagoas e leitos de secagem, e o adensamento mecânico em centrífugas, concentradores por gravidade de dupla célula, filtros a vácuo, filtros-prensa de placas ou de esteiras, e leitos de secagem à vácuo (33).

O Al (III) presente no lodo de estação de tratamento de água pode ser recuperado por acidificação. Esta alternativa apresenta a vantagem de tornar o lodo mais concentrado e facilitar a sua posterior desidratação. Entretanto, O Al (III) recuperado por acidificação pode ser utilizado para a remoção do fósforo no tratamento de efluentes domésticos, mas não deve ser reutilizado como um coagulante em estações de tratamento de água, pois, em condições extremamente ácidas, a matéria orgânica coloidal e alguns metais pesados, como o cádmio, o cobre e o chumbo, são recuperados juntos, o que aumenta a formação de trihalometanos na água tratada. Para a recuperação do Al (III) sem a presença conjunta de matéria orgânica, metais pesados ou manganês, deve ser utilizado um sistema de membranas seletivas trocadoras de íons (34).

Em um típico sistema primário de tratamento de esgoto, a eficiência na remoção dos sólidos suspensos e na demanda química de oxigênio é de aproximadamente 50% e 30%, respectivamente (35). Cada melhora química no tratamento primário do esgoto impõe um alto custo operacional decorrente do uso de coagulantes e do tratamento e disposição de uma elevada quantia de lodo químico (36). O hidróxido de alumínio presente no lodo de estação de tratamento de água é insolúvel e pode ser utilizado como coagulante no tratamento primário de esgoto. Esta utilização pode melhorar a eficiência do tratamento primário de esgoto e racionalizar o tratamento de água relacionado aos trabalhos de disposição final do lodo (37).

Os pesticidas, desinfetantes e fertilizantes são as principais fontes de arsênio (As) no solo (38). O arsenato de sódio é um pesticida que foi intensivamente usado no passado em solos agrícolas, elevando a concentração de arsênio no solo além dos níveis padrões. O risco do contato humano com o arsênio do solo tem

aumentado grandemente nas últimas duas décadas como um resultado da expansão das áreas residenciais sobre áreas anteriormente agrícolas (39). A absorção do arsênio no solo é primeiramente controlada pelos hidróxidos de ferro e alumínio. Portanto, os resíduos de estações de tratamento de água, que apresentam altas concentrações de hidróxidos de ferro e alumínio, podem ser substitutos efetivos e de baixo custo para os hidróxidos naturais de ferro e alumínio no tratamento de solos degradados pelo uso intensivo de pesticidas e fertilizantes (40).

No Japão, as cinzas da incineração do lodo de estação de tratamento de água são utilizadas na fabricação de artefatos de concreto e tijolos, bem como no condicionamento de solos. Esta alternativa precisa de um teor maior de sólidos obtido por processos mecânicos e acondicionamento e, geralmente, não é viável em termos de custos. (41).

O lodo da Estação de Tratamento de Água do Rio das Velhas pode ser utilizado para a fabricação de solo-cimento, materiais cerâmicos e pigmentos para argamassas, pois ele se enquadra na categoria dos siltes e das argilas e apresenta características de materiais plásticos com pesos específicos entre 27 e 28 $kN/m^3$, valores altos de umidade ótima e peso específico aparente seco de 1,33 $g/cm^3$ para o Ensaio de Compactação Proctor Normal (42).

Morita et al (43) constatou a possibilidade de aplicação de até 12,5% do lodo da Estação de Tratamento de Água de Cubatão / SP na produção de blocos cerâmicos de paredes retas fabricados em indústria localizada no município de Tatuí / SP.

A adição de lodo de estação de tratamento de água na massa cerâmica piora suas propriedades tecnológicas. Entretanto, estas propriedades podem ser mantidas dentro de limites aceitáveis para a produção de tijolos, telhas e blocos cerâmicos, dependendo da temperatura de queima e da concentração da mistura. O lodo das estações de tratamento de água que utilizam coagulante a base de alumínio é mais prejudicial para as propriedades cerâmicas do que o lodo das estações de tratamento de água que utilizam coagulante a base de ferro (44).

O lodo de estação de tratamento de água pode ser utilizado para o retardo de pega e o aumento da trabalhabilidade de argamassas plásticas. O efeito retardador de pega está associado à presença dos íons de sódio. O mesmo retardo de pega, que é conseguido em argamassa preparada com relação cimento:areia:água de 1:4:1 em massa quando se usa fosfato de sódio ou cálcio

enriquecido com bentonita, pode ser obtido usando entre 0,25-0,50% em massa do resíduo. A trabalhabilidade pode ser aumentada; entretanto, tende a ser pior do que a trabalhabilidade observada quando se usa o fosfato de sódio enriquecido com bentonita (45).

Dependendo das propriedades requeridas para determinada aplicação de um concreto, o mesmo pode ser produzido com vantagem técnica, econômica e ecológica com a utilização conjunta de lodo de estação de tratamento de água e resíduo de concreto endurecido. Um concreto produzido com substituição total do agregado graúdo natural pelo resíduo de concreto endurecido, e com a substituição em massa de 3% da areia quartzosa pelo lodo de estação de tratamento de água, obteve resistência à compressão axial 14,3% maior do que a resistência do concreto convencional de mesma consistência (40 ± 10 mm) e relação em massa de cimento:areia:pedra britada de 1: 4,60:5,96 (46).

### 3.4 Resíduos de madeira

As indústrias de base florestal geram grande quantidade de resíduo desde a exploração florestal até a manufatura de seus produtos finais. Aproximadamente 50 % do volume original das toras tornam-se resíduos. Os resíduos de madeira quando dispostos e misturados com outros resíduos são facilmente contaminados e dificilmente reciclados (47).

Além da necessidade de utilização de áreas para o armazenamento que poderiam ser utilizadas para outros fins e o desperdício de matéria prima que entra na indústria, a disponibilização dos resíduos de madeira sem uma destinação adequada gera graves problemas ambientais, como o assoreamento, a poluição de rios e a poluição do ar devido à queima para a eliminação dos mesmos (48).

De acordo com Cline (49), cada resíduo de madeira pode ser reciclado de forma específica em função das propriedades e características da madeira de origem e da forma e da origem do resíduo dentro do processo produtivo industrial.

### 3.4.1 Propriedades e características da madeira

A massa volúmica e a porosidade são consideradas propriedades físicas de grande relevância na caracterização da madeira, principalmente quando esta se destina à produção de pasta e papel. A massa volúmica é por muitos considerada a mais importante de todas as propriedades da madeira e, por ser determinada de forma rápida e expedita e refletir as características globais da madeira, é freqüentemente utilizada como índice de qualidade (50).

A massa volúmica de um material é definida como a quantidade de matéria correspondente a um dado volume. No caso da madeira, que é um material bastante higroscópico, a massa volúmica é dependente do grau de umidade da amostra, o que origina problemas na sua determinação. Apesar de, na literatura, se encontrarem variadas maneiras de expressar a massa volúmica da madeira, as mais utilizadas são:

- massa volúmica básica, definida como a relação entre a massa seca, isto é, com um teor de umidade de 0%, e o volume de madeira saturada em água;
- massa volúmica aparente, definida como a relação entre a massa e o volume determinados nas mesmas condições de umidade. Usualmente considera-se a massa volúmica normal ou de referência aquela a que se refere ao teor em umidade de 12%;
- massa volúmica anidra ou massa volúmica a 0%, definida como a relação entre a massa e o volume obtidos para uma umidade de 0%, ou seja, determinados após secagem da amostra em estufa a 103 ± 2ºC (51).

Em todas estas definições, os volumes normalmente medidos contabilizam os poros da madeira. Portanto, dificuldades práticas associadas à determinação do verdadeiro volume da madeira, volume ocupado apenas pela matéria lenhosa, quer seja seca ou tenha um dado teor de umidade, fazem com que a massa volúmica básica seja a mais correntemente utilizada (51).

Uma alternativa ao estudo da estrutura global da madeira consiste na determinação da sua porosidade, expressa pela razão entre o volume de espaços vazios e o volume total ocupado pela madeira. Na madeira, os espaços vazios

incluem os lúmenes de vasos e fibras e os poros existentes na parede das células (52).

Do ponto de vista papeleiro, a porosidade assume uma importância maior pelo fato da mesma estar diretamente relacionada com a penetração do licor de cozimento nas estilhas durante o processo de deslenhificação (53).

O picnômetro de gás determina o volume verdadeiro de um sólido, mesmo que poroso, por variação da pressão de gás numa câmara de volume conhecido. Normalmente utiliza-se o hélio, porque este gás, além de inerte, penetra facilmente nos poros acessíveis da amostra, devido ao pequeno tamanho dos seus átomos (54).

O picnômetro de hélio é constituído por duas câmaras de volumes conhecidos (por calibração prévia): a câmara onde se coloca a amostra e a câmara de expansão, ligadas por uma válvula (válvula de expansão). Antes de iniciar a análise propriamente dita, a amostra colocada na respectiva câmara é sujeita a um processo de desgaseificação que consiste em repetidas purgas com hélio para remoção de impurezas e umidade que eventualmente possa conter. Sempre que se pretende analisar amostras saturadas ou com um dado teor de umidade, estas não são sujeitas a purgas. Depois de levado todo o sistema à pressão atmosférica, isola-se a câmara de expansão, fechando a válvula de expansão e pressuriza-se a câmara que contém a amostra até uma pressão P1 (cerca de 17 psia). Seguidamente, a válvula de expansão é aberta e, em conseqüência, ocorre um abaixamento de pressão para P2. Admitindo comportamento ideal do hélio, o volume do sólido pode ser calculado a partir da Equação 03,

$$Vs = Va - [Ve/(P1/P2 - 1)] \qquad (03)$$

onde:

P1 = pressão de 17 psia;

P2 = pressão final, após a abertura da válvula de expansão;

Va = volume da câmara da amostra;

Ve = volume da câmara de expansão;

Vs = volume do sólido (55).

A massa volúmica é automaticamente calculada pelo aparelho, através da relação entre a massa da amostra, introduzida como dado de entrada, e o volume do sólido derivado da Equação 03 (55).

A principal vantagem deste método reside na sua capacidade para medir apenas o volume da substância lenhosa, ou seja, descontar ao volume total da amostra todos os poros, a menos que estes estejam fechados ou inacessíveis ao gás. Por outro lado, permite, ainda, em princípio, medir volumes de sólidos com qualquer teor de umidade. Como desvantagem, aponta-se o fato de as dimensões da amostra serem limitadas pelo reduzido tamanho da porta-amostra, cuja capacidade máxima é de 10 $cm^3$ (55).

A utilização da intrusão de mercúrio para obter informação sobre a estrutura porosa dos materiais, nomeadamente a distribuição de tamanhos de poros, a área de superfície, a massa volúmica e a porosidade, remonta aos anos vinte do século XX e foi da autoria de Washburn (54).

Para a maioria dos materiais, o ângulo de contacto entre o mercúrio e o sólido é maior que 90º. Portanto, o mercúrio não molha o sólido e é necessário aplicar uma pressão para forçar o mercúrio a entrar nos poros. Em condições de equilíbrio, a força aplicada é igual à força devida à tensão superficial do mercúrio, que tende a manter o mercúrio fora do poro, conforme apresentado na Equação 04,

$$\pi.r_p^2.P=-2.\pi.r_p.\gamma.\cos\theta \qquad (04)$$

que se reduz a Equação 05,

$$r_p = -2.\gamma.\cos\theta / P \qquad (05)$$

onde:

$r_p$ = raio do poro;

$\gamma$ = tensão superficial do mercúrio

$\theta$ = ângulo de contato entre o mercúrio e o sólido;

P = pressão aplicada para forçar o mercúrio a entrar nos poros (56).

Conhecendo o ângulo de contacto entre o mercúrio e o material (137$^{o}$ para a celulose) (57), bem como a sua tensão superficial (520 dyn/cm) (57), o diâmetro do poro pode ser determinado através da Equação 06:

$$D = 220/P \quad (06)$$

onde:

D = diâmetro do poro (μm);

P = pressão aplicada para forçar o mercúrio a entrar nos poros (psia) (56).

Esta equação mostra que, com o aumento da pressão, o mercúrio é intrudido em poros sucessivamente mais pequenos. Na prática, para cada valor de pressão, é registrado o volume de mercúrio intrudido. Da curva resultante do volume cumulativo de mercúrio para sucessivos aumentos de pressão (curva de intrusão) pode-se extrair valiosa informação sobre o material em estudo, designadamente sobre o tamanho e distribuição dos poros (56).

A densidade básica é definida como a razão entre a massa e o volume da amostra incluindo o volume dos seus poros abertos. A densidade aparente é definida como a razão entre a massa e o volume da amostra desconsiderando o volume de seus poros abertos. Desta forma, a porosidade é determinada através da Equação 07,

$$Pr = (1 – \rho/\rho a).100 \quad (7)$$

onde:

Pr = porosidade (%);

ρ = densidade básica (g/mL);

$\rho_a$ = densidade aparente (g/mL) (56).

Além da massa volúmica, entre os índices de qualidade da madeira destacam-se os ligados à estrutura anatômica da mesma, como por exemplo, o comprimento, o lúmen, o diâmetro e a espessura das paredes das fibras, pois estes estão associados às suas propriedades tecnológicas (58).

### 3.4.2 A madeira *Pinnus elliotti*

Do ponto de vista anatômico e químico, ocorrem diversas alterações na madeira nos diferentes períodos de vida da árvore, e as variações estruturais características de cada período de vida conduzem a diferentes propriedades de utilização.

Existem diversas controvérsias nas definições de madeira juvenil e adulta; entretanto, entre as definições existentes, as mais aceitas são as definidas por Rendle (58) que definiu a madeira juvenil e a madeira adulta em:

- Madeira juvenil é o xilema secundário formado durante os estágios iniciais da vida da parte considerada da árvore, durante o período chamado juvenilidade. Este período varia conforme a espécie e pode ser afetado pelas condições ambientais. A madeira caracteriza-se anatomicamente por um progressivo acréscimo nas dimensões das células e correspondentes alterações na sua forma, estrutura e disposição em sucessivos anéis de crescimento.
- Madeira adulta é o xilema formado após o período de juvenilidade, na parte da árvore que está sendo considerada. Em geral, as células desta madeira alcançaram suas dimensões máximas, que se mantêm mais ou menos constantes exceto quando são influenciadas drasticamente pelas condições ambientais.

Foelkel et al. (59) estudaram as diferenças existentes entre a madeira juvenil e adulta de *Pinnus elliotti*. Determinaram a massa volúmica básica e, através de análise microscópica, determinaram o comprimento, a largura, o diâmetro do lúmen e a espessura da parede celular das fibras das madeiras, calculando, a seguir, as seguintes relações existentes entre as dimensões fundamentais, as quais são consideradas importantes parâmetros na avaliação da qualidade de uma madeira para celulose: índice de enfeltramento, índice de Runkel, fração parede e coeficiente de flexibilidade. A Tabela 03 contém os valores da densidade básica das madeiras *Pinnus elliotti* juvenil e adulta, a Tabela 04 contém as dimensões médias das fibras e a Tabela 05 as relações entre as suas dimensões fundamentais. Neste estudo, a

idade de maturação da madeira foi considerada de 8 anos, visto que Foelkel et al (60), em 1975, preconizaram que isso ocorreria entre o sétimo e o nono ano.

Tabela 03 – Densidade básica das madeiras *Pinnus elliotti* juvenil e adulta.

| **Madeira *Pinnus elliotti*** | **Densidade básica (g/cm$^3$)** |
|---|---|
| Juvenil | 0,412 |
| Adulta | 0,545 |

Fonte: Foelkel et al (59).

Tabela 04 – Dimensões médias das fibras de madeira *Pinnus elliotti* juvenil e adulta.

| **Dimensões** | **Madeira *Pinnus elliotti*** | |
|---|---|---|
| | **Juvenil** | **Adulta** |
| Comprimento da fibra (mm) | 3,49 | 3,75 |
| Largura da fibra (µm) | 42,84 | 38,40 |
| Diâmetro do lúmen (µm) | 28,72 | 22,08 |
| Espessura da parede celular (µm) | 7,06 | 8,16 |

Fonte: Foelkel et al (59).

Foelkel et al (60) definiram as relações existentes entre as dimensões fundamentais das fibras de madeira como:

- Índice de enfeltramento: relação entre o comprimento e a largura da fibra.
- Coeficiente de flexibilidade: relação percentual entre o diâmetro do lúmen e a largura da fibra.
- Fração parede: relação percentual entre a espessura da parede celular e o raio da fibra.
- Índice de Runkel: relação entre duas vezes a espessura da parede celular e o diâmetro do lúmen.

Tabela 05 – Relações entre as dimensões fundamentais das fibras da madeira *Pinnus elliotti* juvenil e adulta.

| Relação entre as dimensões fundamentais | Madeira *Pinnus elliotti* | |
|---|---|---|
| | **Juvenil** | **Adulta** |
| Índice de enfeltramento | 82 | 98 |
| Índice de Runkel | 0,492 | 0,739 |
| Fração parede (%) | 33 | 43 |
| Coeficiente de flexibilidade (%) | 67 | 58 |

Fonte: Foelkel et al (59).

Com base nos resultados obtidos, Foelkel et al (59) concluíram que:

- A madeira juvenil de *Pinus elliottii* caracteriza-se por apresentar densidade básica, comprimento de fibra e espessura da parede celular inferiores à da madeira adulta; entretanto, a largura das suas fibras é maior.
- As fibras da madeira adulta possuem índices de enfeltramento e de Runkel, e fração parede maiores que as de madeira juvenil, e coeficiente de flexibilidade menor. Estas características sugerem uma maior flexibilidade das fibras de madeira juvenil, permitindo assim uma melhoria nas propriedades que dependem da interligação das fibras, acompanhada de um acréscimo da resistência ao rasgo.

### 3.4.3 Classificação dos resíduos de madeira

Segundo Fontes (61), o extinto Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal e a Universidade Federal do Paraná classificaram os resíduos em três tipos distintos em função da forma e da origem do resíduo dentro do processo produtivo industrial:

- Serragem é o resíduo de madeira originado da operação de serras, encontrado em todos os tipos de indústria, à exceção das laminadoras.

- Cepilho, também conhecido por maravalha, é resíduo de madeira gerado pelas plainas nas instalações de serraria/beneficiamento e beneficiadoras, indústrias que adquirem a madeira já transformada e a processam em componentes para móveis, esquadrias, pisos, forros, etc.
- Lenha é o resíduo de madeira de maiores dimensões, gerado em todos os tipos de indústria, composto por costaneiras, aparas, refilos, resíduos de topo de tora, e restos de lâminas.

### 3.4.4 Alternativas de reciclagem para os resíduos de madeira

Em função das propriedades e características da madeira e da forma e da origem do resíduo dentro do processo produtivo industrial, existem diversas alternativas de reciclagem para os resíduos de madeira, além da produção de chapas de partículas aglomeradas.

Os resíduos de madeira podem ser utilizados na produção de combustíveis biológicos para a substituição dos combustíveis fósseis. Entretanto, de acordo com Wihersaari (62), o armazenamento em grande quantidade desses resíduos, na forma de microplaquetas, pode produzir a emissão de gases de efeito estufa em grande quantidade.

Também como fonte de energia, os resíduos de madeira podem ser utilizados na produção de pelotas de madeira para aplicação, por exemplo, como combustíveis de caldeiras e fogões domésticos. Para serem produzidos, estes materiais são primeiramente colocados juntos em processos de secagem sob elevadas temperaturas para reduzir o conteúdo da mistura a aproximadamente 4% e, a seguir, são pressionados em pratos de peneiras a elevadas pressões (63).

A utilização de resíduos de madeira, tais como maravalha e serragem, para compostagem de dejetos suínos, apresenta-se como uma boa alternativa para a redução do impacto ambiental causado pela atividade dos sistemas de produção de animais confinados. Entre as vantagens do processo destacam-se a redução do volume e do peso do dejeto, a redução de material estável com valor agronômico sem geração de odores desagradáveis, e a possibilidade de redução de microorganismos patogênicos (64).

A serragem de madeira também pode ser utilizada como material filtrante no tratamento de águas residuárias (65) e a serragem de madeira modificada com hidróxido de sódio é recomendada para a absorção de íons de metais pesados presentes na água (66).

Atualmente, os resíduos de madeira estão sendo bastante utilizados na produção do compósito plástico-madeira, definidos por Koenig e Sypkens (67), de uma forma bastante simples, como uma mistura de pó de madeira com algum tipo de resina plástica. Os compósitos plástico-madeira ou WPC (wood plastic composites) começaram a ser produzidos na Europa e estão sendo fabricados nos Estados Unidos há décadas. Entretanto, o maior crescimento vem ocorrendo a partir da última década (68), devido às vantagens conseguidas para estes produtos em relação à madeira, tais como: não rachar, não empenar e exigir pouca ou nenhuma manutenção (69).

O processamento de compósitos plástico-madeira envolve a extrusão dos componentes a uma determinada temperatura de fusão seguida por uma operação de injeção para dar a forma aos objetos (70). O plástico é o material usado para melhorar as características, como a resistência à umidade e ao ataque de insetos e fungos (71). Entretanto, de acordo com English (72), numa temperatura onde muitos plásticos são processados, a madeira irá se degradar. Por isso, as formulações dos compósitos plástico-madeira ficam restritas a determinados tipos de plásticos que possuem temperatura de processamento relativamente baixa, como o polietileno e o polipropileno. Além disso, esses polímeros apresentam baixo custo e têm boas propriedades mecânicas para peças não estruturais.

Outra importante alternativa de reciclagem é a utilização dos resíduos de madeira na produção do compósito biomassa vegetal-cimento. Os compósitos à base de biomassa vegetal tem grandes possibilidades de utilização, considerando-se sua versatilidade e seu baixo custo. As utilizações mais comuns são na fabricação de painéis anti-ruído, revestimentos, forros, vedação de equipamentos industriais, pisos e blocos não estruturais.

De acordo com Beraldo (73), as características do compósito biomassa vegetal-cimento dependem fortemente da biomassa vegetal empregada. A forma geométrica das partículas, seu grau de absorção de umidade e, principalmente, a composição química da madeira influenciam notavelmente o resultado final obtido.

Além da grande disponibilidade de matéria prima e da baixa massa específica, os compósitos biomassa vegetal-cimento apresentam como vantagens o fato de serem bons isolantes termo-acústicos, apresentarem baixa permeabilidade quando comparados com a madeira e as placas de compensados, poderem ser furados, serrados, receberem parafusos e possuírem relação tração/compressão entre 1/2 e 1/4 apesar de apresentarem resistência à compressão inferior a de outros concretos leves (73).

De acordo com Pimienta et al (74), as principais desvantagens dos compósitos biomassa vegetal-cimento são:

- Incompatibilidade química entre a biomassa vegetal e o cimento. A constituição química da biomassa, com a presença de açúcares, resinas, fenóis e amido, pode afetar de forma adversa a hidratação do cimento.
- Instabilidade dimensional. Medidas feitas em corpos-de-prova de concreto com madeira, apresentaram variação dimensional máxima, entre os estados seco em estufa e saturado, da ordem de 5 mm/m, enquanto que outros concretos leves apresentaram variação da ordem de 0,45 mm/m.
- Tempo de início de pega muito longo, diminuindo a produtividade no canteiro de obra.
- Durabilidade reduzida da biomassa vegetal na matriz. As partículas vegetais ao longo do tempo, sob o efeito do meio alcalino, se desintegram, gerando espaços vazios e, conseqüentemente, diminuindo a resistência mecânica do material.

É possível minimizar ou mesmo evitar os efeitos da incompatibilidade química, através de tratamentos físico-químicos aplicados sobre as partículas vegetais como, por exemplo, a lavagem das partículas em água quente e a utilização de aceleradores de pega (cloreto de cálcio, sulfato de alumínio e silicato de sódio). Pode-se também utilizar impermeabilizantes como, por exemplo, Neutrol, para criar sobre as partículas de madeira uma camada impermeável, que impeça a água de solubilizar os extrativos da madeira, os quais são nocivos à hidratação do cimento (74).

De acordo com Bederina et al. (75), as maravalhas são resíduos de madeira produzidos por atividades de marcenaria, com forma irregular e distribuição granulométrica variando entre 0,1 mm e 8 mm, e estas podem ser incorporadas, sem

qualquer tratamento preliminar na produção de concreto areia madeira. A inclusão da maravalha no concreto, além de reduzir a densidade do material, melhora a sua condutividade térmica, enquanto a estrutura do material permanece homogênea e com forte aderência da madeira ao concreto matriz.

## 3.5 Agregados para concreto

Agregado é um material particulado, incoesivo e de atividade química praticamente nula, cujas partículas cobrem extensa gama de tamanhos. O termo “agregado” é usado na tecnologia do concreto pois, em outros ramos da construção, o mesmo é conhecido, para cada caso, pelo seu nome específico, tal como, filer, pedra britada, bica-corrida, rachão, entre outros (76).

### 3.5.1 Classificação dos agregados

De acordo com Albuquerque (76), os agregados podem ser classificados segundo a origem, as dimensões das partículas e o seu peso específico aparente. Segundo a origem, os agregados classificam-se como naturais e industrializados. Segundo as dimensões das partículas, os agregados usados na tecnologia do concreto são divididos em agregados miúdos e agregados graúdos. E, conforme o peso específico aparente, os agregados são classificados em leves, médios e pesados.

A NBR 7211:1983 (77) define agregado miúdo como o agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha quadrada de 4,8 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 0,075 mm. Esta mesma norma define agregado graúdo como o agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha quadrada de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha 4,8 mm.

A maioria dos agregados naturais, tais como areia e pedregulho têm massa unitária entre 1.520 e 1.680 kg/m$^3$ e produzem concretos normais com massa específica aproximadamente de 2400 kg/m$^3$. Para fins especiais, agregados mais

leves ou mais pesados podem ser usados para produzirem, respectivamente, concretos leves e pesados. Geralmente, os agregados com massa unitária menor do que 1.120 kg/m$^3$ são chamados leves, e aqueles com mais de 2.080 kg/m$^3$ são designados pesados (78).

### 3.5.2 Agregado leve

Os agregados leves são largamente classificados em dois grupos: a) natural (pedra pomes, diatomita, escória vulcânica, etc); b) artificial (perlita, xisto expandido, argila expandida, ardósia, etc) (79).

A diatomita é uma rocha de sedimento silicioso, que consiste principalmente de restos de esqueletos fossilizados de diatomáceas, planta unicelular aquática parente das algas. A diatomita é comumente encontrada em ambientes vulcânicos, como os depósitos em lagos de áreas vulcanicamente ativas. Há uma grande quantidade de depósitos de diatomáceas em Afyon, Turquia. Concretos com diatomita foram produzidos com cimento, água e agregados de diferentes escalas granulométricas. Na mistura, a relação água/cimento foi mantida em 0,15. As propriedades foram medidas e os resultados mostraram concretos com massa unitária variando entre 900 e 1.900 kg/m$^3$, resistência à compressão entre 2,5 e 8 MPa e condutividade térmica entre 0,23-0,32 W/m.K. Os melhores resultados de resistência e condutividade foram obtidos para os concretos produzidos com 30% de agregado fino, 40% de agregado médio e 30% de agregado graúdo (80).

A escória vulcânica é o equivalente basáltico das rochas vulcânicas e, por isso, ela é também chamada como lava basáltica. Apresenta textura vesicular que dá a ela alta porosidade e baixa densidade. Unidades de alvenaria de alta performance podem ser fabricadas com escória vulcânica, cimento e água. Blocos leves podem ser manufaturados com uma densidade variável de 600 - 1.300 kg/m$^3$ com uma redução média no peso de 30-40% comparado aos convencionais (81).

O agregado de perlita expandida pode ser usado como mistura no cimento ou como agregado no concreto. No concreto, o agregado de perlita expandida é usado no lugar do agregado fino em várias relações de substituição dependendo da resistência requerida. A perlita é mais facilmente triturada do que o clinker do

cimento Portland e, portanto, gasta-se menos energia na produção do cimento quando são usados o clinker e a perlita juntos. Entretanto, estes cimentos podem apresentar perdas de resistência nas primeiras idades do concreto. Geralmente a resistência destes concretos é melhorada por reações pozolânicas (82).

Argilas e folhelhos expandidos são agregados particularmente indicados para concretos isolantes-refratários. Quando preparados com cimentos aluminosos (cimentos de aluminato de cálcio), estes concretos apresentam propriedades isolantes excelentes, podendo suportar temperaturas entre 1000$^{o}$C e 1200$^{o}$C (83). Na Tabela 06 podem ser observadas as diferenças entre propriedades físicas da pedra britada de diâmetro máximo característico de 19 mm, e da argila expandida da empresa Cinasita com diâmetro máximo de 22 mm e mínimo de 15 mm.

Tabela 06 – Diferenças entre propriedades físicas da pedra britada e da argila expandida 2215 da empresa Cinasita.

| **Propriedades Físicas** | | **Agregados Graúdos** | |
|---|---|---|---|
| | | **Argila expandida** | **Pedra britada** |
| Densidade aparente (kg/dm$^3$) | | 0,43 | 1,35 |
| Densidade real (kg/dm$^3$) | | 0,71 | 3,38 |
| Absorção (%) | após 30 min | 7,5 | 1,3 |
| | após 60 min | 10 | 1,6 |

Fonte: Varella et al (84).

Os agregados leves usados na produção de concretos leves geralmente são materiais porosos cuja absorção de água é usualmente mais alta do que a absorção de água do agregado normal, fato que influencia a microestrutura da pasta de cimento endurecido e a zona de transição. A zona de transição tem sido considerada como a zona mais fraca no compósito concreto nos termos de resistência e nos termos de permeabilidade de fluídos. Um programa experimental foi desenvolvido para estudar o efeito da absorção de água do agregado leve sobre a distribuição do tamanho de poros na zona de transição. As propriedades dos agregados leves de argila expandida com absorção igual a 8,9%, 9,4% e 11% foram comparadas. Três concretos leves foram preparados com relação água / cimento igual a 0,4, 0,44 e

0,48. A porcentagem de área porosa e a distribuição do tamanho dos poros na pasta de cimento e na zona de transição do concreto curado aos 28 dias foi examinada usando um microscópio óptico de alta resolução e software de análise de imagem. Os resultados indicaram que: a) a porcentagem de área porosa na zona de transição é maior do que na pasta de cimento endurecido; b) o efeito da relação água/cimento do concreto sobre a porcentagem de área porosa foi insignificante; c) o agregado de maior absorção de água produz maior porcentagem de área porosa na zona de transição do concreto; d) agregados com absorção de água entre 8,9% e 11% apresentaram porcentagem de área porosa entre 14,4% e 21,7% (85).

De acordo com Varella et al (84), a principal desvantagem do uso de agregados leves de argila expandida para a produção de concreto leve é o custo do agregado no mercado, principalmente quando distante de São Paulo. Para se fazer uso deste material, a leveza que o mesmo proporciona deve compensar o preço do mesmo.

Outro material utilizado como agregado na produção de concreto leve é o poliestireno expandido. Resultados de testes compressivos têm confirmado a presença do efeito do tamanho da partícula de poliestireno expandido sobre a resistência compressiva deste concreto. Além disso, os resultados têm mostrado que o efeito do tamanho da partícula é mais pronunciado para concretos de baixa porosidade e torna-se negligente para concretos de alta porosidade (86).

A cinza de fundo de incinerador é uma mistura heterogênea de materiais cerâmicos tais como tijolo, pedra, vidro, metal ferroso e não ferroso e outros materiais inorgânicos não combustíveis, juntos com alguma matéria orgânica residual. As cinzas de fundo de incinerador com partículas de tamanho menores que 50 mm tem sido usadas como agregados na construção de estradas e também podem ser utilizadas na produção de concretos leves de densidade menor que 1.800 $kg/m^3$ e resistência à compressão aos 28 dias de 10 MPa (87).

Em muitos países, as indústrias de madeira geram uma grande quantidade de resíduos. O baixo custo, a proximidade das fontes e o potencial de poluição dos resíduos de madeira têm conduzido a estudos sobre o possível uso de aparas de madeira (wood chipping) (3 – 8 mm) como fibras em concreto. Este tipo de material possui várias aplicações potenciais, tais como isolação acústica e térmica e revestimento de resistência ao fogo. Um compósito concreto leve feito de aparas de madeira, cimento e água foi desenvolvido, e suas propriedades mecânicas e

durabilidade medidas quando exposto em ambientes seco e úmido. Os resultados mostram que há diminuição na resistência do concreto quando ele é exposto em ambiente úmido por longo tempo. Entretanto, as propriedades do material são melhoradas quando as aparas de madeira são saturadas com solução de silicato de sódio, isto é, devido à melhora na aderência entre as aparas de madeira e a pasta de cimento (88).

Tanto a cinza de lodo de esgoto como o lodo de esgoto podem ser utilizados individualmente ou juntos para a produção de agregados sintéticos, desde que estes apresentem características similares a de argilas expansivas. Para alcançar as propriedades de expansão, o material cru deve satisfazer as seguintes exigências: (a) deve conter constituintes suficientes para produção de gás, (b) ao ser aquecido, a piroplasticidade deve ocorrer simultaneamente com a formação de gás. Estes agregados são produzidos em pelotizadores rotacionais a temperaturas de 1050 a 1150$^{o}$C. Uma mistura de 20-30% de lodo de esgoto na cinza de lodo de esgoto é considerada ideal para a produção de agregados leves de cinza de lodo de esgoto (89).

O uso de agregados leves em concreto tem muitas vantagens. Estas incluem: a) Fundações de tamanhos reduzidos e estruturas superiores menores e mais leves devido à redução no peso das estruturas das edificações. O que pode resultar na redução na quantidade de cimento e na possível redução na quantidade de reforço (aço). b) Mais leves e menores elementos pré-moldados precisando de menores e mais baratos manuseios e equipamentos de transporte. c) Reduções nas dimensões de pilares, vigas e lajes resultando em maior disponibilidade de espaço. d) Alta isolação térmica. e) Resistência ao fogo melhorada (90).

A mais significante vantagem potencial do uso dos agregados leves para concreto e construção é o valor ambiental. Quando a matéria prima para a produção dos agregados leves são derivados sub-produtos industriais, o meio ambiente, a economia de produção e o país são beneficiados (90).

### 3.5.3 Correlação entre as propriedades dos agregados e dos concretos

A resistência do agregado não é normalmente um fator determinante na resistência do concreto porque, à exceção dos agregados leves, a partícula do

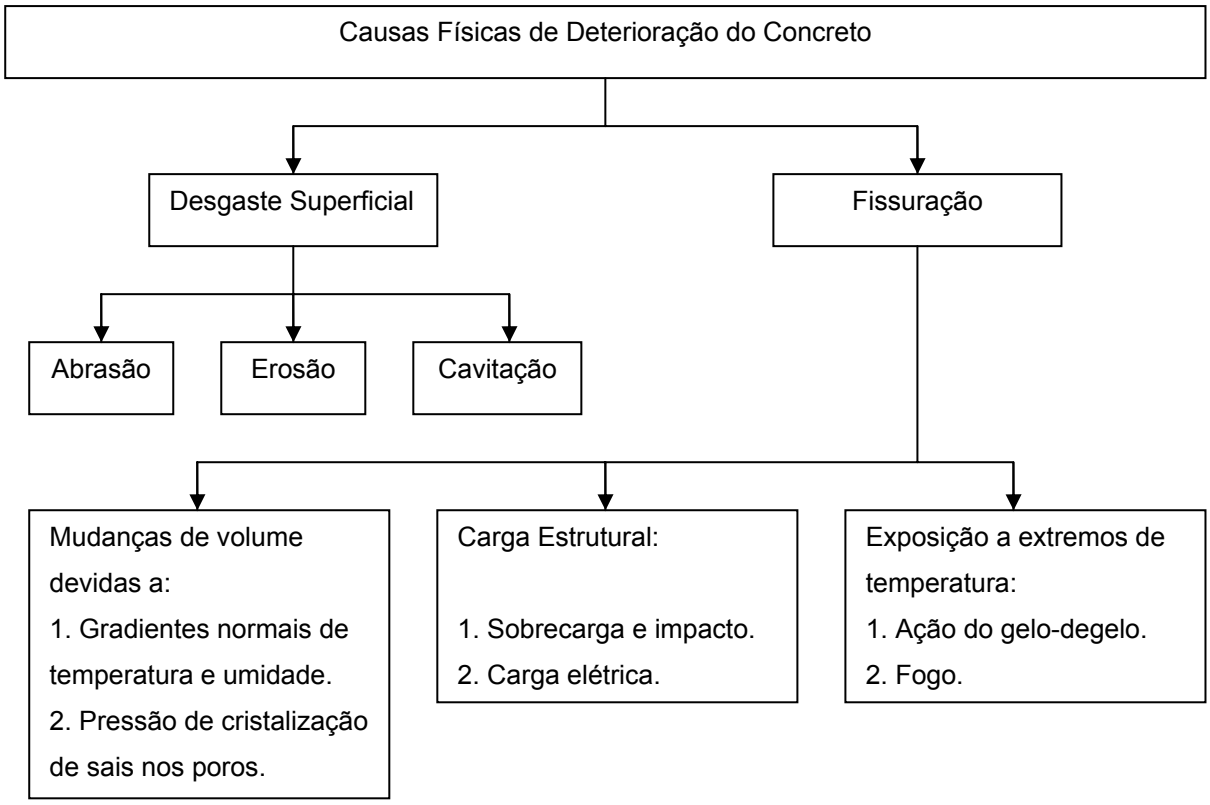
agregado é muitas vezes mais resistente que a matriz e a zona de transição. Existem, outras características do agregado que exercem influência na resistência do concreto. Entre estas características, Metha e Monteiro (78) destacam:

- Uma mudança no diâmetro máximo de um agregado graúdo com distribuição granulométrica bem graduada e de uma dada mineralogia pode ter dois efeitos opostos sobre a resistência do concreto. Para um mesmo teor de cimento e mesma consistência do concreto, as misturas de concreto contendo partículas de agregados grandes requerem menos água de amassamento do que aquelas que contêm agregados menores. Ao contrário, agregados grandes tendem a formar zonas de transição mais fracas contendo mais microfissuras. O efeito resultante variará com o fator água/cimento do agregado e a tensão aplicada.
- Uma mudança na granulometria do agregado sem qualquer mudança no diâmetro máximo do agregado graúdo e com o fator água/cimento mantido constante, pode influenciar a resistência do concreto se esta mudança provocar uma alteração correspondente na consistência e nas características de exudação da mistura de concreto.
- Uma mistura de concreto contendo agregado de textura rugosa ou britado apresentará uma resistência maior (especialmente a resistência à tração) nas primeiras idades que um concreto correspondente contendo agregado liso ou que sofreu intemperismo natural, de mineralogia similar.
- Diferenças na composição mineralógica dos agregados também afetam a resistência do concreto.

Entre as características do agregado graúdo que afetam o módulo de deformação do concreto, a porosidade parece ser a mais importante. Isto acontece porque a porosidade do agregado determina sua rigidez que, por sua vez, controla a capacidade do agregado em restringir deformações da matriz. Agregados densos têm módulo de deformação alto. Em geral, quanto maior a quantidade de agregado graúdo em uma mistura de concreto, maior será o módulo de deformação do concreto. Uma vez que, em concretos de baixa e média resistência, a resistência do concreto não é afetada pela porosidade do agregado, isto mostra que todas as variáveis podem não controlar a resistência e o módulo de deformação da mesma forma (78).

De acordo com o Comitê 201 do ACI (91), a durabilidade do concreto de cimento Portland é definida como a sua capacidade de restringir a processos de deterioração.

A Figura 03 contém um fluxograma das causas físicas de deterioração do concreto segundo Mehta e Gerwick (92).



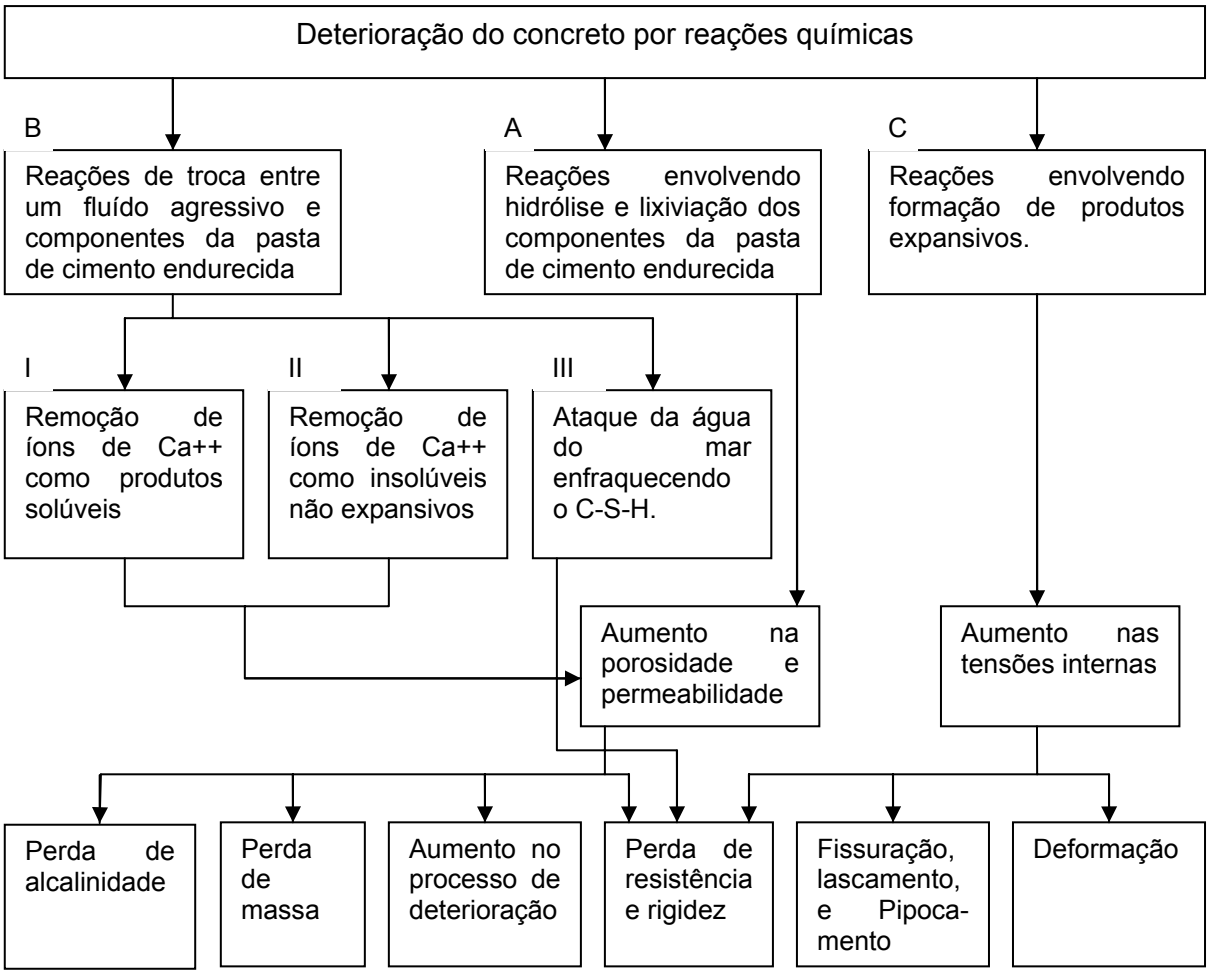

Fonte: Mehta e Gerwick (92)

Figura 03 – Fluxograma de causas físicas de deterioração do concreto.

Os métodos para a avaliação da resistência ao desgaste do concreto nem sempre são satisfatórios, porque as condições de desgaste no campo são difíceis de simular em laboratório. Portanto, os métodos de laboratório não se propõem a fornecer medidas quantitativas da vida útil de uma superfície de concreto, mas a avaliar os efeitos dos materiais do concreto e os procedimentos de cura ou acabamento sobre a resistência do concreto (78).

De acordo com Mehta e Monteiro (78) a resistência do concreto a processos destrutivos iniciados por reações químicas envolve geralmente interações químicas entre agentes agressivos presentes no meio externo e os constituintes da pasta de

cimento. Entretanto, existem exceções, tais como: as reações álcali-agregados que ocorrem entre os álcalis na pasta de cimento e certos materiais reativos; a hidratação retardada do CaO e MgO cristalinos, se presentes em quantidades excessivas no cimento e; a corrosão eletroquímica da argamassa do concreto. A Figura 04 contém um fluxograma da deterioração do concreto por reações químicas.




**A** = Ataque da água mole no hidróxido de cálcio e C-S-H presentes nos cimentos Portland hidratados; **B (I)** = solução ácida formando componentes solúveis de cálcio tais como cloreto de cálcio, sulfato de cálcio, acetato de cálcio e bicarbonato de cálcio; **B (II)** = soluções de ácido oxálico e seus sais, formando oxalato de cálcio; **B (III)** = ataque de longa duração de água do mar enfraquecendo o C-S-H pela substituição do $Mg^{+2}$ por $Ca^{+2}$; **C** = ataque por sulfato formando etringita e gipsita, reação álcali-agregado, corrosão do aço no concreto e hidratação de MgO e CaO cristalinos.

Fonte: Mehta e Gerwick (92)

Figura 04 – Fluxograma de deterioração do concreto por reações químicas.

Para garantir a durabilidade do concreto, o agregado deve ser inerte, não reagindo com os agentes a que o concreto estiver exposto. Não deve conter

produtos que possam reagir com o aço das armaduras, nem ter componentes mineralógicos que reajam, quer com o meio ambiente, quer com o cimento (76).

A permeabilidade é definida como a propriedade que governa a taxa de fluxo de um fluido para o interior de um sólido. Teoricamente, a introdução de partículas de agregado com baixa permeabilidade em uma pasta de cimento deveria diminuir a permeabilidade do sistema (principalmente em pastas com alta relação água/cimento nos estágios iniciais quando a porosidade capilar é alta) porque as partículas de agregado deveriam interceptar os canais de fluxo dentro da matriz da pasta de cimento. Comparados com a pasta de cimento, portanto, argamassa ou concreto com a mesma relação água/cimento e grau de maturidade deveriam apresentar um coeficiente de permeabilidade menor. Entretanto, na prática, não é isso o que ocorre. A adição de agregados a uma pasta de cimento ou argamassa aumenta consideravelmente a permeabilidade e, quanto maior o tamanho do agregado, maior o coeficiente de permeabilidade. Isso se deve à presença de microfissuras presentes na zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento ou argamassa (78).

A água absorvida pelos grãos do agregado é função da maior ou menor porosidade do material desses grãos. Depois de misturado ao concreto, essa água se incorpora à água de amassamento, alterando o fator água/cimento, se esta não tiver sido considerada na dosagem (76).

Do ponto de vista da falta de durabilidade do concreto sujeito à ação do congelamento, atribuída ao agregado, Verbeck e Landgren (93) propuseram três classes de agregados:

- Agregados de baixa permeabilidade e alta resistência, de modo que, no congelamento da água, a deformação elástica na partícula é acomodada sem causar fratura.
- Agregados de permeabilidade intermediária que têm um proporção significativa da porosidade total representada por pequenos poros da ordem de 500 nm e menores. Nestes, as forças capilares dos pequenos poros fazem com que o agregado sature facilmente e mantenha a água.
- Agregados de alta permeabilidade que geralmente contêm um elevado número de grandes poros e, embora permitam a entrada e a saída fácil da água, podem causar problemas de durabilidade, porque a zona de transição entre a superfície do agregado e a matriz da pasta de cimento

pode ser danificada quando água sob pressão é expelida de uma partícula de agregado.

A condutividade térmica dos grãos do agregado não tem relação direta com a condutividade térmica do concreto. Entretanto, a condutividade térmica do concreto varia com a composição mineralógica e a granulometria do agregado (76). Na Tabela 07 podem ser observadas diferenças entre propriedades térmicas de concreto produzido com argila expandida e de concreto estrutural convencional.

Tabela 07 – Diferenças entre propriedades térmicas de concreto leve produzido com argila expandida e de concreto convencional.

| **Propriedades** | **Concreto leve** | **Concreto convencional** |
|---|---|---|
| Massa específica (kg/m$^3$) | 1.850 | 2.400 |
| Resistência à compressão (MPa) | 20 a 50 | 20 a 70 |
| Calor específico (cal/g.$^o$C) | 0,23 | 0,22 |
| Condutividade térmica (W/m.K) | 0,58 a 0,86 | 1,4 a 2,9 |
| Difusividade térmica (m$^2$/h) | 0,0015 | 0,0025 a 0,0079 |
| Coef. de expansão térmica (10$^{-6}$/$^o$C) | 9 | 11 |

Fonte: Rossignolo e Agnesini (94).

A forma e a textura dos grãos é a característica que mais afeta a trabalhabilidade de um concreto (76). Comparadas às partículas lisas e arredondadas, as partículas de textura áspera, angulosas e alongadas requerem mais pasta de cimento para produzir misturas trabalháveis e, portanto, aumentam o custo do concreto (78).

Não considerar a correlação existente entre as propriedades dos agregados e dos concretos é um erro gravíssimo, pois os agregados exercem influência em importantes propriedades do concreto, além de exercer um importante papel na determinação do custo e da trabalhabilidade das misturas de concreto.

# 4 Capítulo

# MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo está apresentada a metodologia utilizada para alcançar os objetivos deste trabalho, a forma como a mesma foi estruturada, bem como, a descrição do conjunto dos materiais e métodos utilizados e fundamentados nos conhecimentos científico e tecnológico atuais.

## 4. 1 Organização do trabalho, formulação da idéia, e ensaios preliminares

A partir da revisão da literatura utilizada na atualização e no aprimoramento dos conhecimentos científico e tecnológico, a idéia do trabalho foi formulada, ensaios preliminares foram realizados e o trabalho foi divido e estruturado em sete etapas: 1) coleta, transporte e caracterização dos materiais e resíduos utilizados; 2) desenvolvimento, caracterização e aplicação do compósito como agregado graúdo em concreto; 3) determinação das propriedades mecânicas dos concretos em estudo; 4) determinação das propriedades térmicas dos concretos em estudo; 5) determinação da deterioração dos concretos em estudo por abrasão; 6) caracterização dos resíduos dos concretos em estudo em função do seu risco potencial ao meio ambiente; 7) análise dos resultados e organização das conclusões obtidas.

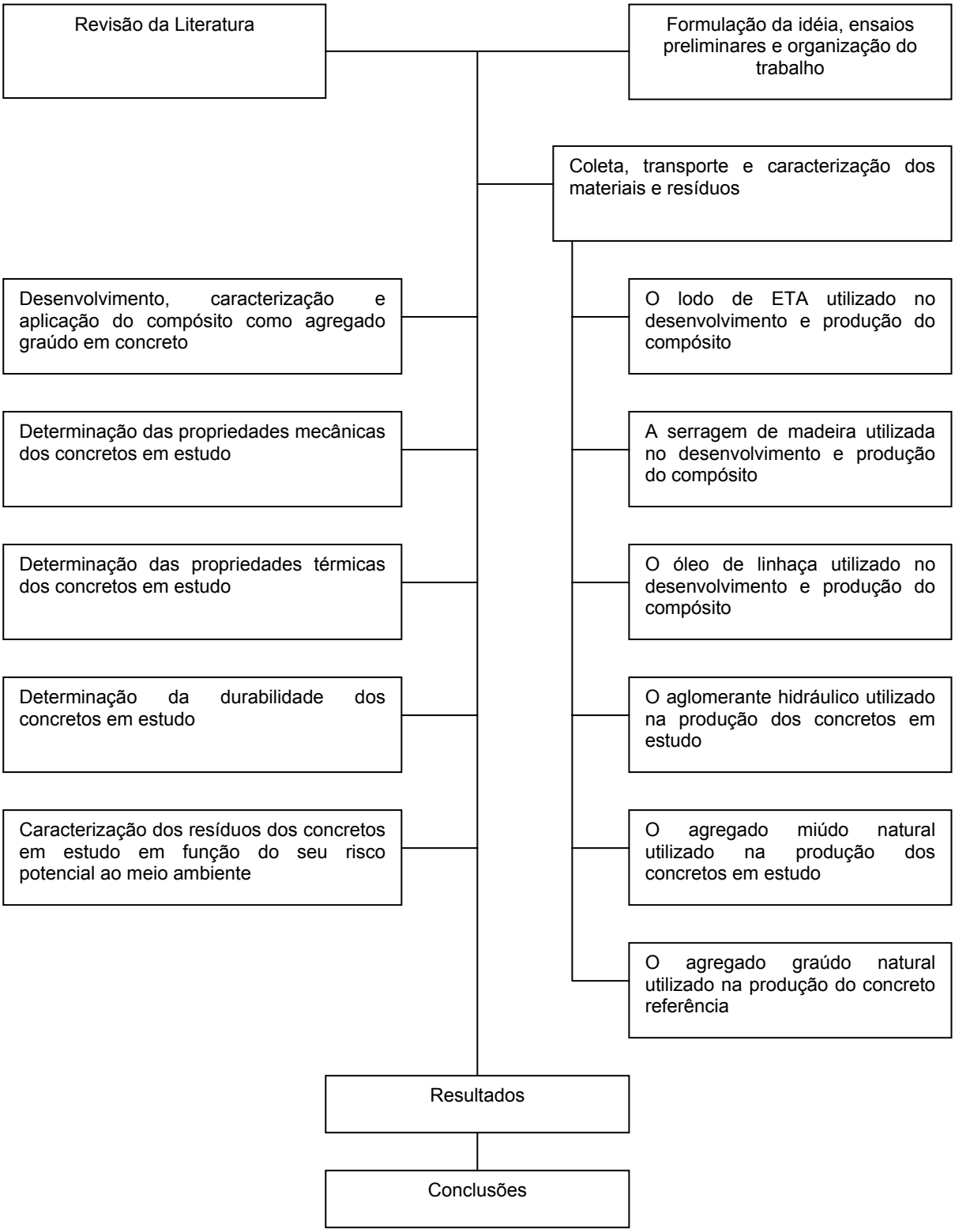



Figura 05 – Organograma do trabalho realizado.

A idéia de desenvolver um compósito à base de lodo de estação de tratamento de água e serragem de madeira para aplicação como agregado graúdo em concreto surgiu da necessidade de disponibilizar para o desenvolvimento sócio-econômico e ecológico de nosso país uma nova alternativa de reciclagem para estes resíduos.

A idéia foi embasada no conhecimento científico e tecnológico adquirido em pesquisas anteriores que envolveram o resíduo de estação de tratamento de água, o resíduo de madeira e a produção de concretos reciclados.

Na principal pesquisa científica que embasou o presente trabalho, foram produzidos concretos reciclados com a adição conjunta de resíduo de construção e demolição, e lodo de estação de tratamento de água. Nesta pesquisa, Sales, Cordeiro e De Souza (46) produziram concretos reciclados de propriedades mecânicas similares às de concretos convencionais com substituição total da pedra britada pelo resíduo de construção e demolição, e substituição parcial de até 5% da areia pelo lodo de estação de tratamento de água seco e moído.

Durante o preparo do lodo, percebeu-se que o mesmo, ao secar, à temperatura ambiente, apresentava-se em partes sólidas que se tornavam mais densas e rígidas que quando secas ao sol.

A presença do coagulante aplicado durante o tratamento de água proporcionava a união das partículas do lodo. Deste modo, foi pensado que, se o lodo de estação de tratamento de água, seco e na forma de grãos sólidos não dissolvesse durante o preparo do concreto, o mesmo poderia ser aplicado na forma de agregado graúdo e dessa maneira aumentar a quantidade de lodo reciclado.

Os primeiros ensaios experimentais foram tentativas de produzir concreto substituindo a pedra britada pelo lodo na forma de grãos sólidos e secos, semelhantes ao agregado graúdo convencional. Para evitar que o lodo se dissolvesse durante o preparo, decidiu-se por incorporá-lo somente após o preparo da argamassa matriz com cimento, areia e água. Entretanto, observou-se que, mesmo o preparo do concreto sendo realizado manualmente, havia uma grande dissolução do lodo e deformação dos grãos. A cor e a resistência do concreto endurecido mudavam completamente. A quantidade de água acumulada entre o grão de lodo e a argamassa matriz, ao secar, formava grandes espaços vazios na zona de transição, e destruía a aderência fazendo com que o corpo-de-prova do

concreto endurecido rachasse facilmente em fragmentos. A água acumulava-se principalmente nas pontas dos grãos, que praticamente se desfaziam.

No prosseguimento dos ensaios preliminares, buscou-se tornar os grãos mais densos e rígidos, secando-os e queimando-os em estufa sob temperaturas acima de 100$^{o}$C. Os grãos tornavam-se mais densos e rígidos, porém quebravam-se facilmente devido à presença de microfissuras que se formavam durante o processo de secagem. Quanto maior a temperatura, maior o número de microfissuras e mais quebradiço se tronavam os grãos. Entendeu-se que ocorria o mesmo quando da incorporação de lodo de estação de tratamento de água à massa cerâmica, para a produção de tijolos e telhas. De acordo com Teixeira et al. (44), as microfissuras aparecem devido ao superaquecimento dos metais presentes no lodo.

Com base nestes resultados, foi concluído que, para a aplicação do lodo em concreto como agregado graúdo, era preciso diminuir e controlar a absorção de água dos grãos e aumentar a resistência dos mesmos. Diminuir e controlar a absorção de água seria possível com o uso de produtos impermeabilizantes. A resistência poderia ser aumentada com a produção dos grãos por pressão mecânica e/ou mistura com outro material que, por questão econômica e ecológica, deveria preferencialmente ser um outro resíduo.

Antes de tentar diminuir e controlar a absorção de água dos grãos de lodo com o uso de produtos impermeabilizantes, tentou-se escolher outro material que pudesse ser misturado ao lodo, facilitando a sua compactação e diminuindo a absorção de água e a dissolução do grão de lodo quando em contato com a água.

A mistura do lodo com um aglomerante como, por exemplo, o cimento Portland não seria uma alternativa economicamente e ecologicamente viável, devido ao seu custo e ao impacto ambiental causado pela sua produção, entre estes, a extração da matéria-prima (materiais calcários e argilosos).

Optou-se pelo uso do resíduo de madeira, na forma de serragem, para a mistura com o lodo. Esta escolha foi embasada na grande disponibilidade deste material na natureza, na grande quantidade do seu resíduo produzido pelas indústrias de base florestal e no conhecimento sobre a possível aplicação deste como material filtrante no tratamento de águas residuárias (65), na absorção de íons de metais presentes na água (66) e na produção de concretos (75).

A idéia básica do uso da serragem foi: a produção de um compósito na forma de grãos seria possível, pois os poros da madeira seriam preenchidos pelas

partículas do lodo, a mistura seria facilmente compactada e ocorreria aderência entre o lodo e a madeira e entre a madeira e o cimento.

Esta hipótese foi testada da seguinte forma: misturando o lodo seco e moído com água e serragem de madeira, compactando a mistura manualmente na forma de grãos angulosos e redondos de diversos tamanhos, secando os grãos à temperatura ambiente e produzindo concreto com este novo compósito.

Os grãos do compósito lodo-serragem não se fragmentaram com a mesma facilidade que os grãos de lodo, mas isso ainda ocorria, principalmente quando o concreto era produzido em betoneira. A absorção de água ainda era alta.

Por ter sido escolhido o resíduo de madeira para a produção do compósito e pelo conhecimento sobre a aplicação do óleo de linhaça na madeira para a impermeabilização e a proteção contra fungos, optou-se em usar o óleo de linhaça para a redução e o controle da absorção de água do compósito.

Sabendo que o efeito retardador de pega em concretos e argamassas produzidos com cimento Portland está associado à presença de íons de sódio e que o lodo de estação de tratamento de água pode ser utilizado para o retardo de pega e o aumento da trabalhabilidade de argamassas plásticas (45), optou-se em utilizar cimento Portland de alta resistência inicial para a produção dos concretos em estudo.

Dessa forma, foram definidos os materiais e os resíduos que seriam utilizados no desenvolvimento do compósito e na produção dos concretos.

## 4.2 Coleta, transporte e caracterização dos materiais e resíduos

Os materiais empregados no desenvolvimento do compósito foram: lodo de estação de tratamento de água, serragem de madeira e óleo de linhaça cozido.

Os materiais empregados na produção dos concretos foram: cimento Portland de alta resistência inicial, areia quartzosa e pedra britada basáltica.

Para o desenvolvimento do compósito e para a produção dos concretos em estudo, não foram utilizados aditivos complementares, para que os resultados obtidos não ficassem vinculados ao uso destes materiais.

### 4.2.1 O lodo de estação de tratamento de água utilizado no desenvolvimento e na produção do compósito

O lodo utilizado no desenvolvimento e produção do compósito foi coletado na Estação de Tratamento de Água de São Carlos / São Paulo / Brasil, no dia de limpeza de um dos tanques de decantação. A Estação de Tratamento de Água de São Carlos é apresentada na Figura 06.

A escolha do lodo da Estação de Tratamento de Água de São Carlos foi realizada com base no estudo de Cordeiro (02) que analisou as propriedades físico-químicas das Estações de Tratamento de Água de São Carlos, Araraquara e Rio Claro e, ao comparar as características físico-químicas dos lodos destas estações, destacou o sistema de remoção dos lodos dos decantadores como o responsável pelas suas características finais, principalmente no que se refere à concentração de partículas.

Enquanto na Estação de Tratamento de Água de Araraquara, o lodo é removido até três vezes ao dia, nas Estações de Tratamento de Água de São Carlos e de Rio Claro a sua remoção é realizada em intervalos de tempo de até três meses. Desta forma, as concentrações de metais são mais elevadas em São Carlos e Rio Claro. Na Tabela 02 podem ser observadas as características físico-químicas das Estações de Tratamento de Água de São Carlos, Araraquara e Rio Claro.

A Estação de Tratamento de Água de São Carlos trata atualmente 600 litros por segundo de água bruta em um sistema tradicional composto pelas etapas de coagulação, floculação, sedimentação e filtração. O sistema de tratamento de água do município São Carlos caracteriza-se por utilizar sulfato de alumínio como coagulante das partículas presentes na água.

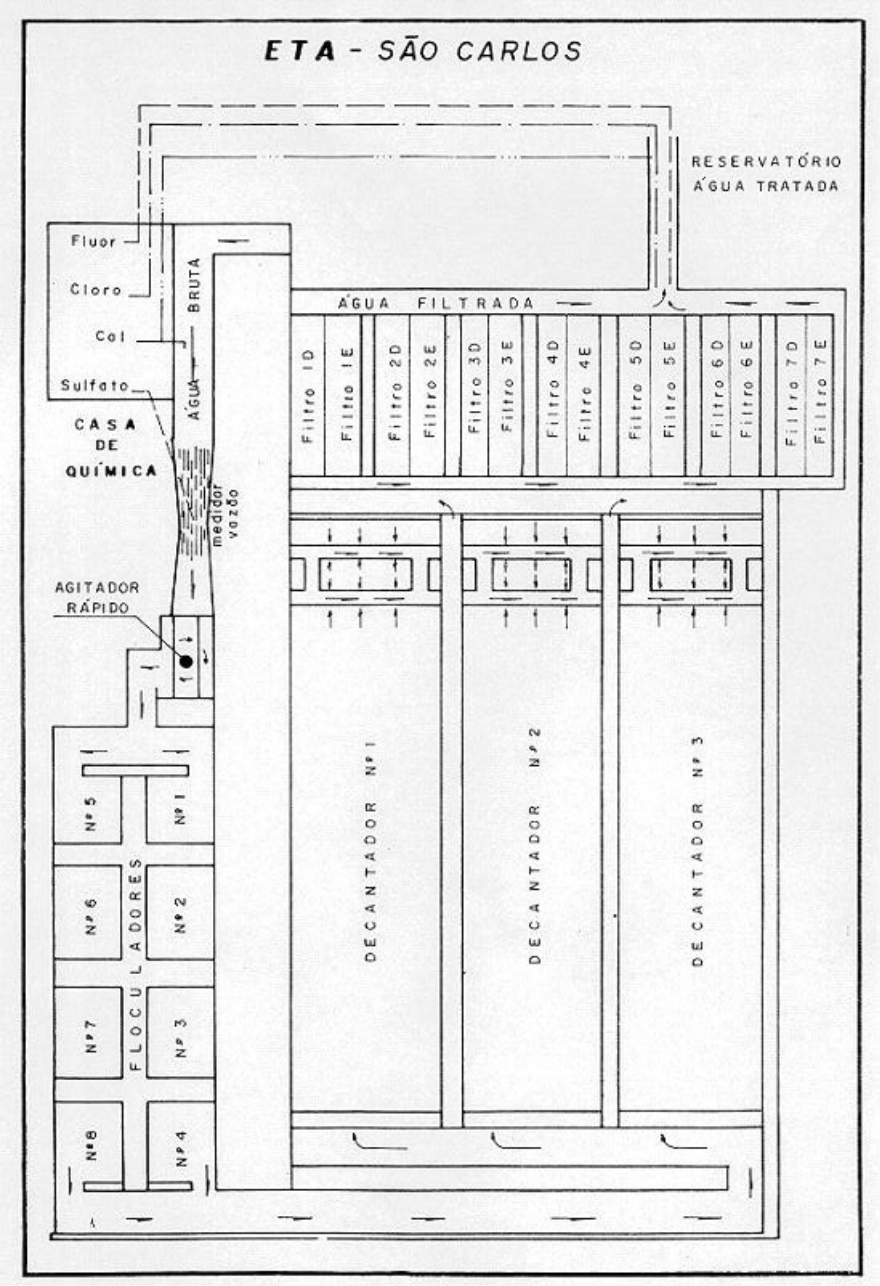



Figura 06 – Estação de Tratamento de Água do município de São Carlos/SP.

Na Estação de Tratamento de Água de São Carlos, a limpeza de cada tanque de decantação é trimestral e dura aproximadamente 4 horas. Na Figura 07 pode ser observado o processo de limpeza de um decantador da Estação de Tratamento de Água de São Carlos.

Figura 07 – Limpeza do decantador da ETA de São Carlos.

Durante a limpeza, os funcionários entram no interior do tanque de decantação com jatos de água já tratada para diluir o lodo e forçar o escoamento do mesmo pelos dutos presentes no fundo do tanque de decantação. Aproveitando o declive do terreno, o lodo escoado é depositado irregularmente no Córrego Monjolinho localizado à Av. Trabalhador Sãocarlense. Este procedimento de limpeza, além de poluir o córrego, desperdiça uma grande quantidade de água já tratada. Na Figura 08 pode ser observado o momento da disposição irregular do lodo no córrego.

Figura 08 – Disposição irregular do lodo no Córrego Monjolinho.

A coleta do lodo foi realizada antes da entrada dos funcionários no tanque de decantação.

Figura 09 – Momento escolhido para coleta do lodo.

A Figura 09 apresenta o momento escolhido para a coleta do lodo. A coleta não foi realizada em outro momento, para facilitar os processos seguintes.

O lodo coletado foi inicialmente colocado em um leito de drenagem composto por uma camada de cinco centímetros de brita basáltica de graduação granulométrica 1 e, sobre esta, uma camada de manta geotêxtil. A Figura 10 apresenta o lodo no leito de drenagem montado.

Figura 10 – Lodo no leito de drenagem.

Estes procedimentos foram realizados baseando-se em pesquisas a respeito de sistemas para a drenagem de lodos (02). A Tabela 08 apresenta um resumo das propriedades e características da manta geotêxtil utilizada.

Tabela 08 – Propriedades características da manta geotêxtil utilizada para a drenagem do lodo.

| **Propriedades e características** | **Manta geotêxtil** |
|---|---|
| Espessura (mm) | 4,5 |
| Peso (kg/m$^2$) | 0,4 |
| Densidade superficial (g/m$^2$) | 600 |
| Porosidade (%) | > 90 |
| Abertura porosa (µm) | 60 |
| Permeabilidade normal (cm/s) | 0,1 |

Fonte: Cordeiro (2).

Para a aplicação do lodo da Estação de Tratamento de Água de São Carlos no desenvolvimento do compósito, o lodo residente no leito de drenagem foi previamente seco à temperatura ambiente e, a seguir, completamente seco em estufa à temperatura 105±5$^o$C. Na Figura 11 pode ser observada a fase sólida do lodo completamente seca em estufa à temperatura 105±5$^o$C.

Figura 11 – Fase sólida do lodo seco em estufa à temperatura 105±5$^o$C.

A seguir, o lodo foi moído no moedor de agregados graúdos, apresentado na Figura 12, e a análise granulométrica do lodo seco e moído foi realizada segundo a NBR 7181:1984 (95). A análise granulométrica foi realizada por sedimentação sem o uso do defloculante hexametafostato de sódio, pelo fato do lodo conter o coagulante sulfato de alumínio e pelo fato do ensaio sem o uso de defloculante ser mais representativo do material que seria utilizado para o produção do compósito. Neste ensaio foi utilizado 54,05 g de lodo com teor de umidade de 6,98%.

O teor de matéria orgânica presente no lodo seco e moído foi determinado segundo os procedimentos e especificações da NBR 13600:1996 (96). Esta norma prescreve o método para a determinação do teor de matéria orgânica de solos através da queima em mufla à temperatura 440±5$^{o}$C do material previamente seco em estufa à temperatura 105±5$^{o}$C.

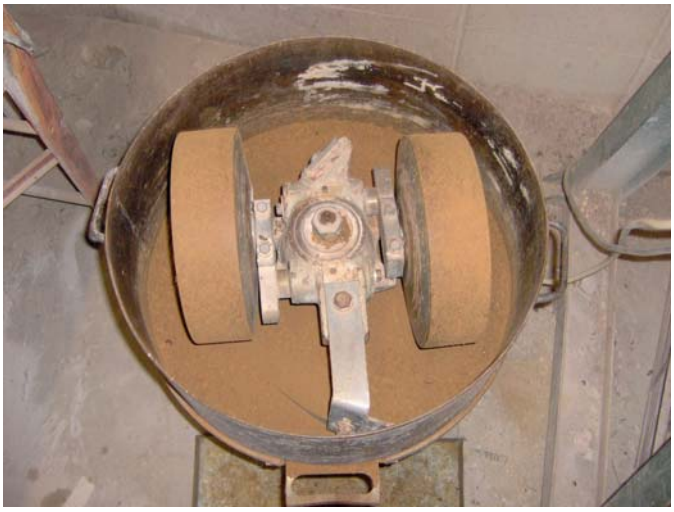


Figura 12 – Moagem da fase sólida do lodo seco.

Para se saber a quantidade máxima de água que poderia ser adicionada ao lodo, a partir do limite de plasticidade de modo que o mesmo mantenha sua consistência plástica, foi determinado o índice de plasticidade do lodo através da diferença numérica entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade. O limite de liquidez foi determinado segundo a NBR 6459:1984 (97), e o limite de plasticidade segundo a NBR 7181:1984 (98).

Foram utilizadas, para a caracterização do lodo, normas técnicas de determinação de propriedades de solos, pelo fato do lodo ser composto

principalmente de partículas de solo. De acordo com Cordeiro (02), os lodos de estações de tratamento de água são compostos basicamente de partículas de solo, material orgânico carreado para água bruta, subprodutos gerados da adição de produtos químicos, e água.

### 4.2.2 A serragem de madeira utilizada no desenvolvimento e na produção do compósito

A serragem de madeira utilizada no desenvolvimento e na produção do compósito foi obtida a partir de resíduos da madeira *Pinnus elliotti*, coletados no Laboratório de Madeira e Estruturas de Madeira da Universidade de São Paulo (LAMEM – USP).

A serragem desta madeira foi escolhida para o desenvolvimento e produção do compósito pelo fato da mesma ser altamente utilizada na indústria de construção civil e na indústria de produção mobiliária e por esta caracterizar-se pela alta absorção de água, ser leve e apresentar fibras de comprimento regular.

A serragem foi preparada, para a aplicação no desenvolvimento do compósito, moendo resíduos de madeira compostos por restos de lâminas no Macro-moinho Marconi MA-680 apresentado na Figura 13.

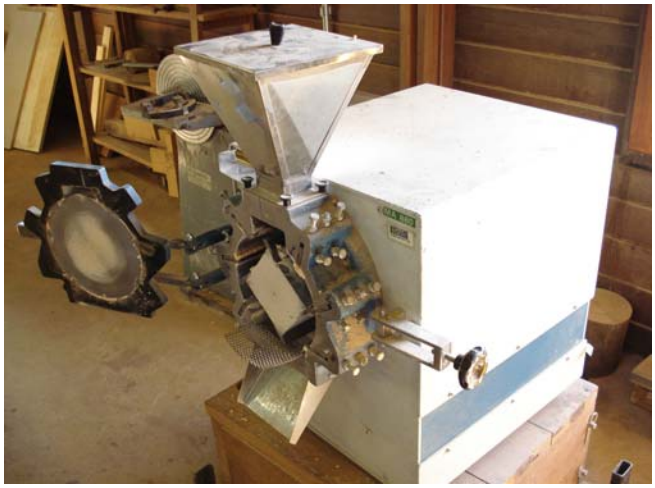


Figura 13 – Macro-moinho Marconi MA-680 utilizado na moagem da madeira.

O Macro-moinho Marconi MA-680 é composto de rotor vertical com facas móveis e fixas que aumentam a superfície de contato forçando as partículas menores a passarem através de peneira Mesh 20/30 de crivo circular. Na Figura 14 pode ser observada a serragem de madeira obtida do processo de moagem.

A serragem de madeira foi armazenada em local seco e livre da ação de intempéries e, além da dimensão das partículas, foi caracterizada pelo teor de umidade, densidade, porosidade e dimensão média de suas fibras.

Figura 14 – Serragem de madeira *Pinnus elliotti* composta por partículas de tamanho menor ou igual a 0,841 mm.

O teor de umidade da serragem de madeira foi determinado através da relação percentual entre a massa de uma amostra de serragem antes e após secagem em estufa à temperatura de 105±5$^{o}$C.

A densidade, a porosidade e o diâmetro dos poros da serragem de madeira foram determinados por porosimetria de mercúrio utilizando o Porosímetro Micromeritics Poro Sizer 9310, apresentado na Figura 15. A determinação destas propriedades foi realizada seguindo o processo utilizado por Moura e Figueiredo (56) e descrito no capítulo 3, item 3.4.1.

Para a determinação da densidade, da porosidade e do diâmetro dos poros da serragem de madeira, foram considerados os seguintes dados:

- Penetrômetro constante = 21,63 µL/PF
- Peso do penetrômetro = 69,3989 g

- Volume da haste = 1,1310 mL
- Volume da haste usada = 8%
- Pressão máxima = 4,4500 psia
- Volume do penetrômetro = 6,0489 mL
- Ângulo de contato entre o mercúrio e a serragem = 130 graus
- Tensão superficial do mercúrio: 485 dyn/cm
- Densidade do mercúrio = 13,5399 g/mL
- Peso da amostra = 0,3593 g
- Peso da amostra + penetrômetro + mercúrio = 142,0548 g

Figura 15 – Porosímetro Micromeritics Poro Sizer 9310 utilizado nos ensaios de porosimetria de mercúrio.

O valor obtido por porosimetria de mercúrio para a densidade da serragem de madeira foi comparada com os resultados obtidos por Foelkel et al (59), apresentados no Capítulo 3, Tabela 03.

A estrutura anatômica da serragem de madeira foi analisada a partir do ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV.

As dimensões médias das fibras de madeira determinadas por Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV foram comparadas com os resultados obtidos por Foelkel et al (59), apresentados no Capítulo 3, Tabela 04.

Por meio das comparações dos resultados obtidos de densidade e dimensões médias das fibras com os resultados encontrados na literatura, a madeira

utilizada no desenvolvimento e na produção do compósito pôde ser classificada como juvenil ou adulta.

### 4.2.3 O óleo de linhaça utilizado no desenvolvimento e na produção do compósito

Neste trabalho foi utilizado o óleo de linhaça cozido cujo fabricante se disponibilizou a apresentar as especificações de seu produto.

A linhaça, também chamada “Flaxssed”, é uma variedade da conhecida “Flax”, *linum usistatissimum*, que pode ser utilizada tanto para a produção de óleos industriais como para a produção de complemento alimentar. O óleo de linhaça cozido é um dos produtos derivados da industrialização da linhaça em grãos. Após a obtenção do óleo bruto, este passa por um processo de fervura onde é adicionado um secante para agilizar o processo de secagem ao ar quando este é aplicado sobre superfícies. O óleo de linhaça cozido apresenta cor amarelo-dourado, marrom ou âmbar e é comumente aplicado em madeiras e seus derivados para a proteção, impermeabilização e realce das cores naturais.

### 4.2.4 O aglomerante hidráulico utilizado na produção dos concretos em estudo

O aglomerante hidráulico utilizado na produção dos concretos em estudo foi o Cimento Portland de Alta Resistência Inicial – CPV-ARI Plus da Fábrica Ciminas. O Cimento Portland de Alta Resistência Inicial é definido pela NBR 5733:1991 (99) como aglomerante hidráulico que atende às exigências de alta resistência inicial, é obtido pela moagem de clínquer Portland e é constituído em sua maior parte por silicatos de cálcio hidráulicos, sem adição durante a moagem de outra substância a não ser uma ou mais formas de sulfato de cálcio.

A escolha deste aglomerante foi embasada no conhecimento apresentado por Raupp-Pereira et al (45), de que o efeito retardador de pega em concretos e argamassas produzidos com cimento Portland está associado à presença de íons de

sódio, e que o lodo de estação de tratamento de água pode ser utilizado para o retardo de pega e o aumento da trabalhabilidade de argamassas plásticas. Sendo o compósito produzido à base de lodo de estação de tratamento de água, e sabendo que o compósito poderia quebrar e até mesmo dissolver durante o processo de preparo do concreto, optou-se em utilizar cimento Portland de alta resistência inicial.

Os sacos de cimento comprados no comércio do município São Carlos foram pesados e armazenados em locais bem secos e bem protegidos, de forma a permitir a preservação da qualidade e o fácil acesso à inspeção e identificação.

Para saber se o cimento era apropriado para a produção dos concretos em estudo, as propriedades e características físico-químicas fornecidas pelo fabricante foram comparadas aos limites estabelecidos pela NBR 5733:1991 (99) e, seguindo os procedimentos e orientações da NBR 7215:1996 (100), foram realizados ensaios de resistência à compressão após 1, 3 e 7 dias de cura, e os resultados obtidos em laboratório foram comparados com o limite estabelecido pela NBR 5733:1991 (99) e com o valor fornecido pelo fabricante.

### 4.2.5 O agregado miúdo natural utilizado na produção dos concretos em estudo

O agregado miúdo natural utilizado na produção dos concretos em estudo foi a areia quartzosa do rio Mogi-Guaçu, comprada no comércio do município de São Carlos. A escolha deste agregado foi embasada no fato do mesmo ser altamente utilizado pela indústria da construção civil do município e de toda a região.

Assim que chegou ao laboratório, o agregado miúdo natural foi estendido e exposto à temperatura ambiente por 24 h para uma pré-secagem. A seguir, o mesmo foi ensacado e reservado em local seco e protegido da ação de intempéries.

Com o objetivo de estabelecer padrões para a produção de todos os concretos em estudo, o agregado miúdo natural teve as seguintes propriedades características determinadas: composição granulométrica, dimensão máxima característica, módulo de finura, inchamento, massa unitária e massa específica.

A composição granulométrica do agregado miúdo natural foi determinada seguindo os procedimentos estabelecidos pela NBR 7217:1987 (101). As amostras

para o ensaio, coletadas segundo a NBR 7216:1987 (102), foram completamente secas em estufa à temperatura de 105±5$^{o}$C, resfriadas à temperatura ambiente e peneiradas no peneirador automático de agregados miúdos apresentado na Figura 16. Para o peneiramento, foi utilizada a seguinte série de peneiras de malha quadrada e de dimensão igual a 9,5; 6,3; 4,8; 2,4; 1,2; 0,6; 0,3 e 0,15 mm. As porções retidas nas peneiras foram pesadas, e as porcentagens retidas e acumuladas foram determinadas e comparadas com os limites estabelecidos pela NBR 7211:1983 (77).

Figura 16 – Peneirador automático utilizado na determinação da composição granulométrica do agregado miúdo natural.

O módulo de finura do agregado miúdo natural foi determinado seguindo os procedimentos estabelecidos pela NBR 7211:1983 (77), ou seja, pela soma das porcentagens em massa retidas e acumuladas nas peneiras da série normal divida por 100.

A dimensão máxima característica do agregado miúdo natural foi determinada de acordo com a NBR 7211:1983 (77), que define essa grandeza como a abertura da malha quadrada, em mm, da peneira que obteve porcentagem em massa retida e acumulada igual ou imediatamente inferior a 5%.

A massa unitária do agregado miúdo natural no estado seco e solto foi determinada de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NBR 7251:1982 (103). Essa grandeza foi determinada pelo quociente da massa do agregado necessária para encher um recipiente paralelepipédico e o volume deste recipiente.

Para esta determinação, as dimensões do recipiente foram determinadas em função da dimensão máxima característica do agregado, e o agregado foi lançado a uma altura de 10 a 12 cm do topo do recipiente que, quando completamente cheio, teve sua superfície alisada com uma régua.

A massa unitária do agregado miúdo natural no estado compactado seco foi determinada de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NBR 7810:1983 (104). Para esta determinação, um recipiente cilíndrico de dimensões definidas em função da dimensão máxima característica do agregado foi completamente cheio com o agregado em três camadas, as quais foram adensadas com a aplicação de 25 golpes de uma haste metálica. Na primeira camada, os golpes de adensamento foram distribuídos uniformemente sem que a haste metálica atingisse o fundo do recipiente, e nas camadas seguintes, os golpes foram aplicados sem que a haste penetrasse a camada subjacente. O recipiente cheio teve sua superfície alisada com uma régua e a massa unitária foi determinada pelo quociente da massa do agregado necessária para encher o recipiente cilíndrico e o volume deste recipiente.

A massa específica do agregado miúdo natural foi determinada de acordo com os procedimentos estabelecidos pela NBR 9776:1987 (105). Esta norma define a massa específica de um agregado como a relação entre a massa do agregado seco em estufa à temperatura 105±5$^{o}$C e o volume igual do sólido, incluído os poros permeáveis. Para esta determinação, inicialmente, no interior do Frasco de Chapman foi colado água até a marca de 200 cm$^3$. A seguir, foi introduzido 500 g do agregado miúdo seco e realizada a leitura do volume ocupado pelo conjunto água-agregado. A massa específica do agregado miúdo natural foi calculada através da Equação 08:

$$\gamma = 500 / (L - 200) \qquad (08)$$

onde:

γ = massa específica do agregado miúdo natural.

L = Volume ocupado pelo conjunto água-agregado.

O inchamento do agregado miúdo natural foi determinado de acordo com os procedimentos e orientações da NBR 6467:1987 (106). Esta norma define o inchamento do agregado miúdo como a variação do volume aparente provocado

pela absorção de água livre dos grãos do agregado que incide sobre a sua massa unitária. Para esta determinação, uma amostra maior que o dobro do volume do recipiente utilizado para a determinação da massa unitária do agregado no estado seco e solto foi inicialmente seca em estufa à temperatura 105±5$^{o}$C até a constância de sua massa. A seguir esta amostra foi resfriada à temperatura ambiente, colocada sobre um encerado de lona, homogeneizada e teve sua massa unitária no estado seco e solto determinada segundo a NBR 7251:1982 (103). A esta amostra foi adicionada água, sucessivamente, para se obter teores de umidade aproximadamente iguais a 0,5%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 7%, 9% e 12%. A cada adição de água, foi determinado o teor de umidade, a massa unitária do agregado no estado seco e solto, e o coeficiente de inchamento do agregado.

O teor de umidade das amostras coletadas foi determinado através da Equação 09:

$$h = [(Mi - Mf) / (Mf - Mc)] \times 100 \qquad (09)$$

onde:

h = teor de umidade do agregado, em %;

Mi = massa da cápsula com o material coletado durante o ensaio, em g;

Mf = massa final da cápsula com o material coletado após secagem em estufa, em g;

Mc = massa da cápsula, em g.

Para cada teor de umidade, o coeficiente de inchamento do agregado foi determinado através da Equação 10:

$$Vh/Vo = \{(\gamma s/\gamma h) \times [100 + h)/100]\} \qquad (10)$$

onde:

Vh = volume do agregado com h% de umidade, em dm$^3$;

Vo = volume do agregado seco em estufa, em dm$^3$;

Vh/Vo = coeficiente de inchamento do agregado;

γs = massa unitária do agregado seco em estufa, em kg/dm$^3$;

γh = massa unitária do agregado com h% de umidade, em kg/dm$^3$;

h = teor de umidade do agregado, em %.

Com os pares de valores dos teores de umidade e dos coeficientes de inchamento obtidos para cada adição de água, foi traçada a curva de inchamento representativa do fenômeno.

A umidade crítica, definida pela NBR 6467:1987 (106) como o teor de umidade acima do qual o coeficiente de inchamento pode ser considerado constante e igual ao coeficiente de inchamento médio, foi determinada pela seguinte construção gráfica: Primeiramente, foi traçada uma reta tangente à curva de inchamento, e paralela ao eixo teor de umidade. A seguir, foi traçada uma reta que une a origem das coordenadas ao ponto de tangência da reta anteriormente traçada e uma nova reta tangente à curva de inchamento e paralela à reta que une a origem das coordenadas ao ponto de umidade máxima. A umidade crítica foi determinada como a abscissa correspondente ao ponto de interseção das duas tangentes. O coeficiente de inchamento médio do agregado foi determinado pela média aritmética entre o coeficiente de inchamento máximo e aquele correspondente à umidade crítica.

### 4.2.6 O agregado graúdo natural utilizado na produção dos concretos em estudo

O agregado graúdo natural utilizado na produção dos concretos em estudo foi a pedra britada basáltica da pedreira Bandeirantes comprada no comércio do município de São Carlos. A escolha deste agregado foi embasada no fato do mesmo ser altamente utilizado pela indústria da construção civil do município e de toda a região.

Assim que chegou ao laboratório, o agregado graúdo natural foi estendido e exposto a temperatura ambiente por 24 horas para uma pré-secagem. A seguir, o mesmo foi ensacado e reservado em local seco e protegido da ação de intempéries.

Com o objetivo de estabelecer padrões para a produção de todos os concretos em estudo, o agregado graúdo natural teve as seguintes propriedades características determinadas: composição granulométrica, dimensão máxima

característica, módulo de finura, índice de forma, massa unitária, massa específica, absorção de água e teor de materiais pulverulentos.

A composição granulométrica do agregado graúdo natural foi determinada seguindo os procedimentos estabelecidos pela NBR 7217:1987 (101). As amostras para o ensaio, coletadas segundo a NBR 7216:1987 (102), foram completamente secas em estufa à temperatura de 105±5$^{o}$C, resfriadas à temperatura ambiente, pesadas e peneiradas no peneirador automático de agregados miúdos apresentado na Figura 17. Para o peneiramento foi utilizada a seguinte série de peneiras de malha quadrada e de dimensão igual a 25; 19; 9,5; 6,3; 4,8 e 2,4 mm. As porções retidas nas peneiras foram pesadas e as porcentagens retidas e acumuladas foram determinadas e comparadas com os limites estabelecidos pela NBR 7211:1983 (77).

Figura 17 – Peneirador automático utilizado na determinação da composição granulométrica do agregado graúdo natural.

A dimensão máxima característica e o módulo de finura do agregado graúdo natural foram determinados segundo a NBR 7217:1987 (101), seguindo os mesmos procedimentos descritos para a determinação destas propriedades do agregado miúdo natural.

A massa unitária do agregado graúdo natural no estado seco e solto e no estado compactado seco foram determinadas segundo a NBR 7251:1982 (103) e a NBR 7810:1983 (104), respectivamente, seguindo os mesmos procedimentos descritos para a determinação destas propriedades do agregado miúdo natural.

A massa específica, a massa específica aparente e a absorção de água do agregado graúdo natural foram determinadas seguindo os procedimentos estabelecidos pela NBR NM53:2003 (107). Para esta determinação, uma amostra coletada segundo a NBR 7216:1987 (102) foi reduzida em 3 amostras parciais de 3 kg. As amostras parciais foram lavadas a fim de remover o pó e/ou outro material da superfície do agregado. Foram completamente secas em estufa à temperatura de 105±5$^{o}$C e pesadas. O valor obtido foi definido como m = massa ao ar da amostra seca. A seguir, as amostras parciais foram submergidas em água por um período de 24±4 h; em seguida, retiradas da água, secas em um pano absorvente até que toda a água visível fosse eliminada e, finalmente, pesadas. O valor medido foi definido como $m_s$ = massa ao ar da amostra na condição saturada superfície seca. Por fim, as amostras parciais foram colocadas em um cesto de arame com abertura de malha inferior a 3,35 mm e submergidas e pesadas em água. O valor obtido foi definido como $m_a$ = massa da amostra submersa em água.

A massa específica, a massa específica aparente e a absorção de água do agregado graúdo natural foram determinadas pela média aritmética dos valores encontrados para as duas amostras através, respectivamente, das Equações 11, 12 e 13:

$$d = m / (m - m_a) \quad (11)$$

onde:

d = massa específica do agregado seco, em gramas por centímetro cúbico;

m = massa da amostra seca, em gramas;

$m_a$ = massa da amostra submersa em água, em gramas;

$(m-m_a)$ = volume do agregado incluindo os vazios permeáveis.

$$d_a = m / (m_s - m_a) \quad (12)$$

onde:

$d_a$ = massa específica aparente do agregado seco, em gramas por centímetro cúbico;

m = massa da amostra seca, em gramas;

$m_s$ = massa da amostra na condição saturada superfície seca, em gramas;

$m_a$ = massa da amostra submersa em água, em gramas;

($m_s$ – $m_a$) = volume do agregado excluindo os vazios permeáveis.

$$A = (m_s - m) \times 100 / m \quad (13)$$

onde:

A = absorção de água, em porcentagem;

m = massa da amostra seca, em gramas;

$m_s$ = massa da amostra na condição saturada superfície seca, em gramas.

O teor de materiais pulverulentos presentes no agregado graúdo natural foi determinado segundo a NBR 7219:1987 (108), a qual define os materiais pulverulentos como partículas minerais presentes nos agregados com dimensão inferior a 0,075 mm inclusive os solúveis em água. Para esta determinação, duas amostras parciais de 3 kg do agregado graúdo natural foram previamente secas em estufa à temperatura de 105±5$^{o}$C até a constância de suas massas. A seguir, a amostra parcial 1 foi colocada em um recipiente, recoberta com água e agitada com o auxílio de uma haste para provocar a separação e a suspensão das partículas finas presentes. A agitação da amostra foi realizada com o cuidado de não causar a abrasão dos grãos do agregado. A água utilizada foi cuidadosamente despejada através de um conjunto de duas peneiras de 1,2 mm e 0,075 mm e a operação de lavagem foi repetida até que a água de lavagem se tornasse visualmente límpida. Ao terminar a lavagem, o material foi deixado em repouso o tempo necessário para decantar suas partículas, a água em excesso foi retirada e a amostra lavada foi completamente seca em estufa à temperatura de 105±5$^{o}$C. A amostra parcial 1 seca foi pesada e o procedimento foi repetido para a amostra parcial 2.

O teor de materiais pulverulentos do agregado graúdo natural foi determinado pela media aritmética dos valores obtidos para as amostras parciais através da Equação 14,

$$T = [(Mi - Mf)/Mi] \times 100 \quad (14)$$

onde:

Mi = massa da amostra seca antes da lavagem;

Mf = massa da amostra seca após a lavagem, em gramas;

T = teor de materiais pulverulentos, em %.

A NBR 7809:1983 (109) define o índice de forma de um agregado graúdo como a média da relação entre o comprimento e a espessura dos grãos do agregado, ponderada pela quantidade de grãos de cada fração granulométrica. O comprimento de um grão “c” é definido como a maior dimensão possível de ser medida e que estabelece a direção do comprimento. A espessura de um grão “e” é definida como a menor distância possível entre planos paralelos entre si e à direção do comprimento do grão, que o tangenciam. Desta forma, para a determinação desta grandeza, seguindo as orientações dessa norma, uma amostra de 8 kg do agregado graúdo natural foi inicialmente seca em estufa até a constância de sua massa à temperatura de 105±5$^{o}$C e, a seguir, foi analisada granulometricamente segundo a NBR 7217:1987 (101). Foram desprezadas as frações passantes na peneira de malha quadrada de 9,5 mm e aquelas cujas porcentagens em massa retidas, individuais, foram iguais ou inferiores a 5 % e, das frações restantes, foi obtido o número de grãos para medição através da Equação 15,

$$Ni = [200 / (F1 + F2 + ... + Fn)] \times Fi \qquad (15)$$

onde:

200 = número de grãos necessários para o ensaio;

Ni = número de grãos para medição, da fração i;

Fi = porcentagem em massa retida individual correspondente a fração i.

F1 + F2 + ...+ Fn = Soma das porcentagens em peso retidas individuais das frações obtidas.

Depois de realizada com paquímetro a medida do comprimento e da espessura de cada um dos grãos coletados para o ensaio, o índice de forma do agregado graúdo natural foi calculado pela média, já ponderada, das relações entre o comprimento e a espessura de todos os grãos medidos. O resultado foi arredondado ao décimo e comparado aos limites estabelecidos pela NBR 7211:1983 (77).

## 4.3 Desenvolvimento, caracterização e aplicação do compósito como agregado graúdo em concreto

Definidos os materiais e os resíduos que seriam utilizados, o desenvolvimento do compósito iniciou-se com a preparação de diversos traços de misturas de lodo de estação de tratamento de água, serragem de madeira e água para a definição da relação em massa desses materiais na produção do compósito.

O lodo da Estação de Tratamento de Água de São Carlos, inicialmente drenado e seco, foi moído em um moedor de agregados graúdos e, a seguir, misturado com serragem de madeira e água conforme apresentado na Figura 18.

Figura 18 – Preparo do compósito.

A relação em massa entre os materiais foi determinada em função da consistência, da trabalhabilidade e da facilidade de compactação da mistura que foi realizada utilizando sempre a menor quantidade de água possível para o trabalho manual e a modelagem de grãos arredondados de 14 ± 2 mm de diâmetro.

A relação em massa dos materiais serragem de madeira, lodo e água foi definida 1:6:4,5 e o processo de produção do compósito foi divido em quatro etapas: mistura dos materiais, compactação, modelagem manual e secagem. Na Figura 19

podem ser observados os grãos do compósito preparados com o traço definido e secos à temperatura ambiente.

Figura 19 – Grãos do compósito preparados com o traço definido, e secos à temperatura ambiente.

Durante a determinação do traço do compósito, percebeu-se que, quanto maior a força e a pressão manual utilizada durante o amassamento da mistura e a modelagem dos grãos, maior a resistência mecânica e a massa específica do compósito.

Para o aumento da resistência mecânica do compósito, tentou-se secá-los e queimá-los sob temperaturas acima de 100$^{o}$C, assim como foi realizado nos ensaios preliminares com os grãos produzidos somente com lodo. Entretanto, a rápida secagem e a queima sob elevadas temperaturas provocaram a formação de microfissuras internas nos grãos do compósito e a resistência mecânica diminuiu ao invés de aumentar.

Deste modo, definiu-se que os grãos do compósito seriam previamente secos à temperatura ambiente e completamente secos em estufa sob temperaturas menores que 100$^{o}$C.

Com o objetivo de reduzir e controlar a absorção de água dos grãos do compósito, os mesmos foram imersos em óleo de linhaça cozido e secos à temperatura ambiente. Na Figura 20 pode ser observado o momento de imersão dos grãos do compósito em óleo de linhaça cozido.

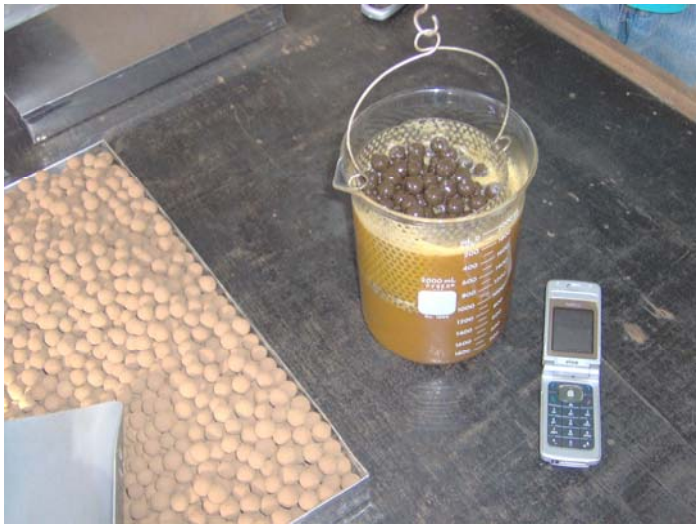


Figura 20 – Imersão dos grãos do compósito em óleo de linhaça cozido.

Foi considerado ideal, o menor período de tempo de imersão dos grãos em óleo de linhaça necessário para estabilizar a resistência mecânica, diminuir a absorção de água e evitar o desmanche dos grãos durante o preparo e a aplicação em argamassas. Por este motivo, foram preparados compósitos com imersão em óleo de linhaça por 30 s, 1 min e 2 min; os mesmos foram secos à temperatura ambiente e aplicados em argamassas de diversas consistências.

Um minuto foi o período de tempo de imersão do compósito em óleo de linhaça considerado ideal.

Na Figura 21 pode ser observada a mistura manual dos grãos do compósito em argamassa após o preparo dos mesmos com imersão em óleo de linhaça e secagem à temperatura ambiente.

Figura 21 – Mistura manual dos grãos do compósito em argamassa após a imersão dos mesmos em óleo de linhaça e secagem à temperatura ambiente.

A quantidade do óleo de linhaça absorvido pelo compósito e utilizado no processo de produção foi medida da seguinte forma: Em um béquer de 35,5 g e 50 mL de volume, inseriu-se 30 mL de linhaça e mediu-se a massa conjunta (béquer + óleo). A seguir, foram adicionados 9 g do compósito em grãos e mediu-se a variação do volume do óleo no béquer em função do tempo. Após a estabilização do volume do óleo no béquer, os grãos do compósito foram retirados e foram medidos o volume final do óleo no béquer e o peso do conjunto (béquer + óleo).

Em agregados graúdos de alta porosidade, o elevado potencial de absorção de água pode ser prejudicial às propriedades do concreto. Para evitar que isso ocorra, sugere-se que os agregados sejam adicionados a mistura somente após o preparo da argamassa ou que estes sejam saturados antes da mistura durante o preparo do concreto (110). Neste trabalho, os grãos do compósito foram adicionados à mistura somente após o preparo da argamassa.

Com o traço do compósito, o período de tempo ideal de imersão dos grãos do compósito em óleo de linhaça e o processo de mistura do compósito no preparo do concreto definidos, foram preparados vários concretos com o compósito para a determinação da relação em massa dos materiais. Os primeiros concretos foram elaborados manualmente, e a relação em massa dos materiais foi definida em função da consistência e da trabalhabilidade dos mesmos. Na Figura 22 pode ser observado o preparo manual do concreto com o compósito.

Figura 22 – Preparo manual do concreto com o compósito.

Tendo os grãos do compósito não mais se desmanchando durante o preparo manual do concreto, testou-se a produção do concreto com o compósito por amassamento em betoneira, e adensamento, utilizando vibrador mecânico. Na Figura 23 pode ser observado o amassamento em betoneira do concreto produzido com o compósito.

Figura 23 – Amassamento em betoneira do concreto com o compósito.

Os grãos do compósito não se desmancharam durante o amassamento em betoneira e o adensamento com vibrador mecânico e, então, este foi o procedimento definido para o preparo dos concretos em estudo.

Na Figura 24 pode ser observado o adensamento do concreto produzido com o compósito sendo realizado com vibrador mecânico. O fato dos grãos do compósito não se desmancharem durante o preparo do concreto utilizando betoneira e vibrador mecânico confirmaram a relação entre os materiais utilizados no preparo do compósito, bem como o período de tempo de imersão dos grãos do compósito em óleo de linhaça.

Figura 24 – Utilização do vibrador mecânico no preparo do concreto com o compósito.

Desse ponto em diante, foram produzidos concretos com o compósito utilizando-se diversas relações entre os materiais.

O resultado de uma tentativa de dosagem do concreto com o compósito, que resultou em concreto de baixíssima resistência à compressão por erro na dosagem dos materiais, pode ser observado na Figura 25.

O concreto apresentado na Figura 25 foi dosado com excesso de grãos do compósito em relação à quantidade de agregado miúdo. A zona de transição do concreto, já enfraquecida pela elevada absorção de água do compósito, enfraqueceu-se ainda mais pela elevada proximidade dos grãos do compósito que foram produzidos com dimensão e forma geométrica praticamente uniforme.

Figura 25 – Resultado de erro de dosagem na produção do concreto com o compósito.

A dosagem do concreto com o compósito somente foi definida quando se conseguiu produzir um concreto com boa consistência, trabalhabilidade e aderência dos grãos à argamassa. A forma de rompimento por compressão axial do concreto, produzido com o compósito na dosagem definida, pode ser observado na Figura 26.

Figura 26 – Corpo-de-prova após ruptura por compressão axial do concreto produzido com o compósito e preparado com a dosagem definida.

O concreto produzido com o compósito foi preparado com substituição total da pedra britada, e a relação em massa entre os materiais cimento, areia, compósito, água foi definida respectivamente igual a 1:2,5:0,67:0,60.

Na Figura 26, observa-se que, o corpo-de-prova do concreto produzido com o compósito, preparado na dosagem definida, rompeu-se por compressão axial em uma linha diagonal, formando um ângulo de aproximadamente 45$^{o}$ com a linha transversal paralela à base do corpo-de-prova. Observa-se também que os grãos do compósito seguiram a mesma linha de rompimento, confirmando a aderência destes à argamassa.

Além da relação entre os materiais, da dimensão máxima característica e da forma geométrica, o compósito foi caracterizado pela massa unitária no estado seco e solto, pela massa específica e pela absorção de água, seguindo os procedimentos e as orientações das normas brasileiras da Associação Brasileira de Normas Técnicas para agregados graúdos.

Na Figura 27 podem ser observados os grãos do compósito imersos em água durante o ensaio de determinação da massa específica e da absorção de água.

Figura 27 – Grãos do compósito imersos em água, durante o ensaio de determinação da massa específica e da absorção de água.

A porosidade, a densidade e o diâmetro médio dos poros do compósito foram determinados por porosimetria de mercúrio seguindo os procedimentos descritos no item 4.2.2 para a determinação destas propriedades da serragem de madeira. O valor obtido para a porosidade do compósito foi comparado ao valor da absorção de água do mesmo, pois estas propriedades estão correlacionadas.

A aderência do lodo da Estação de Tratamento de Água de São Carlos à serragem da madeira *Pinnus elliotti* foi analisada comparando a microscopia eletrônica de varredura da estrutura anatômica da serragem de madeira à microscopia eletrônica de varredura da parte interna do compósito, e comparando a granulometria do lodo ao diâmetro do lúmen da madeira.

A aderência do compósito á argamassa matriz foi analisada por micrografia óptica utilizando um microscópio triocular metalográfico invertido da Marca Opton Modelo TNM-07T-PL conectado a um microcomputador para aquisição e tratamento de imagens digitais. A micrografia foi analisada em campo claro com resolução de 1280 x 1024 pixels e aproximação de 400x. Na Figura 28 pode ser observada a seção de corpo-de-prova cilíndrico de 10 x 20 cm utilizada para a análise da aderência dos grãos do compósito com a argamassa-matriz.

Figura 28 – Seção de corpo-de-prova cilíndrico de 10 x 20 cm utilizada para a análise da aderência do compósito com a argamassa-matriz.

As propriedades do compósito foram comparadas com as propriedades da pedra britada utilizada na produção do concreto-referência.

Com o objetivo de comparar as propriedades e as características do concreto produzido com o compósito com as propriedades e as características de um concreto-referência produzido com pedra britada, procurou-se produzir um concreto-referência de resistência média-baixa (entre 20 e 30 MPa) e consistência aproximadamente igual a do concreto produzido com o compósito. Desta forma, a

relação em massa entre os materiais cimento:areia:pedra-britada:água foi definida respectivamente igual a 1:4,8:5,8:0,8.

## 4.4 Determinação das propriedades físicas e mecânicas dos concretos em estudo

Definidos os traços dos concretos em estudos, estes passaram a ser produzidos para a determinação de suas propriedades mecânicas.

O mesmo aglomerante, o mesmo agregado miúdo e o mesmo procedimento de preparo foi utilizado para os dois tipos de concreto em estudo, com a diferença que, durante o preparo do concreto produzido com o compósito, os grãos do compósito somente foram adicionados a mistura após o preparo da argamassa.

Não foram utilizados aditivos complementares para que os resultados obtidos não fossem vinculados ao uso destes materiais.

A moldagem e a cura dos corpos de prova dos concretos em estudo foram realizadas seguindo os procedimentos e as especificações da NBR 5738:1994 (111). A seguir, foram determinadas as propriedades mecânicas dos concretos, seguindo as especificações das seguintes normas: a consistência pelo abatimento do tronco de cone determinada pela NBR 7223:1982 (112), a resistência à compressão axial determinada pela NBR 5739:1994 (113), a resistência à tração por compressão diametral determinada pela NBR 7222:1983 (114), a absorção, o índice de vazios e a massa específica determinada pela NBR 9778:2005 (115), e os módulos de elasticidade e deformação determinados pela NBR 8522:2003 (116).

O abatimento do tronco de cone de concreto foi determinado pelo valor da distância entre o plano correspondente à base superior do tronco de cone e o centro da base superior da amostra abatida. A determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone pode ser observada na Figura 29.

Figura 29 – Determinação da consistência dos concretos em estudo pelo abatimento do tronco de cone.

A resistência à compressão axial foi obtida dividindo-se a carga de ruptura pela área da seção transversal do corpo-de-prova. Neste trabalho somente foram utilizados corpos-de-prova cilíndricos de 10 x 20 cm. A partir do valor médio da resistência à compressão obtida foram determinados os níveis de carregamento para a determinação dos módulos de elasticidade e deformação secante.

Aos corpos-de-prova dos concretos em estudo foram fixados medidores de deformação e os corpos-de-prova foram pressionados por compressão uniaxial em prensa digital. A partir dos valores obtidos para deformação e tensão foi determinado o diagrama tensão-deformação, a partir do qual foi determinado o módulo de elasticidade e o módulo de deformação secante.

Na Figura 30 pode ser observado um corpo-de-prova cilíndrico de concreto preparado para o ensaio de determinação dos módulos de elasticidade e deformação secante. O módulo de elasticidade foi determinado pelo coeficiente angular da reta que passa pelos pontos correspondes a 0,5 MPa e 30% da tensão de ruptura. O modulo de deformação secante foi determinado pelo coeficiente angular da reta que passa pelos pontos correspondentes a 0,5 MPa e à tensão de ruptura.

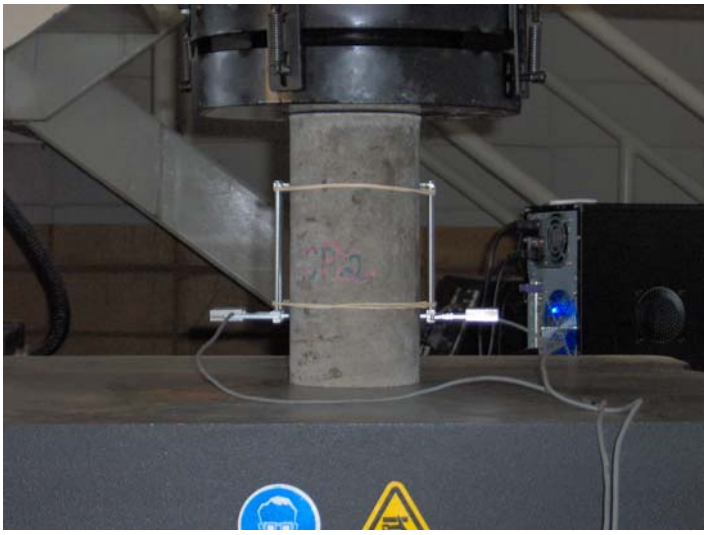


Figura 30 – Corpo-de-prova cilíndrico de concreto preparado para o ensaio de determinação dos módulos de elasticidade e deformação.

Na Figura 31 pode ser observado o corpo-de-prova cilíndrico de concreto sendo preparado para o ensaio de determinação da tração por compressão diametral.

Figura 31 – Corpo-de-prova cilíndrico de concreto sendo preparado para o ensaio de determinação da tração por compressão diametral.

A resistência à tração por compressão diametral foi calculada pela Equação 16,

$$F_{t,D} = 2.F / \pi.d.l \qquad (16)$$

onde:

$F_{t,D}$ = resistência à tração por compressão diametral, expressa em MPa, com aproximação de 0,05;

F = carga máxima obtida no ensaio;

d = diâmetro do corpo-de-prova;

l = altura do corpo de prova.

Para a determinação da absorção de água, do índice de vazios e da massa específica dos concretos em estudo, um corpo-de-prova cilíndrico de concreto completamente seco em estufa à temperatura 105±5$^{o}$C foi imerso em água à temperatura de 23±2$^{o}$C por 72 h e medida a sua massa nas condições seca, saturada e imersa em água. Na Figura 32 pode ser observado um corpo-de-prova cilíndrico de concreto imerso em água durante o ensaio de determinação da absorção de água e da massa específica.

Figura 32 – Corpo-de-prova cilíndrico de concreto imerso em água durante o ensaio de determinação da absorção de água e da massa específica.

A absorção de água dos concretos em estudo foi calculada pela Equação 17,

$$A = [(m_{sat} - m_s) / m_s].100 \quad (17)$$

onde:

A = absorção de água, em porcentagem;

$m_{sat}$ = massa do corpo-de-prova saturado;

$m_s$ = massa da corpo-de-prova seco em estufa.

O índice de vazios ou relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra foi calculada através da Equação 18,

$$I_v = [(m_{sat} – m_s)/(m_{sat} – m_i)].100 \quad (18)$$

onde:

$I_v$ = índice de vazios, em porcentagem;

$m_{sat}$ = massa do corpo-de-prova saturado;

$m_s$ = massa da corpo-de-prova seco em estufa;

$m_i$ = massa do corpo-de-prova imerso em água.

A massa específica real ou relação entre a massa do material seco e o seu volume, excluindo os poros permeáveis foi calculada pela Equação 19,

$$\rho_r = m_s/(m_s – m_i) \quad (19)$$

onde:

$\rho_r$ = massa específica real;

$m_s$ = massa do corpo-de-prova seco em estufa;

$m_i$ = massa do corpo-de-prova imerso em água.

A massa específica seca ou relação entre a massa do material seco e o seu volume total, incluindo os poros permeáveis e impermeáveis foi calculada pela Equação 20,

$$\rho_s = m_s/(m_{sat} – m_i) \quad (20)$$

onde:

$\rho_s$ = massa específica do corpo-de-prova seco;

$m_s$ = massa do corpo-de-prova seco em estufa;

$m_{sat}$ = massa do corpo-de-prova saturado;

$m_i$ = massa do corpo-de-prova imerso em água.

A massa específica do corpo-de-prova saturado ou relação entre a massa do material saturado e o seu volume total, incluindo os poros permeáveis e impermeáveis foi calculada pela Equação 21,

$$\rho_{sat} = m_{sat}/(m_{sat} - m_i) \quad (21)$$

onde:

$\rho_{sat}$ = massa específica do corpo de prova saturado;

$m_{sat}$ = massa do corpo de prova saturado;

$m_i$ = massa do corpo de prova imerso em água.

As propriedades mecânicas do concreto produzido com o compósito foram comparadas com as respectivas propriedades mecânicas do concreto referência produzido com pedra britada.

## 4.5 Determinação de propriedades térmicas dos concretos em estudo

As propriedades térmicas dos concretos em estudo foram determinadas através do Método do Fio Quente Paralelo. O Método do Fio Quente Paralelo consiste no cálculo da condutividade térmica a partir do gradiente de temperatura gerado por uma fonte de calor considerada ideal, infinitamente longa e fina em um meio material de dimensões consideradas infinitas.

Para a realização do ensaio experimental, foram preparados, para cada concreto em estudo, três corpos-de-prova prismáticos de 120 mm de largura, 230 mm de comprimento e 120 mm de altura. Os corpos-de-prova foram moldados em formas de madeira compensada construídos especialmente para esta finalidade sobre mesa vibratória.

Como apresentado na Figura 33, foram posicionados dois fios em paralelo através das fôrmas dos corpos-de-prova: um Fio Quente Central (Resistência Khantal DS) e um Fio Termopar Tipo K (Cromel-Alumel) posicionado a uma distância do Fio Quente Central igual a dezesseis milímetros.

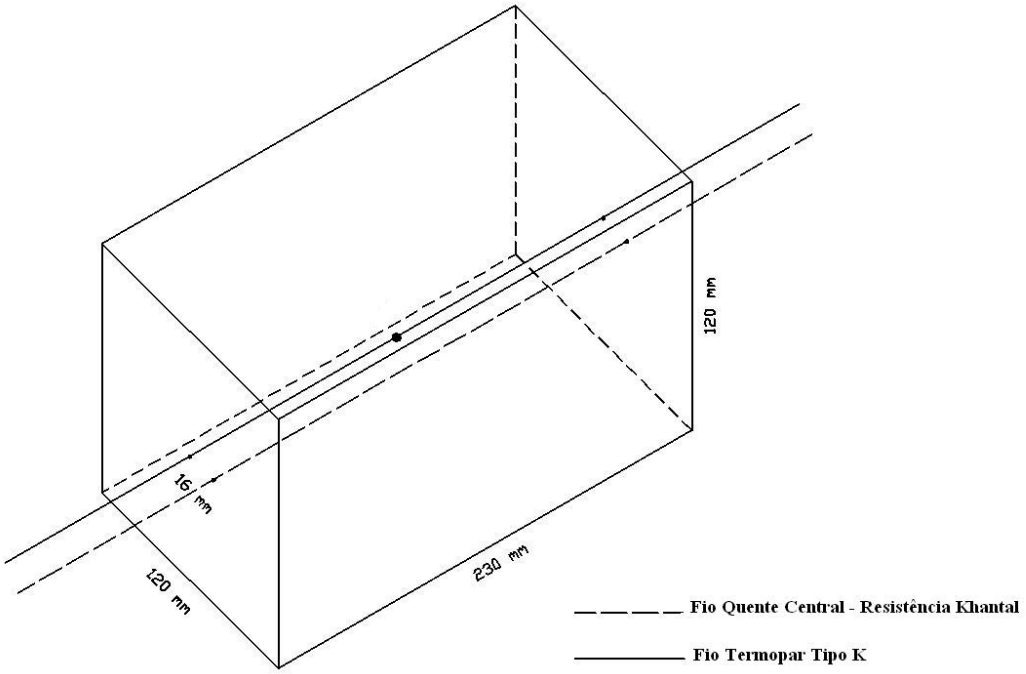



Figura 33 – Posicionamento dos fios para a determinação das propriedades térmicas dos concretos em estudo pelo Método do Fio Quente Paralelo.

O Fio Termopar foi montado por sondagem tipo MIG (Metal Inert Gas), protegida por gás inerte; no caso, o gás argônio. Os fios foram posicionados antes da moldagem e foram presos por conectores até a desforma.

O concreto dosado e preparado com a consistência desejada foi colocado nas fôrmas de madeira e adensado na mesa vibratória por aproximadamente trinta segundos. Na Figura 34 pode ser observada a colocação do concreto nas fôrmas de madeira sobre a mesa vibratória.

Depois de vibrados, os corpos-de-prova foram cobertos por plásticos para evitar a secagem rápida. A seguir, foram deixados ao ar livre e à temperatura ambiente por vinte e quatro horas até a desforma.

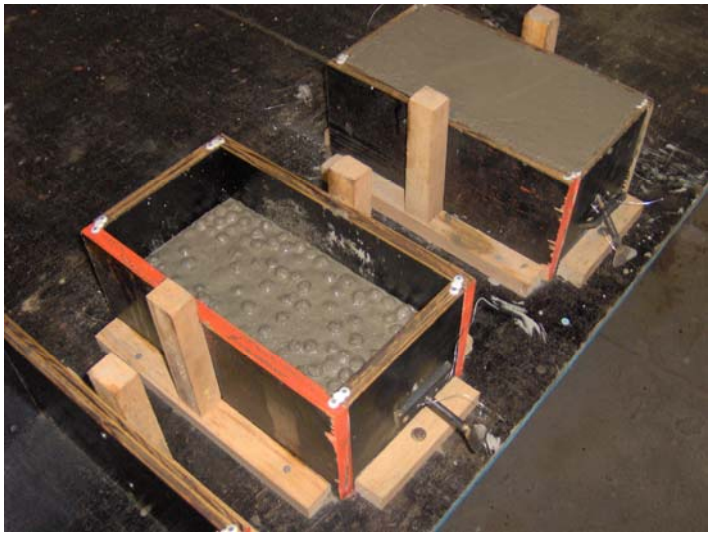


Figura 34 – Colocação do concreto nas fôrmas de madeira sobre a mesa vibratória.

Após a desforma, os corpos-de-prova foram acondicionados por 7 dias em câmera úmida com umidade relativa do ar de 95% e temperatura de 25±2$^{o}$C. Para aproximar o teor de umidade dos corpos-de-prova às condições reais de aplicação do concreto, após este período, os corpos-de-prova foram expostos às condições ambientais do laboratório (temperatura de 25±4$^{o}$C e umidade relativa do ar de 50± 10$^{o}$C).

O ensaio de condutividade térmica foi realizado após 90 dias do preparo do concreto e, no dia da realização do ensaio, um corpo-de-prova de cada concreto dosado foi colocado em estufa e medido a sua umidade, pois a umidade é uma característica que exerce influência sobre a condutividade térmica do material e, portanto, de extrema importância para análise dos resultados.

O *software* desenvolvido especialmente para a determinação das propriedades térmicas pelo método do fio quente paralelo solicita inicialmente os seguintes dados preliminares para a execução do ensaio: nome da amostra, nome do interessado, tipo de material (isolante ou não), tempo de ensaio (min), temperatura ambiente e da amostra ($^{o}$C), tipo de termopar, resistência do fio (Ω), densidade da amostra (kg/m$^{3}$) e distância fio termopar (m).

As propriedades térmicas do material foram obtidas através da aplicação de uma corrente elétrica contínua no Fio Quente e da medição da variação da temperatura do material com o auxílio do Termopar. Com esse método é possível medir condutividades térmicas até aproximadamente 25 W/m.K. Na Figura 35 pode

ser observado o corpo-de-prova preparado para a aplicação da corrente elétrica contínua no Fio Quente Central.

Figura 35 – Corpo-de-prova preparado para a aplicação da corrente elétrica contínua no Fio Quente Central.

Os resultados obtidos de condutividade térmica, calor específico e difusividade térmica para os concretos produzidos com o compósito foram comparados com os resultados obtidos para os concretos convencionais, e os valores experimentais foram comparados com os encontrados na literatura, apresentados no Capítulo 3, item 3.5.3, referentes a concretos produzidos com argila expandida e concretos convencionais.

## 4.6 Determinação da deterioração dos concretos em estudo por abrasão

Neste trabalho, a durabilidade dos concretos em estudo foi avaliada sob a ação da causa física de deterioração denominada desgaste superficial por abrasão.

No Brasil não existem normas para avaliar a resistência à abrasão do concreto. A ASTM C779 (117) descreve três métodos opcionais para testar a resistência à abrasão relativa de superfícies horizontais de concreto. No teste à abrasão por bolas de aço, a carga é aplicada a uma cabeça rotativa contendo bolas de aço, enquanto o material desgastado é removido por água corrente; no teste de

rodas desbastadoras, a carga é aplicada através de rodas desbastadoras de aço rotativas, e no teste do disco giratório, discos giratórios de aço são utilizados com um abrasivo de carboneto de silício.

Neste trabalho, a resistência à abrasão dos concretos em estudo foi determinada utilizando o teste do disco giratório, seguindo os procedimentos e as orientações da ASTM C704 (118). Para este ensaio foram preparados três corpos-de-prova de cada tipo de concreto em estudo. Os corpos-de-prova foram especialmente preparados para este ensaio em fôrmas de madeira de (4,5 / 11,5 / 11,5) cm e foram adensados em mesa vibratória por aproximadamente 20 segundos. Na Figura 36 podem ser observados os corpos-de-prova de concreto sendo preparados em fôrmas de madeira sob mesa vibratória para ensaio de resistência à abrasão.

Figura 36 – Corpos-de-prova de concreto preparados em fôrmas de madeira sob mesa vibratória para ensaio de resistência à abrasão.

O ensaio experimental foi realizado no Laboratório de Materiais Cerâmicos do Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, utilizando o Erosímetro SOLOTEST Série 1183 apresentado na Figura 37.

Figura 37 – Erosímetro SOLOTEST Série 1183 utilizado na determinação da resistência à abrasão dos concretos em estudo.

O ensaio de resistência à abrasão foi realizado á temperatura ambiente utilizando 1 kg de carboneto de silício, distância do bico ejetor aos corpos-de-prova de 15 cm, pressão do vácuo de 400 mm de mercúrio e pressão interna de 500 mm de água. O período de tempo de desgaste foi especificado em 7 min e 25 s e o grau de desgaste foi medido em termos de perda de massa no período de tempo especificado. O grau de desgaste obtido com o concreto produzido com o compósito foi comparado com o obtido com o concreto-referência.

## 4.7 Classificação dos resíduos dos concretos em estudo em função do risco potencial ao meio ambiente

O desempenho ecológico do concreto produzido com o compósito foi verificado em função do seu risco potencial ao meio ambiente e à saúde pública. Para tanto, o mesmo foi classificado de acordo com os procedimentos definidos pela

norma técnica da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT a NBR 10004:2004 (11), procedimentos revisados no capítulo 3, item 3.2.

A eco-eficiência ou desempenho ecológico do compósito como agregado graúdo em concreto foi analisado comparando a classificação do resíduo do concreto produzido com o compósito com a classificação do resíduo do concreto-referência, e comparando a forma como os resíduos base do compósito são dispostos no meio ambiente, com a forma como os resíduos de concreto são dispostos.

A reciclagem do lodo de estação de tratamento de água e da serragem de madeira através da produção do compósito não foi comparada com outras alternativas de reciclagem, pois este não era o objetivo deste trabalho.

Com base na composição dos materiais, a classificação foi realizada através da determinação da concentração dos metais, alumínio, ferro e chumbo, nos extratos lixiviados e solubilizados dos concretos em estudo.

### 4.7.1 Determinação do extrato lixiviado dos concretos em estudo

Inicialmente, uma amostra do concreto produzido com o compósito foi coletada e triturada até que suas partículas passassem na peneira de malha de 9,5 mm; condição que, de acordo com a NBR 10005:2004 (12), a amostra se apresenta pronta para a etapa de extração.

A seguir, foi escolhida a solução de extração a ser utilizada no processo de lixiviação. Para tanto, foram colocados em um béquer 5,0 g da amostra triturada e 96,5 mL de água deionizada. Cobriu-se o béquer com um vidro de relógio e agitou-se a mistura vigorosamente por 5 minutos com um agitador magnético e mediu-se o pH da mistura. Na Figura 38 pode ser observado o agitador magnético micro química MQAMA 301 utilizado no preparo da solução de extração.

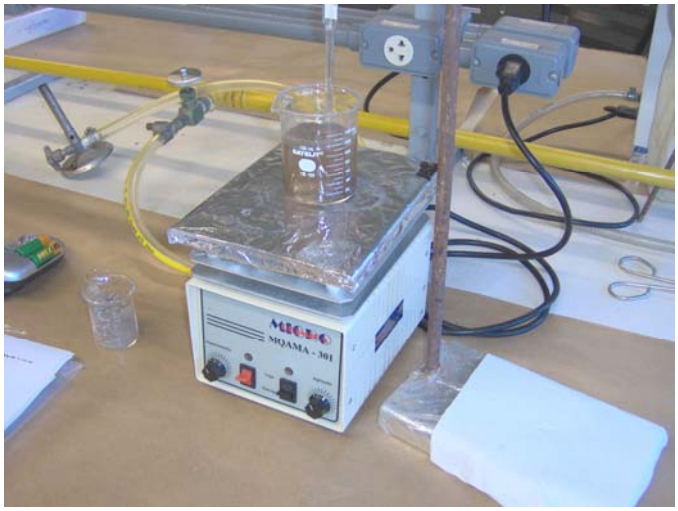



Figura 38 – Agitador magnético micro química MQAMA 301 utilizado no preparo da solução de extração.

Se o valor do potencial hidrogeniônico da mistura fosse menor do que 5,0, seria utilizada a solução de extração número 1: uma solução com pH de 4,93 ± 0,05 composta por 5,7 mL de ácido acético glacial, 64,3 mL de NaOH 1,0 N e água destilada, deionizada e isenta de orgânicos até o volume de 1L. Na Figura 39 pode ser observado o pHmetro UltraBasic da Denver Instrument utilizado na medição dos potenciais hidrogeniônicos.

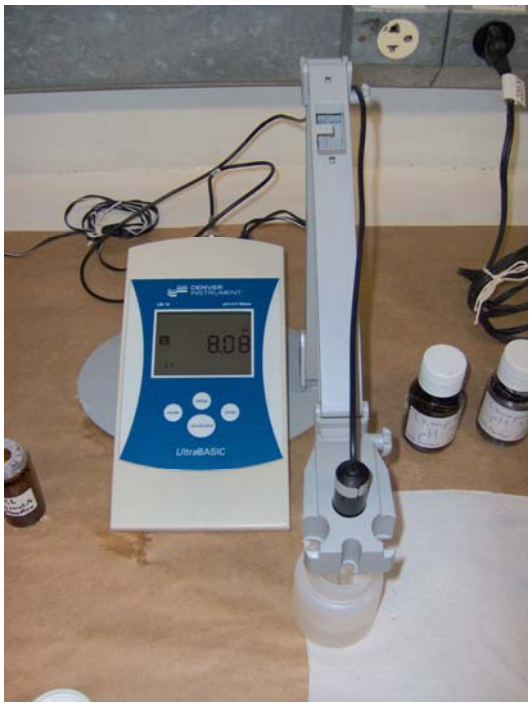



Figura 39 – pHmetro UltraBasic utilizado na medição do pH da solução de extração.

Se o valor do pH da mistura fosse maior do que 5,0, seria adicionada à mistura 3,5 mL de HCl 1N, a mesma seria homogeneizada, coberta com vidro de relógio, aquecida a 50$^{o}$C durante 10 min, esfriada e teria o seu pH medido novamente.

Se o valor do pH desta nova solução fosse menor ou igual 5,0, seria utilizada a solução de extração nº 1. Caso contrário, utilizar-se-ia a solução de extração nº 2: uma solução com pH de 2,88 $\pm$ 0,05 composta por 5,7 mL de ácido acético glacial, água destilada, deionizada e isenta de orgânicos até completar 1L.

O procedimento descrito foi realizado e a solução de extração escolhida foi a solução de extração n$^{o}$ 2.

Determinada a solução de extração, transferiu-se 100 $\pm$ 0,1 g da amostra para um frasco de lixiviação de material inerte. Adicionou-se ao frasco a quantidade de solução de extração equivalente a 20 vezes a massa da amostra, fechou-se o frasco utilizando fita de politetrafluoretileno para evitar vazamento e agitou-se o frasco por 18 $\pm$ 2 h à uma temperatura de 25ºC usando um agitador rotatório com rotação de 30 $\pm$ 2 rpm.

A solução obtida foi filtrada com membrana filtrante de 0,20 $\mu$m de porosidade, teve seu pH determinado e foi definida como o extrato lixiviado do resíduo. Na Figura 40 pode ser observado o aparato utilizado na filtração da solução.

Figura 40 – Aparato utilizado na filtração da solução de extração.

O mesmo procedimento foi realizado para a obtenção do extrato lixiviado do concreto convencional referência, com a diferença de que a solução de extração escolhida foi a de número 1.

### 4.7.2 Determinação do extrato solubilizado dos concretos em estudo

Inicialmente uma amostra do concreto produzido com o compósito foi coletada e triturada até que suas partículas passassem na peneira de malha de 9,5 mm. Uma amostra do concreto produzido com o compósito na forma de partículas com dimensões menores que 9,5 mm pode ser observada na Figura 41.

Figura 41 – Amostra do concreto produzido com o compósito na forma de partículas com dimensões menores que 9,5 mm.

A amostra passada na peneira de malha 9,5 mm foi seca em estufa à temperatura de 42$^{o}$C e, a seguir, colocada a quantia representativa de 250 g em um frasco de 1.500 mL. Ao frasco de 1.500 mL contendo 250 g da amostra do resíduo adicionou-se 1.000 mL de água destilada, deionizada e isenta de orgânicos. O frasco foi agitado manualmente em baixa velocidade por 5 minutos, coberto com filme de PVC e deixado em repouso por 7 d em temperatura de até 25$^{o}$C. Após 7 d em repouso, a solução foi filtrada com membrana filtrante de 0,20 $\mu$m de porosidade, teve seu pH medido e foi definida como o extrato solubilizado do resíduo. O mesmo

procedimento foi realizado para a obtenção do extrato solubilizado do concreto referência.

### 4.7.3 Determinação da concentração de metais nos extratos lixiviados e solubilizados dos concretos em estudo, e classificação dos resíduos

Alíquotas dos extratos lixiviados e solubilizados dos concretos em estudo foram retiradas e a concentração dos metais (alumínio, ferro e chumbo) foi determinada em expectrômetro de emissão óptica com plasma induzido, modelo VISTA, da marca Varian. O ensaio experimental foi realizado no Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais da Universidade Federal de São Carlos.

A classificação dos resíduos foi realizada comparando a concentração dos metais nos extratos lixiviados com os valores limites máximos fixados no anexo F da NBR 10004:2004 (11), e comparando a concentração dos metais nos extratos solubilizados com os valores limites máximos fixados no anexo G desta mesma norma.

# Capítulo 5

# RESULTADOS

Neste capítulo estão apresentados os resultados das análises descritas no Capitulo 4 – Materiais e Métodos.

## 5.1 Propriedades e características do lodo da Estação de Tratamento de Água de São Carlos

Na Tabela 02 podem ser observados os valores das propriedades e características físico-químicas do lodo da Estação de Tratamento de Água de São Carlos, o qual caracteriza-se por apresentar: elevada concentração de sólidos totais pelo fato dos decantadores serem lavados trimestralmente; e elevada concentração de alumínio porque a estação utiliza sulfato de alumínio como coagulante.

A fase sólida do lodo seco e moído caracterizou-se por apresentar dimensão máxima característica de 0,6 milímetros. O teor de matéria orgânica no lodo medido segundo a NBR 13600:1996 (96) foi igual a 28,74%.

O lodo da Estação de Tratamento de Água de São Carlos seco e moído caracterizou-se por apresentar limite de liquidez determinado segundo a NBR 6459:1984 (97) igual a 66% e limite de plasticidade determinado segundo a NBR 7180 (98) igual a 48%. Portanto, índice de plasticidade igual a 18%.

Na Tabela 09 podem ser observados os resultados da análise granulometria do lodo seco e moído realizado por sedimentação sem aplicação de defloculante.

Tabela 09 – Resultado da análise granulométrica do lodo seco e moído realizada por sedimentação sem aplicação de defloculante.

| Diâmetro do grão (mm) | Grãos com diâmetro menor (%) |
|---|---|
| 4,76 | 100 |
| 2 | 100 |
| 1,19 | 99,71 |
| 0,42 | 95,1 |
| 0,25 | 91,72 |
| 0,149 | 86,82 |
| 0,074 | 81,77 |
| 0,1008 | 60,17 |
| 0,0683 | 57,01 |
| 0,0487 | 53,21 |
| 0,0347 | 49,72 |
| 0,0248 | 44,97 |
| 0,0168 | 44,97 |
| 0,0123 | 43,07 |
| 0,0088 | 36,42 |
| 0,0065 | 12,67 |
| 0,0047 | 8,87 |
| 0,003 | 7,92 |
| 0,0023 | 6,97 |

A partir dos resultados da Tabela 09, pode-se afirmar que o lodo foi utilizado na produção do compósito com grãos de diâmetro menor que 2 mm.

## 5.2 Propriedades e características da madeira *Pinnus elliott*i

A Tabela 10 contém os resultados do ensaio de determinação do teor de umidade da serragem de madeira *Pinnus elliotti* utilizada neste trabalho no desenvolvimento e na produção do compósito. O teor de umidade da serragem de

madeira foi determinado através da relação percentual entre a massa de uma amostra de serragem antes e de após secagem em estufa a temperatura de 105±5$^{o}$C.

Tabela 10 – Resultados do ensaio de determinação do teor de umidade de umidade da serragem de madeira.

| Amostra | Serragem | Serragem + Cápsula | | Teor de Umidade |
|---|---|---|---|---|
| | | Antes da Secagem | Após Secagem | |
| | (kg) | (kg) | (kg) | (%) |
| 1 | 0,100 | 0,799 | 0,788 | 11,00 |
| 2 | 0,100 | 1,050 | 1,039 | 11,00 |
| 3 | 0,100 | 1,037 | 1,025 | 12,00 |
| 4 | 0,100 | 1,049 | 1,037 | 12,00 |
| 5 | 0,100 | 1,050 | 1,038 | 12,00 |
| Média | – | – | – | 11,60 |
| Desvio Padrão | – | – | – | 0,55 |

A Tabela 11 contém os resultados do ensaio experimental de porosimetria de mercúrio utilizado na determinação da densidade, da porosidade e do diâmetro médio dos poros da madeira.

Tabela 11 – Propriedades e características da serragem de madeira determinadas por porosimetria de mercúrio.

| Propriedades e características | Serragem de madeira |
|---|---|
| Volume total de intrusão de mercúrio (mL/g) | 0,241 |
| Densidade básica (mL/g) | 0,507 |
| Densidade aparente (mL/g) | 0,577 |
| Porosidade (%) | 12,22 |
| Diâmetro médio dos poros (μm) | 17,816 |
| Poro de diâmetro médio (μm) | 0,0081 |

A serragem de madeira *Pinnus elliotti* caracterizou-se por apresentar teor de umidade de 11,6% e porosidade de 12,22%.

Na Tabela 12 pode ser observada a variação do diâmetro dos poros da serragem de madeira em função da pressão aplicada para intrusão de mercúrio. Todos os valores obtidos neste ensaio podem ser observados na Tabela 01 do Apêndice A.

Tabela 12 – Variação do diâmetro dos poros da serragem de madeira em função da pressão aplicada para intrusão de mercúrio.

| **Pressão (psia)** | **Diâmetro Poro (µm)** | **Diâmetro Médio (µm)** | **Volume Cumulativo (mL/g)** | **Volume Incremental (mL/g)** | **Log. Dif. Vol. dV/dlogD mL/g** |
|---|---|---|---|---|---|
| 0,57 | 316,3788 | 316,3788 | 0,0000 | 0,0000 | 7,3200E-02 |
| 1,59 | 114,0733 | 122,5430 | 0,0380 | 0,0050 | 7,9120E-02 |
| 2,96 | 61,0509 | 64,1827 | 0,0554 | 0,0025 | 5,6020E-02 |
| 5,61 | 32,2519 | 34,5001 | 0,0716 | 0,0045 | 1,0400E-01 |
| 11,11 | 16,2842 | 17,2239 | 0,1294 | 0,0108 | 2,2490E-01 |
| 179,63 | 1,0069 | 1,1091 | 0,2247 | 0,0012 | 1,3730E-02 |
| 210,46 | 0,8594 | 0,9331 | 0,2256 | 0,0009 | 1,1300E-02 |
| 349,30 | 0,5178 | 0,5617 | 0,2273 | 0,0003 | 5,7230E-03 |
| 449,80 | 0,4021 | 0,4264 | 0,2279 | 0,0002 | 3,2250E-03 |
| 599,63 | 0,3016 | 0,3320 | 0,2282 | 0,0003 | 2,7100E-03 |
| 798,46 | 0,2265 | 0,2429 | 0,2284 | 0,0001 | 1,1360E-03 |
| 897,13 | 0,2016 | 0,2141 | 0,2285 | 0,0001 | 6,3000E-04 |
| 1146,80 | 0,1577 | 0,1695 | 0,2285 | 0,0000 | 0,0000E+00 |

A Figura 42 contém a curva cumulativa e logarítmica diferencial do volume de intrusão de mercúrio em função do diâmetro dos poros da serragem de madeira.

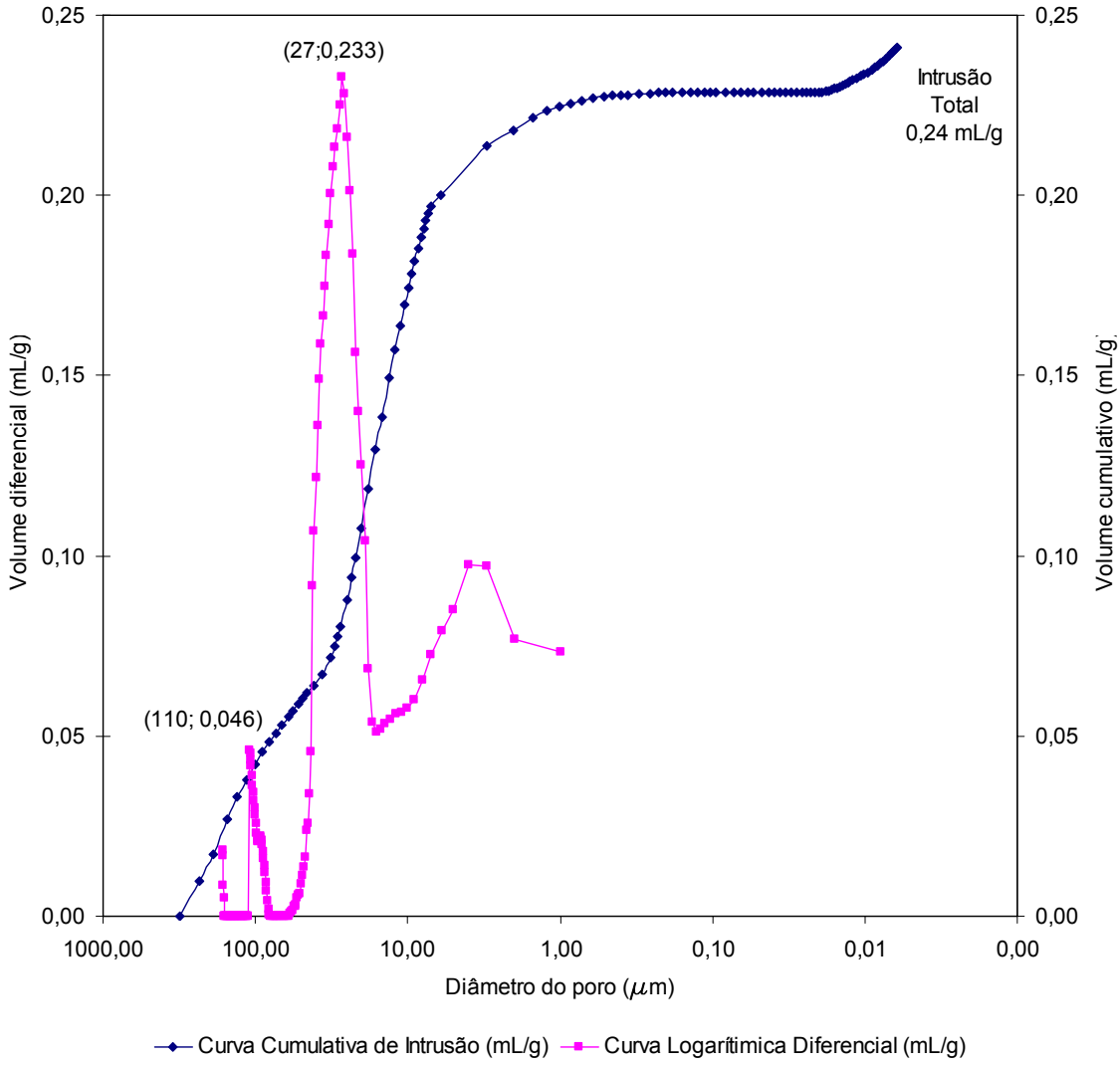
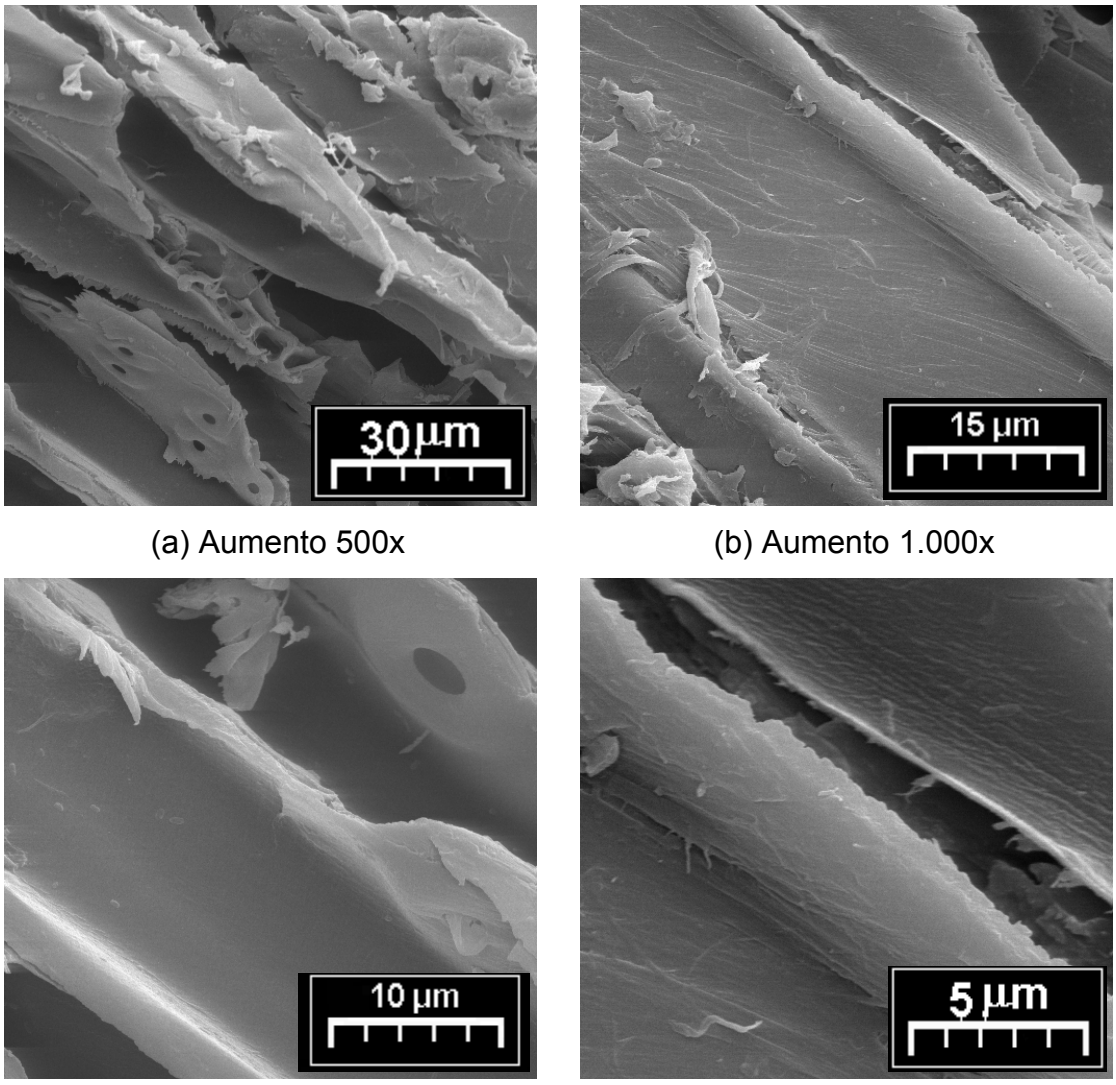



Figura 42 – Curva cumulativa e logarítmica diferencial do volume de intrusão do mercúrio em função do diâmetro dos poros da serragem de madeira.

As Figuras 43 e 44 contêm imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura utilizadas na determinação da estrutura anatômica da serragem da madeira *Pinnus elliotti*.

As fibras da serragem de madeira apresentadas nestas imagens estão íntegras e não apresentam dilacerações. É possível visualizar pontuações areoladas nas superfícies das fibras, denotando que as mesmas apresentam-se em estado seco. Não existem sinais de degradação e biodeterioração.



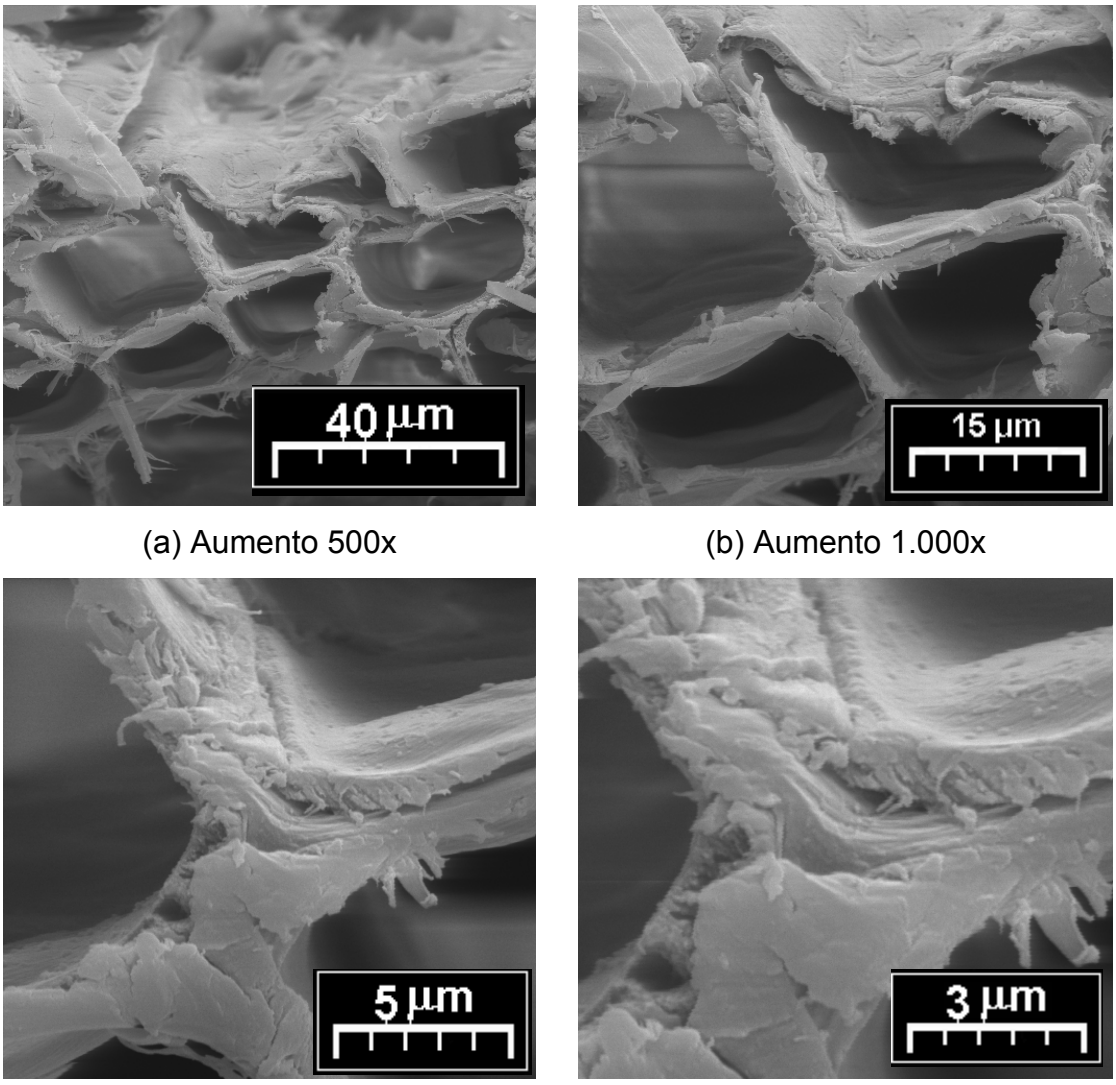

(a) Aumento 500x (b) Aumento 1.000x

(c) Aumento de 1.500x (d) Aumento de 3.000x

Figura 43 – Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura utilizadas na determinação do comprimento e espessura das fibras da serragem de madeira *Pinnus elliotti*.

A partir da Figura 43 (a) – Aumento de 500x, pode-se determinar que as fibras da serragem de madeira utilizada apresentam comprimento aproximado de 3,10 mm.

A partir da Figura 43 (c) – Aumento de 1.500x, pode-se determinar que as fibras da serragem de madeira utilizada apresentam largura aproximada de 45,0 µm.




(a) Aumento 500x (b) Aumento 1.000x

(c) Aumento 3.000x (d) Aumento 5.000x

Figura 44 – Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura utilizadas na determinação do diâmetro do lúmen e da espessura da parede celular da serragem de madeira *Pinnus elliotti*.

A partir da Figura 44 (b) – Aumento de 1.000x, pode-se determinar que serragem de madeira utilizada apresentam lúmens de aproximadamente 23,0 µm.

A partir da Figura 44 (c) – Aumento de 3.000x, pode-se determinar que as serragem de madeira utilizada apresentam espessura da parede celular de aproximadamente 5,0 µm.

Tabela 13 – Densidade básica e dimensões médias das fibras da serragem da madeira *Pinnus elliotti* utilizada na produção do compósito.

| **Propriedades e características** | **Madeira *Pinnus elliotti*** |
|---|---|
| Densidade básica (g/cm$^3$) | 0,507 |
| Comprimento da fibra (mm) | 3,10 |
| Largura da fibra (µm) | 45,00 |
| Diâmetro do lúmen (µm) | 23,00 |
| Espessura da parede celular (µm) | 5,00 |

Comparando os valores da Tabela 13 com os encontrados na literatura, apresentados nas Tabelas 03 e 04, é possível afirmar que a serragem empregada possui características que a caracterizam como serragem de madeira de *Pinnus elliotti* de lenho juvenil e adulta. Resultado que ratifica as observações verificadas quando da coleta da serragem, pois a mesma possuía procedência não definida em relação à posição do diâmetro no lenho.

### 5.3 Propriedades e características do óleo de linhaça cozido

A Tabela 14 contém as propriedades e características do óleo de linhaça cozido utilizado. Dados fornecidos pelo fabricante.

Tabela 14 – Propriedades e características do óleo de linhaça cozido.

| **Óleo de linhaça cozido** | **ABOISSA Óleos Vegetais** |
|---|---|
| **Propriedades e características** | **Limites** |
| Umidade – Perda por aquecimento a 105±5$^o$C | ≤ 0,2% |
| Cor Gardner | ≤ 14 |
| Ácidez (% AGL com ácido oléico) | ≤ 3,00% |
| Índice de iodo (GL/100GA) | ≥ 170 |
| Índice de refração | ≥ 1.479 |

(Continua)

(Continuação)

| Óleo de linhaça cozido<br>Propriedades e características | ABOISSA Óleos Vegetais<br>Limites |
|---|---|
| Densidade à temperatura 25°C (kg/m$^3$) | 926 – 931 |
| Viscosidade Gardner | A |
| Índice de saponificação (mg.KOH/g) | 188 - 196 |
| Insaponificável (%) | ≤ 1,5% |
| Tempo de secagem sobre superfície de vidro | ≤ 18 h |

Fonte: Aboissa (121).

## 5.4 Propriedades e características do cimento Portland de alta resistência inicial

Na Tabela 15 podem ser observadas as propriedades e as características físicas e químicas do CPV-ARI Plus fornecidas pelo fabricante comparadas aos limites estabelecidos pela NBR 5733:1991 (99).

Tabela 15 – Propriedades e características do Cimento Portland CPV-ARI-Plus comparados aos limites estabelecidos pela NBR 5733:1991 (99).

| Propriedades e características<br>CPV-ARI-Plus | Valores | | | Limite<br>NBR 5733:1991 |
|---|---|---|---|---|
| | Médio | Máximo | Mínimo | |
| Finura (%) | 2,71 | 3,70 | 2,00 | ≤ 6 |
| Superfície Específica Blaine (cm$^2$/g) | 4655 | 4739 | 4521 | ≥ 3000 |
| Água de Consistência (%) | 30,0 | 31,2 | 29,0 | – |
| Início de Pega (min) | 148 | 165 | 130 | ≥ 60 |
| Fim de Pega (min) | 198 | 225 | 180 | ≤ 600 |
| Resistência à compressão 01d (MPa) | 30,30 | 33,60 | 28,30 | ≥ 14 |
| Resistência à compressão 03d (MPa) | 42,00 | 44,20 | 40,50 | ≥ 24 |

(Continua)

(Continuação)

| Propriedades e características CPV-ARI-Plus | Valores | | | Limite NBR 5733:1991 |
|---|---|---|---|---|
| | Médio | Máximo | Mínimo | |
| Resistência à compressão 07d (MPa) | 46,3 | 49,4 | 44 | ≥ 34 |
| Resistência à compressão 28d (MPa) | 54,6 | 55,3 | 54,1 | – |
| Perda ao Fogo à 500°C (%) | 0,8 | 1 | 0,55 | – |
| Perda ao Fogo à 1000°C (%) | 3,32 | 3,78 | 2,69 | ≤ 4,5 |
| Resíduo Insolúvel (%) | 0,45 | 0,63 | 0,34 | ≤ 1,5 |
| $SiO_2$ (%) | 18,85 | 19,11 | 18,64 | – |
| $Al_2O_3$ (%) | 5,06 | 5,14 | 4,98 | – |
| $Fe_2O_3$ (%) | 2,95 | 3,07 | 2,86 | – |
| CaO (%) | 63,93 | 64,03 | 63,79 | – |
| MgO (%) | 1,02 | 2,54 | 0,64 | – |
| $SO_3$ (%) | 2,72 | 2,74 | 2,68 | ≤ 4,5 |
| $CO_2$ (%) | 1,80 | 2,40 | 1,14 | ≤ 3,0 |
| $K_2O$ (%) | 0,76 | 0,85 | 0,60 | – |
| Aluminato Tricálcico no Clínquer (%) | 7,70 | 8,10 | 7,20 | – |

Observação: Valores médio, máximo e mínimo fornecidos em 25/08/2007 pela fábrica Ciminas através do assessor técnico Eng. Silvio Pereira Diniz Filho.

Todos os valores fornecidos pelo fabricante estiveram dentro dos limites estabelecidos pela NBR 5733:1991 (99).

A Tabela 16 contém os valores obtidos no ensaio experimental de determinação da resistência a compressão segundo a NBR 7215:1996 (100), comparados aos valores fornecidos pelo fabricante do CPV-ARI-Plus e aos limites estabelecidos pela NBR 5733:1991 (99).

Os valores de resistência à compressão obtidos no ensaio experimental foram próximos aos valores fornecidos pelo fabricante, fato que ratifica a utilização do cimento.

Tabela 16 – Valores obtidos no ensaio experimental de determinação da resistência à compressão segundo a NBR 7215:1996 (100), comparados aos valores fornecidos pelo fabricante do CPV-ARI-Plus e aos limites estabelecidos pela NBR 5733:1991 (99).

| Dias de Cura | Resistência à Compressão (MPa) | | |
|---|---|---|---|
| | Ensaio experimental | Fábrica Ciminas | Limite NBR 5733:1991 |
| 01 | 29,8 | 30,3 | ≥ 14 |
| 03 | 40,4 | 42,0 | ≥ 24 |
| 07 | 44,6 | 46,3 | ≥ 34 |

Os valores obtidos no ensaio experimental de determinação da resistência à compressão segundo a NBR 7215:1996 (100) foram muito próximos aos valores fornecidos pelo fabricante do Cimento Portland CPV-ARI-Plus e estiveram dentro dos limites estabelecidos pela NBR 5733:1991 (99), confirmando a sua possível utilização.

## 5.5 Propriedades e características da areia quartzosa

A Tabela 17 contém a composição granulométrica da areia quartzosa do rio Mogi-Guaçu e os limites granulométricos de agregado miúdo definidos pela NBR 7211:1983 (77). A partir dos valores apresentados nesta Tabela e das definições estabelecidas pela NBR 7211:1983 (77), foram determinadas a dimensão máxima característica, o módulo de finura e a zona granulométrica a que se enquadra o agregado miúdo utilizado neste trabalho para a produção dos concretos em estudo.

A areia quartzosa do rio Mogi-Guaçu caracterizou-se por apresentar dimensão máxima característica igual a 2,4 mm, o módulo de finura igual a 2,52 e granulometria característica de areia média.

Tabela 17 – Composição granulométrica da areia quartzosa do rio Mogi-Guaçu e limites granulométricos de agregado miúdo definidos pela NBR 7211:1983 (77).

| **Peneira ABNT (mm)** | **Porcentagem em massa retida e acumulada** | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | **Areia Mogi-Guaçu** | **Zona 1 Muito Fina** | **Zona 2 Fina** | **Zona 3 Média** | **Zona 4 Grossa** |
| 9,5 | 0,00 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6,3* | 0,23 | 0 a 3 | 0 a 7 | 0 a 7 | 0 a 7 |
| 4,8 | 0,55 | 0 a 5(A) | 0 a 10 | 0 a 11 | 0 a 12 |
| 2,4 | 2,59 | 0 a 5(A) | 0 a 15(A) | 0 a 25(A) | 5(A) a 40 |
| 1,2 | 29,30 | 0 a 10(A) | 0 a 25(A) | 10(A) a 45(A) | 30(A) a 70 |
| 0,6 | 56,46 | 0 a 20 | 21 a 40 | 41 a 65 | 66 a 85 |
| 0,3 | 74,42 | 50 a 85(A) | 60(A) a 88(A) | 70(A) a 92(A) | 80(A) a 95 |
| 0,15 | 88,50 | 85(B) a 100 | 90(B) a 100 | 90(B) a 100 | 90(B) a 100 |

(A) Pode haver uma tolerância de até 5 unidades percentuais em um só dos limites marcados com a letra A ou distribuídos em vários deles.
(B) Para agregado miúdo resultante de britamento, este limite pode ser 80.
* Peneira ABNT da série intermediária.

As Tabelas 18 e 19 contêm, respectivamente, os resultados dos ensaios experimentais de determinação da massa unitária da areia quartzosa do rio Mogi-Guaçu no estado seco e solto e no estado compactado seco. Propriedades determinadas dividindo-se a quantidade em massa de agregado no estado considerado, necessária para encher um recipiente de volume específico, pelo volume deste recipiente. Os recipientes utilizados na realização destes ensaios caracterizaram-se por apresentar volume igual a 3,040 $dm^3$ e massa de 2,419 kg.

Na Figura 45 pode ser observada a composição granulométrica da areia quartzosa do rio Mogi-Guaçu dentro dos limites da zona granulométrica 3 (Média).

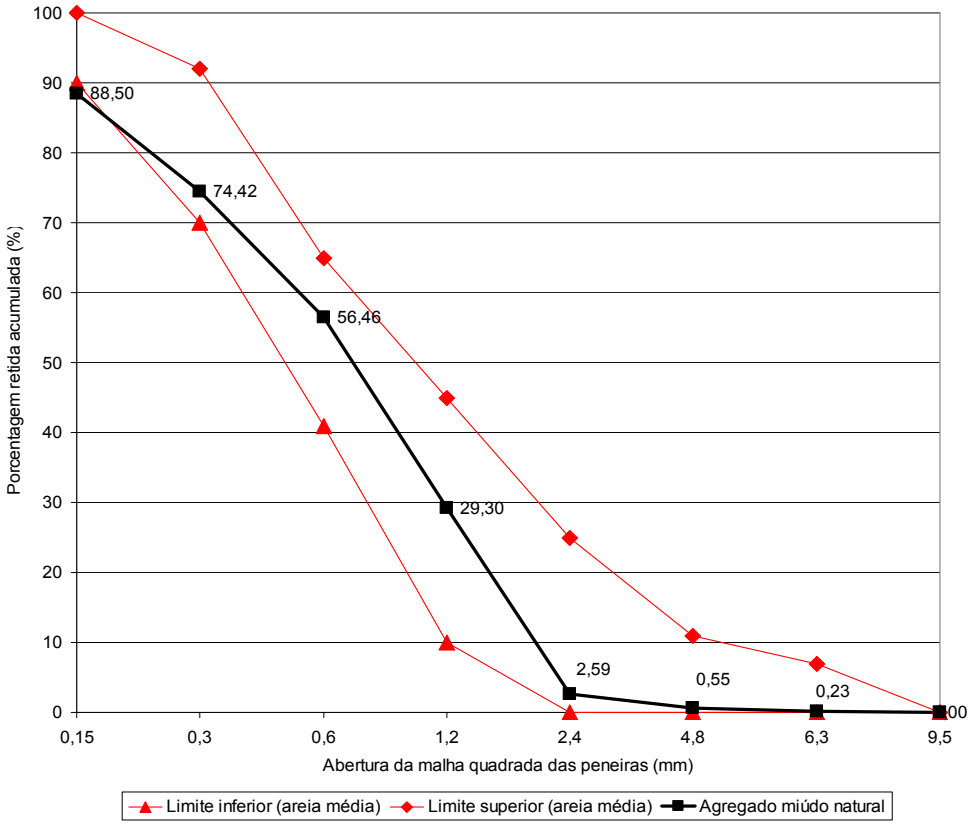



Figura 45 – Composição granumométrica da areia quartzosa do rio Mogi-Guaçu entre os limites da zona granulométrica 3.

A areia quartzosa do rio Mogi-Guaçu caracterizou-se por apresentar massa unitária no estado seco e solto igual a 1,525 kg/dm$^3$.

Tabela 18 – Resultados do ensaio experimental de determinação da massa unitária da areia quartzosa do rio Mogi-Guaçu no estado seco e solto.

| **Amostra** | **Recipiente + Agregado (kg)** | **Agregado seco e solto (kg)** | **Massa unitária (kg/dm$^3$)** |
|---|---|---|---|
| 1 | 6,995 | 4,576 | 1,505 |
| 2 | 7,081 | 4,662 | 1,534 |
| 3 | 7,091 | 4,672 | 1,537 |
| Média | – | – | 1,525 |
| Desvio Padrão | – | – | 0,018 |

Tabela 19 – Resultados do ensaio experimental de determinação da massa unitária da areia quartzosa do rio Mogi-Guaçu no estado compactado seco.

| Amostra | Recipiente + Agregado (kg) | Agregado compactado seco (kg) | Massa unitária (kg/dm$^3$) |
|---|---|---|---|
| 1 | 7,403 | 4,984 | 1,639 |
| 2 | 7,406 | 4,987 | 1,640 |
| 3 | 7,483 | 5,064 | 1,666 |
| Média | – | – | 1,649 |
| Desvio Padrão | – | – | 0,015 |

A massa unitária no estado compactado seco da areia quartzosa do rio Mogi-Guaçu foi igual a 1,649 kg/dm$^3$.

A Tabela 20 contém os resultados do ensaio de determinação da massa específica do agregado miúdo natural pelo método do Frasco de Chapman.

Tabela 20 – Determinação da massa específica da areia quartzosa do rio Mogi-Guaçu pelo método do Frasco de Chapman.

| Amostra | Volume Inicial Água (cm$^3$) | Agregado (g) | Volume Ocupado Água + Agregado (cm$^3$) | Massa Específica (g/cm$^3$) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 200 | 500 | 303 | 4,854 |
| 2 | 200 | 500 | 304 | 4,808 |
| 3 | 200 | 500 | 304 | 4,808 |
| Média | – | – | – | 4,823 |
| Desvio Padrão | | | | 0,027 |

A areia quartzosa do rio Mogi-Guaçu caracterizou-se por apresentar massa específica igual a 4,823 kg/dm$^3$.

O coeficiente de inchamento e a umidade crítica do agregado miúdo natural foram determinados segundo a NBR 6457:1987 (106). A Tabela 21 contém os valores de massa unitária e de coeficiente de inchamento obtidos para amostras da areia quartzosa do rio Mogi-Guaçu com teores de umidade entre 0 a 7%.

Tabela 21 – Massa unitária e coeficiente de inchamento de amostras da areia quartzosa do rio Mogi-Guaçu com teores de umidade de 0 a 7%.

| **Amostra** | **Agregado (kg)** | **Teor de umidade (%)** | **Agregado + Recipiente (kg)** | **Massa unitária ($kg/dm^3$)** | **Coeficiente Inchamento** |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 4,528 | 0 | 6,947 | 1,489 | 1,000 |
| 2 | 4,200 | 0,5 | 6,619 | 1,382 | 1,083 |
| 3 | 3,738 | 1 | 6,157 | 1,230 | 1,223 |
| 4 | 3,523 | 2 | 5,942 | 1,159 | 1,311 |
| 5 | 3,438 | 3 | 5,857 | 1,131 | 1,357 |
| 6 | 3,365 | 4 | 5,784 | 1,107 | 1,399 |
| 7 | 3,394 | 5 | 5,813 | 1,116 | 1,401 |
| 8 | 3,398 | 6 | 5,817 | 1,118 | 1,413 |
| 9 | 3,428 | 7 | 5,847 | 1,128 | 1,413 |

A partir dos valores obtidos foi traçada a curva de inchamento apresentada na Figura 46.

A umidade crítica foi determinada como sendo a abscissa correspondente ao ponto de interseção das duas retas tangentes: a reta tangente à curva e paralela ao eixo teor de umidade, e a reta tangente à curva e paralela à reta que passa pela origem das coordenadas e pelo ponto de umidade máxima.

A areia quartzosa do rio Mogi-Guaçu caracterizou-se por apresentar umidade máxima igual a 5,129%, coeficiente de inchamento máximo igual a 1,439, umidade crítica igual a 3,847% e coeficiente de inchamento correspondente à umidade crítica igual a 1,412.

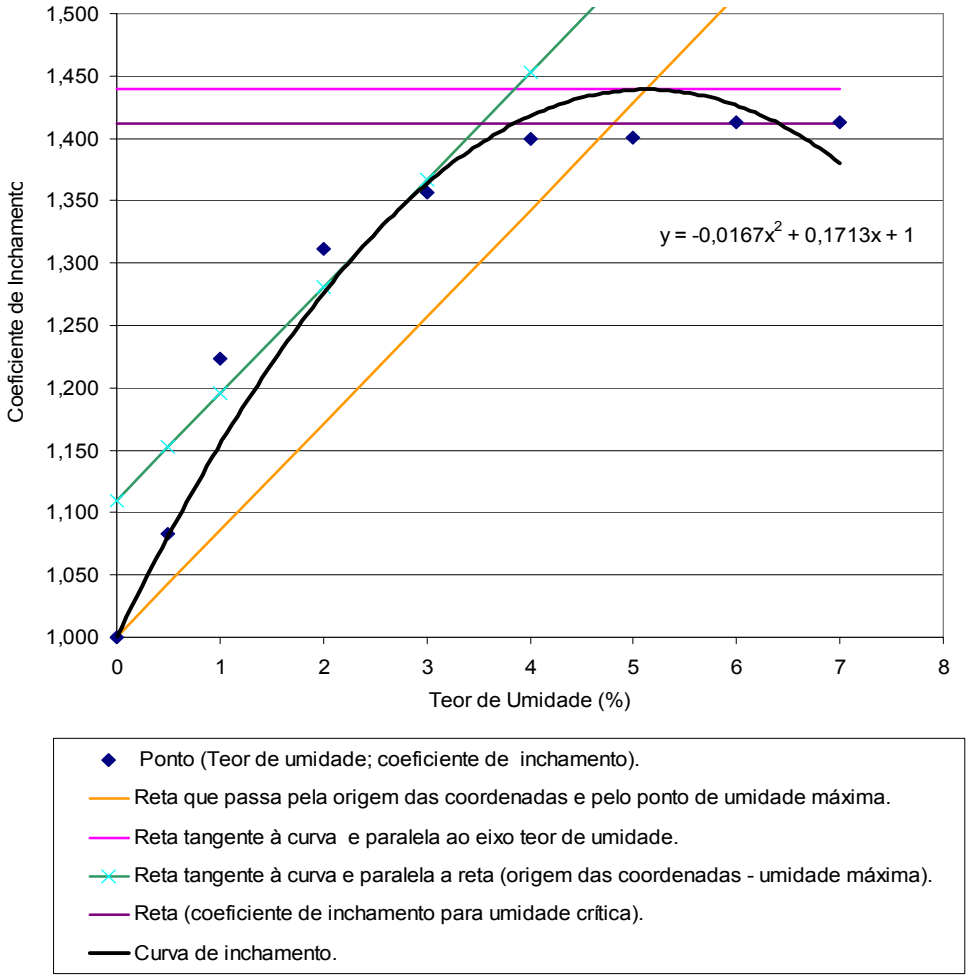



Figura 46 – Curva de inchamento da areia quartzosa do rio Mogi-Guaçu.

O coeficiente de inchamento médio foi determinado pela média aritmética entre o coeficiente de inchamento máximo e aquele correspondente à umidade crítica. O coeficiente de inchamento médio da areia quartzosa do rio Mogi-Guaçu foi igual a 1,426.

## 5.6 Propriedades e características da pedra britada basáltica

A Tabela 22 contém a composição granulométrica da pedra britada basáltica da pedreira Bandeirantes e os limites granulométricos de agregado graúdo definidos pela NBR 7211:1983 (77).

Tabela 22 – Composição granulométrica da pedra britada basáltica da pedreira Bandeirantes e limites granulométricos de agregado graúdo definidos pela NBR 7211:1983 (77).

| **Peneira ABNT (mm)** | **Porcentagem em massa retida e acumulada** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Pedra britada** | **Graduação** | | | | |
| | | **0** | **1** | **2** | **3** | **4** |
| 152 | – | – | – | – | – | – |
| 76 | – | – | – | – | – | 0 |
| 64 | – | – | – | – | – | 0 a 30 |
| 50 | – | – | – | – | 0 | 75 a 100 |
| 38 | – | – | – | – | 0 a 30 | 90 a 100 |
| 32 | – | – | – | 0 | 75 a 100 | 95 a 100 |
| 25 | 0,00 | – | 0 | 0 a 25 | 87 a 100 | – |
| 19 | 0,26 | – | 0 a 10 | 75 a 100 | 95 a 100 | – |
| 12,5 | 23,89 | 0 | – | 90 a 100 | – | – |
| 9,5 | 72,94 | 0 a 10 | 80 a 100 | 95 a 100 | – | – |
| 6,3 | 95,66 | – | 92 a 100 | – | – | – |
| 4,8 | 97,80 | 80 a 100 | 95 a 100 | – | – | – |
| 2,4 | 98,00 | 95 a 100 | – | – | – | – |

A partir dos valores apresentados na Tabela 22 e das definições estabelecidas pela NBR 7211:1983 (77) foram determinadas a dimensão máxima características, o módulo de finura, e a graduação a que se enquadra o agregado graúdo natural utilizado neste trabalho na produção dos concretos em estudo.

Na Figura 47 pode ser observado o enquadramento dos valores granulométricos da pedra britada da pedreira Bandeirantes entre os limites da graduação 1 estabelecidos pela NBR 7211:1983 (77).

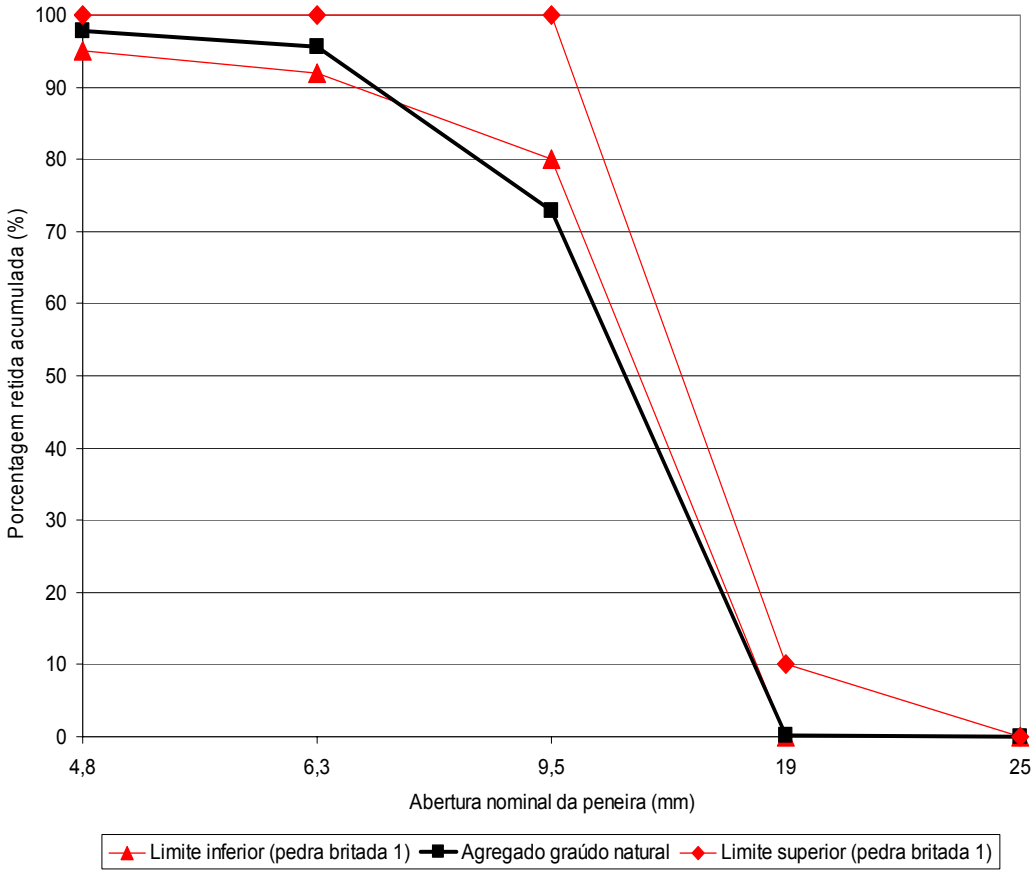



Figura 47 – Composição granulométrica da pedra britada da pedreira Bandeirantes entre os limites de graduação granulométrica 1, estabelecidos pela NBR 7211:1983 (77).

De acordo com a NBR 7211:1983 (77), a dimensão máxima característica é igual à abertura da peneira de malha quadrada, em mm, correspondente a uma porcentagem retida e acumulada menor ou igual a 5%, e o módulo de finura é igual a soma das porcentagens retidas e acumuladas nas peneiras da série normal dividida por 100. Portanto, a pedra britada da pedreira Bandeirantes caracterizou-se por apresentar dimensão máxima característica igual a 19 mm e módulo de finura igual a 3,89.

As Tabelas 23 e 24 contêm, respectivamente, os resultados dos ensaios de determinação da massa unitária da pedra britada da pedreira Bandeirantes no estado seco e solto, e no estado compactado seco. Os recipientes utilizados na determinação destas propriedades caracterizaram-se por apresentar volume igual a 3,040 $dm^3$ e massa igual a 2,419 kg.

Tabela 23 – Resultados do ensaio de determinação da massa unitária no estado seco e solto da pedra britada da pedreira Bandeirantes.

| Amostra | Recipiente + Agregado (kg) | Agregado seco e solto (kg) | Massa unitária (kg/dm$^3$) |
|---|---|---|---|
| 1 | 6,729 | 4,310 | 1,418 |
| 2 | 6,829 | 4,410 | 1,451 |
| 3 | 6,834 | 4,415 | 1,452 |
| Média | – | – | 1,440 |
| Desvio Padrão | – | – | 0,019 |

A massa unitária do agregado graúdo no estado seco e solto foi determinada, segundo a NBR 7251:1982 (103), dividindo-se a quantidade em massa de agregado no estado seco e solto necessária para encher um recipiente de volume específico pelo volume deste recipiente.

A pedra britada basáltica da pedreira Bandeirantes caracterizou-se por apresentar massa unitária no estado seco e solto igual a 1,440 kg/dm$^3$.

Tabela 24 – Resultados do ensaio experimental de determinação da massa unitária no estado compactado seco da pedra britada da pedreira Bandeirantes.

| Amostra | Recipiente + Agregado (kg) | Agregado compactado seco (kg) | Massa unitária (kg/dm$^3$) |
|---|---|---|---|
| 1 | 7,374 | 4,955 | 1,630 |
| 2 | 7,238 | 4,819 | 1,585 |
| 3 | 7,462 | 5,043 | 1,659 |
| Média | – | – | 1,625 |
| Desvio Padrão | – | – | 0,037 |

A massa unitária do agregado graúdo no estado compactado seco foi determinada, segundo o a NBR 7810:1983 (104), dividindo-se a quantidade em massa de agregado compactado seco necessária para encher um recipiente de volume específico pelo volume deste recipiente.

A pedra britada basáltica da pedreira Bandeirantes caracterizou-se por apresentar massa unitária no estado compactado seco igual a 1,625 kg/dm$^3$.

A Tabela 25 contém os resultados do ensaio experimental de determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água do agregado graúdo natural. Os valores apresentados foram determinados, segundo a NBR NM53:2003 (107), pela média aritmética dos valores encontrados para as amostras através das Equações 11, 12 e 13, respectivamente.

Tabela 25 – Resultados do ensaio experimental de determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água da pedra britada da pedreira Bandeirantes.

| **Amostra** | **m (kg)** | **$m_s$ (kg)** | **$m_a$ (kg)** | **d (kg/dm$^3$)** | **$d_a$ (kg/dm$^3$)** | **A (%)** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 3,000 | 3,039 | 1,978 | 2,935 | 2,828 | 1,300 |
| 2 | 3,000 | 3,023 | 1,964 | 2,896 | 2,833 | 0,767 |
| 3 | 3,000 | 3,039 | 1,982 | 2,946 | 2,837 | 1,300 |
| Média | – | – | – | 2,926 | 2,832 | 1,122 |
| Desvio Padrão | – | – | – | 0,026 | 0,005 | 0,308 |

A pedra britada basáltica da pedreira Bandeirantes caracterizou-se por apresentar massa específica igual a 2,926 kg/dm$^3$, massa específica aparente igual a 2,832 kg/dm$^3$ e absorção de água de 1,122%.

Na Tabela 26 podem ser observados os resultados do ensaio experimental de determinação do teor de materiais pulverulentos presentes no agregado graúdo natural. O teor de materiais pulverulentos da pedra britada basáltica da pedreira Bandeirantes foi determinado, segundo a NBR 7219:1987 (108), pela média aritmética dos valores obtidos para as amostras parciais através da Equação 14. A pedra britada basáltica da pedreira Bandeirantes caracterizou-se por apresentar teor de materiais pulverulentos igual a 1,358%.

Tabela 26 – Resultados do ensaio experimental de determinação do teor de materiais pulverulentos na pedra britada basáltica da pedreira Bandeirantes.

| Amostra | Massa inicial (kg) | Massa final após lavagem (kg) | Materiais pulverulentos (%) |
|---|---|---|---|
| 1 | 3,000 | 2,961 | 1,317 |
| 2 | 3,000 | 2,958 | 1,400 |
| Média | – | – | 1,358 |
| Desvio Padrão | – | – | 0,059 |

A Tabela 27 contém a composição granulométrica do agregado graúdo natural utilizada para a determinação, segundo a NBR 7809:1983 (109), do número de grãos para medição do comprimento e da espessura dos grãos e a determinação do índice de forma da pedra britada basáltica da pedreira Bandeirantes. O número de grãos para medição do comprimento e da espessura foi calculado através da Equação 15 igual a 66 para grãos retidos na peneira ABNT 12,5 mm e igual a 134 para grãos retidos na peneira ABNT 9,5 mm.

Tabela 27 – Composição granulométrica do agregado graúdo natural utilizada para a determinação do índice de forma do agregado.

| Peneira ABNT | Agregado Graúdo Natural | | | |
|---|---|---|---|---|
| # (mm) | Massa retida (kg) | Massa retida e acumulada (Kg) | Porcentagem retida (%) | Porcentagem retida e acumulada (%) |
| 25 | 0,000 | 0,000 | 0,00 | 0,00 |
| 19 | 0,017 | 0,017 | 0,21 | 0,21 |
| 12,5 | 1,973 | 1,990 | 24,69 | 24,90 |
| 9,5 | 4,027 | 6,017 | 50,40 | 75,30 |
| 6,3 | 1,806 | 7,823 | 22,60 | 97,90 |
| 4,8 | 0,125 | 7,948 | 1,56 | 99,46 |
| 2,4 | 0,012 | 7,959 | 0,14 | 99,61 |

A Tabela 28 contém valores de comprimento e de espessura dos grãos do agregado graúdo natural utilizados na determinação do índice de forma. Os valores de comprimento e de espessura de todos os grãos utilizados neste ensaio encontram-se na Tabela 01 do Apêndice B.

Tabela 28 – Valores de comprimento e de espessura dos grãos do agregado graúdo natural utilizados na determinação do índice de forma.

| **Peneira ABNT # 12,5 mm** | | | | **Peneira ABNT # 9,5 mm** | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Grão** | **c (cm)** | **e (cm)** | **c/e** | **Grão** | **c (cm)** | **e (cm)** | **c/e** |
| **01** | 3,2 | 0,7 | 4,6 | **1** | 1,6 | 0,8 | 2,0 |
| **11** | 2,1 | 0,3 | 7,0 | **22** | 1,7 | 0,4 | 4,3 |
| **22** | 2,3 | 0,8 | 2,9 | **44** | 1,6 | 0,6 | 2,7 |
| **33** | 2,3 | 0,6 | 3,8 | **66** | 1,9 | 0,9 | 2,1 |
| **44** | 2,1 | 0,8 | 2,6 | **88** | 1,4 | 1,3 | 1,1 |
| **55** | 1,8 | 1,1 | 1,6 | **110** | 2,0 | 0,9 | 2,2 |
| **66** | 2,0 | 1,8 | 1,1 | **132** | 1,7 | 0,7 | 2,4 |

O índice de forma do agregado graúdo natural foi calculado pela média, já ponderada, das relações entre o comprimento e a espessura de todos os grãos medidos. A pedra britada basáltica da pedreira Bandeirantes caracterizou-se por apresentar índice de forma (comprimento/espessura) igual a 2,86.

## 5.7 Propriedades e características do compósito leve para concreto

Na Tabela 29 podem ser observados os valores das propriedades e das características do compósito. As propriedades e as características do compósito foram determinadas seguindo os mesmos procedimentos utilizados na determinação das propriedades e das características do agregado graúdo natural.

Tabela 29 – Propriedades e características do compósito.

| Propriedades e características | Compósito |
|---|---|
| Relação serragem:lodo:água (kg) | 1:6:4,5 |
| Forma geométrica | Angulosa/Redonda |
| Massa específica (kg/dm$^3$) | 1,82 |
| Dimensão máxima característica (mm) | 14 |
| Massa unitária no estado seco e solto (kg/m$^3$) | 672 |
| Absorção de água (%) | 24 |

O compósito produzido na forma angulosa/redonda, com dimensão máxima característica de 14 mm e relação em massa entre os materiais serragem:lodo:água igual a 1:6:4,5, caracterizou-se por apresentar massa específica de 1,82 kg/dm$^3$, massa unitária no estado seco e solto de 672 kg/m$^3$ e absorção de água de 24%.

Na Tabela 30 pode ser observada a variação da absorção do óleo de linhaça pelo compósito em função do tempo de imersão.

Tabela 30 – Variação da absorção do óleo de linhaça pelo compósito em função do tempo de imersão.

| Horário de medição (h) | Nível do volume do óleo no béquer (mL) |
|---|---|
| 14:48 | 37,5 |
| 14:58 | 35 |
| 15:15 | 35 |
| 15:30 | 35 |
| 16:00 | 34,5 |
| 16:30 | 34 |
| 17:00 | 34 |
| 17:30 | 34 |
| 08:07 | 33 |

Nove gramas do compósito absorveram 4,5 mL de linhaça em aproximadamente 17 h. Portanto, o compósito quando imerso em óleo de linhaça absorve 0,5mL/g. No final do ensaio experimental, a massa do compósito com óleo de linhaça absorvido e sem secar foi de 11,5 g e restaram no béquer 25,5 mL de óleo de linhaça cozido.

A absorção de água do compósito foi de 24%, determinada após 24 h de imersão do compósito em água, segundo a NBR 9778:2005 (115). Agregados graúdos de argila expandida caracterizam-se por apresentar 10% de absorção após 1 h de imersão em água (Tabela 06).

Foi utilizada a porosimetria de mercúrio para determinar os valores de densidade, porosidade e diâmetro médio dos poros do compósito. Na Tabela 31 pode ser observada a variação do diâmetro dos poros do compósito em função da pressão aplicada para intrusão de mercúrio. A Tabela 32 contém os valores das propriedades e características do compósito obtidas através deste ensaio experimental. Todos os resultados obtidos no ensaio de porosimetria de mercúrio do compósito podem ser observados na Tabela 02 do Apêndice A.

Tabela 31 – Variação do diâmetro dos poros da serragem de madeira em função da pressão aplicada para intrusão de mercúrio.

| **Pressão** | **Diâmetro** | **Diâmetro Médio** | **Volume Cumulativo** | **Volume Incremental** | **Log. Dif. Vol. dV/dlogD** |
|---|---|---|---|---|---|
| **(psia)** | **(µm)** | **(µm)** | **(mL/g)** | **(mL/g)** | **mL/g** |
| 0,54 | 332,5710 | 332,5710 | 0,0000 | 0,0000 | 1,659E-03 |
| 5,99 | 30,1858 | 33,2040 | 0,0009 | 0,0000 | 3,682E-04 |
| 11,46 | 15,7874 | 16,6033 | 0,0011 | 0,0000 | 1,433E-03 |
| 119,55 | 1,5129 | 1,7667 | 0,0478 | 0,0138 | 1,040E-01 |
| 1145,08 | 0,1579 | 0,1698 | 0,0964 | 0,0026 | 4,305E-02 |
| 10505,97 | 0,0172 | 0,0176 | 0,1779 | 0,0011 | 5,685E-02 |
| 29467,06 | 0,0061 | 0,0062 | 0,2068 | 0,0003 | 4,543E-02 |

A Figura 48 contém a curva cumulativa e logarítmica diferencial do volume de intrusão de mercúrio em função do diâmetro do poro do compósito.

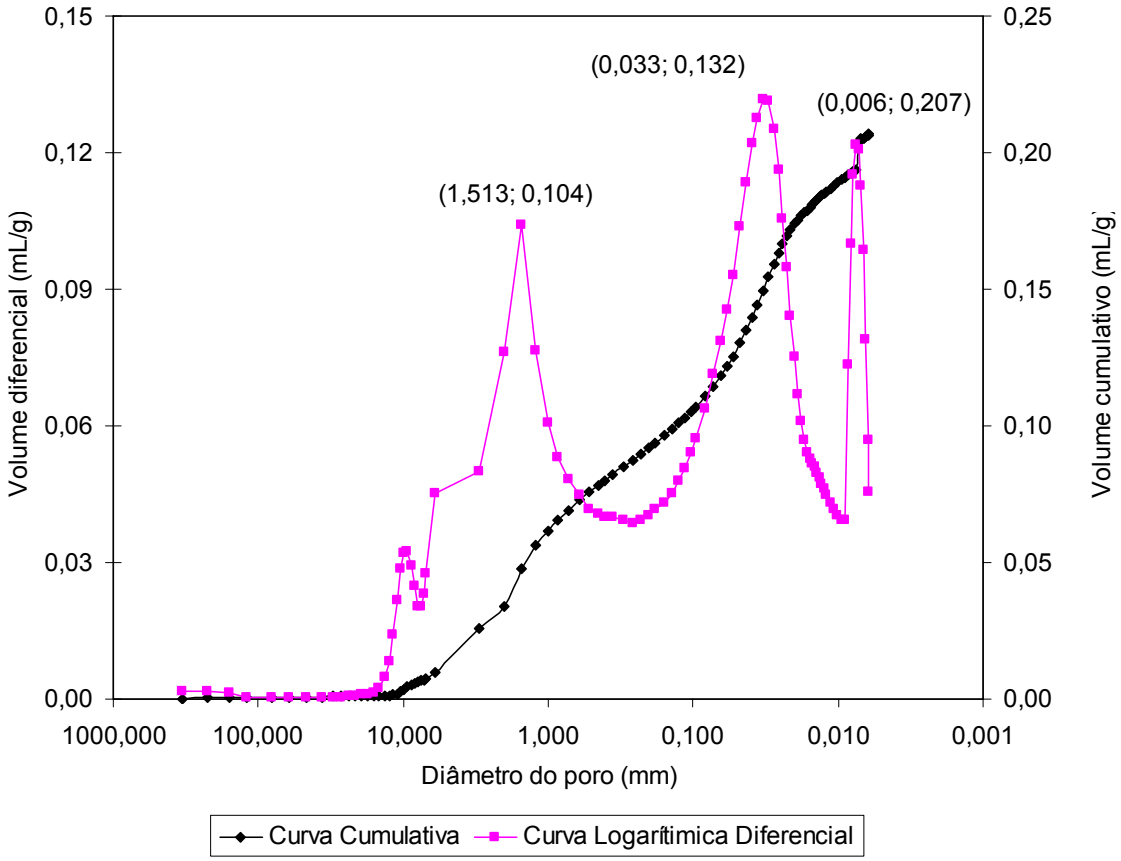


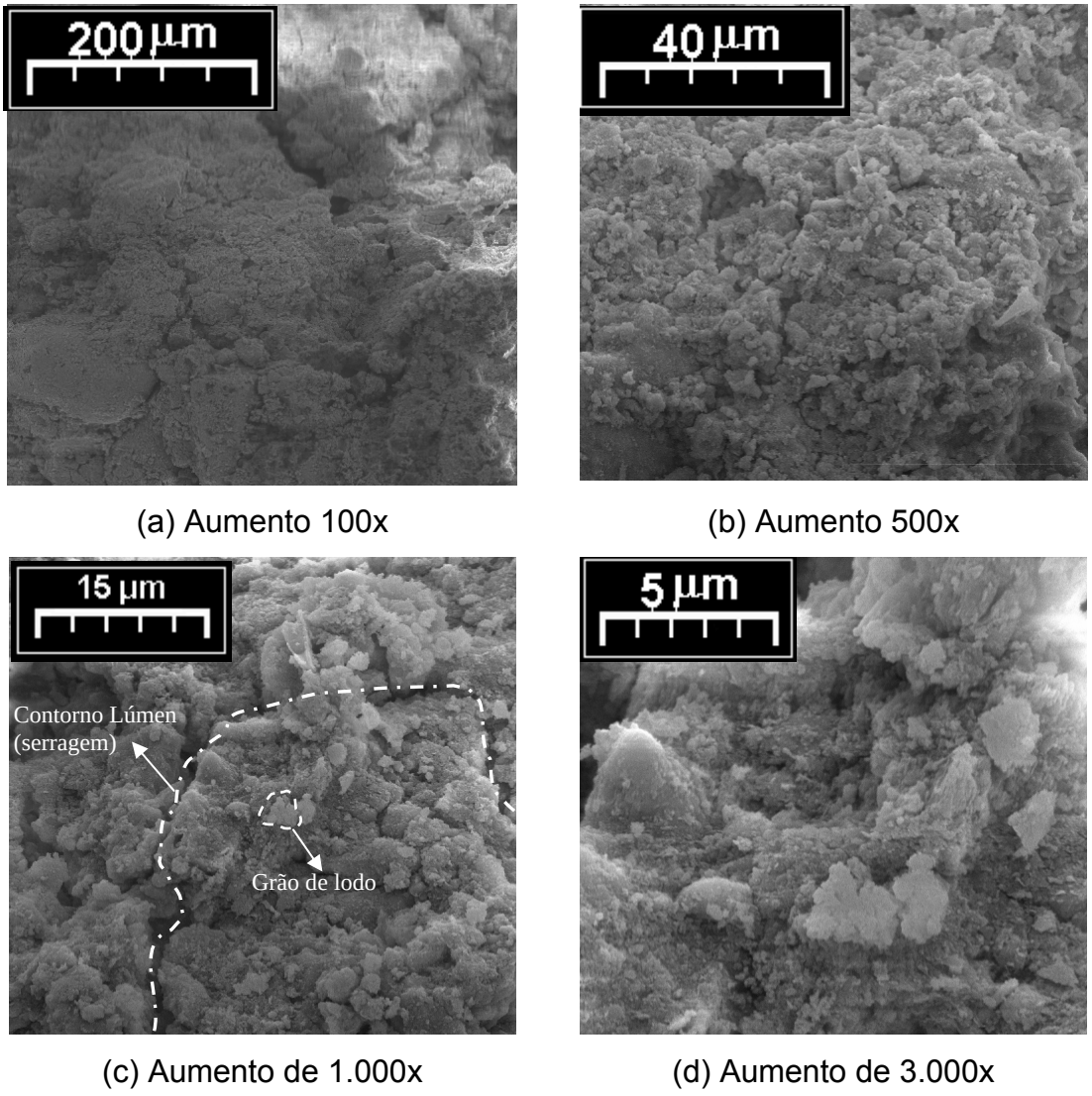

Figura 48 – Curva cumulativa e logarítmica diferencial do volume de intrusão de mercúrio em função do diâmetro do poro do compósito.

O compósito caracterizou-se por apresentar porosidade de 26,5% (Tabela 31) e absorção de água de 24% (Tabela 28).

Tabela 32 – Propriedades e características do compósito determinadas por porosimetria de mercúrio.

| **Propriedades e características** | **Compósito** |
|---|---|
| Volume total de intrusão de mercúrio (mL/g) | 0,2068 |
| Densidade básica (mL/g) | 1,2815 |
| Densidade aparente (mL/g) | 1,7436 |
| Porosidade (%) | 26,50 |
| Diâmetro médio dos poros (µm) | 0,1115 |

A Figura 49 contém imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura da parte interna do compósito.




(a) Aumento 100x (b) Aumento 500x

(c) Aumento de 1.000x (d) Aumento de 3.000x

Figura 49 – Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura da parte interna do compósito desenvolvido.

A partir da observação das microscopias eletrônicas de varreduras realizadas para a serragem da madeira *Pinnus elliotti* (Figura 43 e Figura 44) e para o compósito (Figura 49), foi possível tecer algumas considerações relativas à aderência e a disposição física do lodo e da serragem no compósito.

Os materiais por sua natureza física porosa permitem uma comunicação biunívoca entre as fibras da serragem da madeira e os grãos do lodo. A partir da visualização da Figura 44 (b) – Aumento de 1.000x) e da Figura 49 (c) – Aumento de

1.000x), é possível afirmar que os grãos de lodo preenchem completamente o lúmen da madeira, fato este evidenciado pelos valores da dimensão (diâmetro médio) obtidos para os mesmos. A granulometria do lodo realizada por sedimentação e apresentada na Tabela 09 demonstra que 44,97% dos grãos do lodo são menores que 17 μm. O diâmetro médio dos poros da madeira determinado por porosimetria de mercúrio e apresentado na Tabela 11 é igual a 17,816 μm e o diâmetro do lúmen da madeira apresentado na Tabela 13 é igual a 23 μm.

Deste modo, é possível afirmar que a aderência entre a serragem de madeira e o lodo é suficiente para proporcionar uma ligação que os tornam um único material compósito.

Uma micrografia óptica da região de transição entre o compósito e a argamassa matriz foi realizada com aproximação de 400x e pode ser observada na Figura 50. Figura retirada durante o ensaio experimental realizado para análise da aderência do compósito à argamassa e a constatação da influencia da alta absorção de água do compósito na redução da resistência mecânica do concreto.

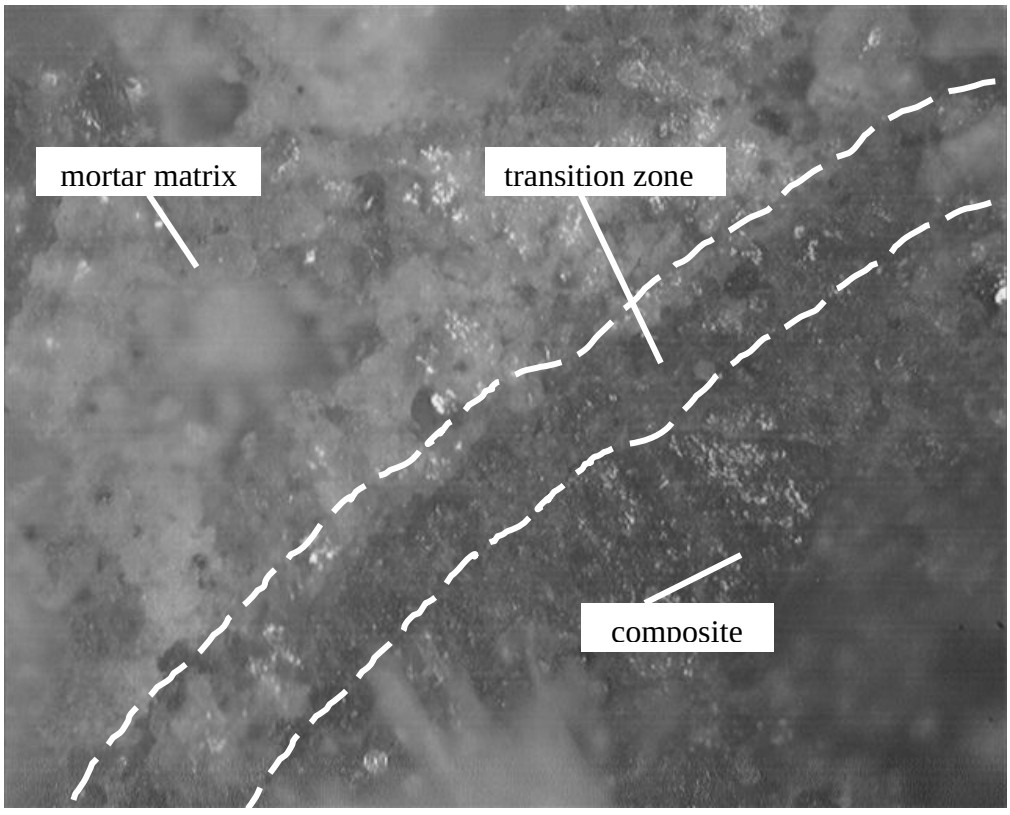



Figura 50 – Micrografia óptica com aproximação de 400x da região de transição entre o compósito e a matriz de argamassa.

Na Figura 50 pode ser observado que a região de aderência entre o compósito e a matriz de argamassa se apresentou difusa em praticamente toda a borda do compósito (zona escura). Nas regiões de borda com melhor definição mediu-se a espessura da região de aderência e a mesma apresentou dimensão entre 1,5 e 3,5 μm. Na Figura 50 observa-se também a existência de uma grande quantidade de bolhas de ar (pontos brancos). As bolhas de ar aumentam a porosidade e diminuem a resistência da zona de transição e do concreto.

## 5.8 Propriedades físicas e mecânicas dos concretos em estudo

Neste item estão apresentados os resultados dos ensaios de determinação das propriedades físicas e mecânicas do concreto produzido com o compósito e do concreto-referência.

### 5.8.1 Propriedades físicas e mecânicas do concreto produzido com o compósito

O concreto produzido com o compósito, com relação em massa entre os materiais cimento:areia:compósito:água igual a 1:2,5:0,67:0,6, caracterizou-se por apresentar consistência de 70 ± 10 mm determinada segundo a NBR 7223:1982 (112).

A resistência a compressão axial do concreto produzido com o compósito foi determinada segundo a NBR 5739:1994 (113) dividindo-se a carga de ruptura pela área da seção transversal do corpo-de-prova. O módulo de elasticidade e o módulo de deformação secante foram determinados segundo a NBR 8522:2003 (116) através do diagrama deformação x tensão de ruptura dos corpos-de-prova. Na Tabela 33 podem ser observados os resultados do ensaio de determinação da resistência à compressão axial ($f_c$), dos módulos de elasticidade (Eci) e de deformação secante (Ecs) do concreto produzido com o compósito.

Tabela 33 – Resultados dos ensaios de determinação da resistência à compressão axial e dos módulos de elasticidade e de deformação secante do concreto produzido com o compósito.

| CP | $f_c$ (MPa) | Eci (GPa) | Ecs (GPa) |
|---|---|---|---|
| 02 | 11,145 | 15,190 | 8,340 |
| 03 | 10,003 | 12,231 | 6,054 |
| 04 | 10,807 | 14,912 | 8,368 |
| 06 | 9,927 | 17,759 | 11,728 |
| 07 | 11,227 | 19,253 | 14,531 |
| 09 | 11,810 | 16,312 | 9,702 |
| 10 | 11,442 | 19,209 | 11,509 |
| 11 | 11,548 | 12,147 | 7,435 |
| 12 | 11,839 | 16,585 | 11,098 |
| Média | 11,083 | 15,955 | 9,863 |
| Desvio Padrão | 0,711 | 2,629 | 2,610 |

A Figura 51 contém o diagrama deformação x tensão do corpo-de-prova 10 do concreto produzido como o compósito. Na Tabela 01 do Apêndice C encontram-se todos os valores de deformação e tensão obtidos no ensaio de determinação dos módulos de elasticidade e deformação, a partir dos quais foi traçado este diagrama. O módulo de elasticidade foi determinado pelo coeficiente angular da reta que passa pelos pontos correspondes a 0,5 MPa e 30% da tensão de ruptura. O módulo de deformação secante foi determinado pelo coeficiente angular da reta que passa pelos pontos correspondentes a tensão básica e a tensão de ruptura.

A resistência à tração do concreto produzido com o compósito foi determinada segundo a NBR 7222:1983 (114) e calculada através da Equação 13. A Tabela 34 contém a carga de ruptura e a resistência à tração por compressão diametral do concreto produzido com o compósito. O concreto produzido com o compósito caracterizou-se por apresentar resistência à tração por compressão diametral média igual a 1,226 MPa.

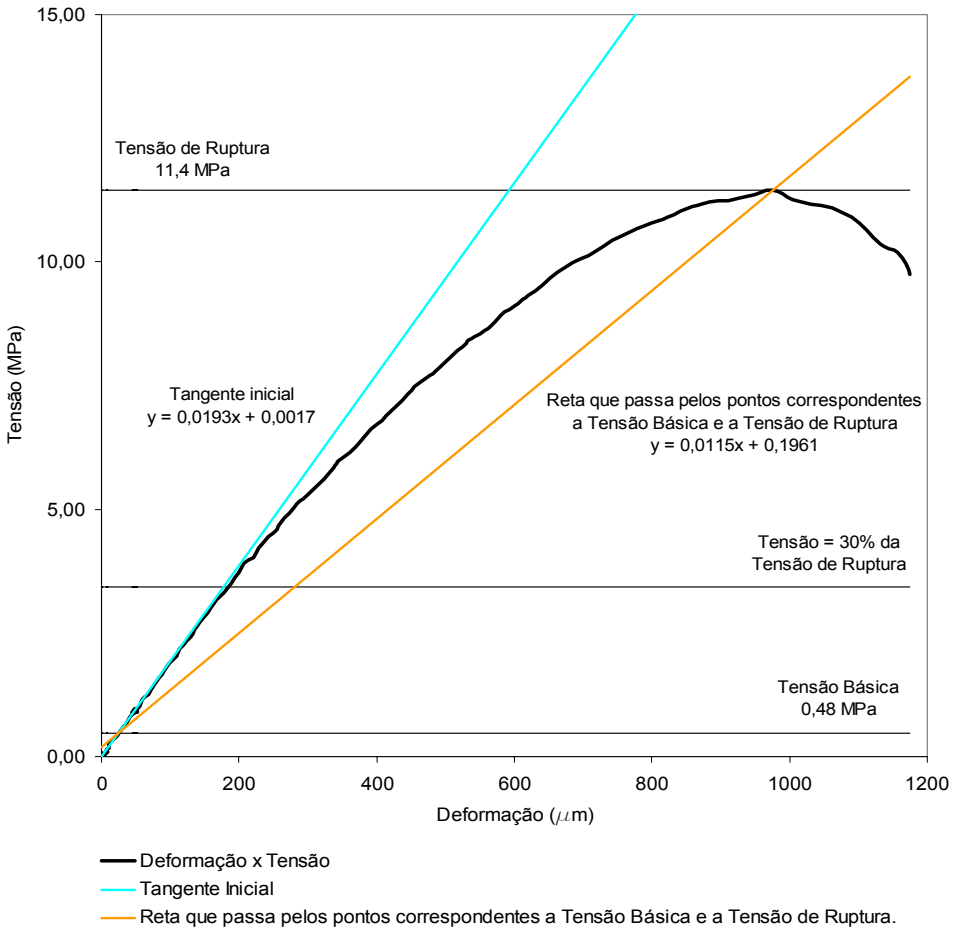



Figura 51 – Diagrama deformação x tensão do corpo-de-prova 10 do concreto produzido com o compósito.

Tabela 34 – Carga de ruptura e resistência à tração por compressão diametral do concreto produzido com o compósito.

| CP | Carga de Ruptura (kN) | $f_{ct}$ (MPa) |
|---|---|---|
| 13 | 35,50 | 1,130 |
| 14 | 45,90 | 1,462 |
| 15 | 34,00 | 1,081 |
| 16 | 38,60 | 1,228 |
| 17 | 38,50 | 1,227 |
| Média | - | 1,226 |
| Desvio Padrão | - | 0,147 |

A absorção de água, o índice de vazios e a massa específica real, seca e saturada, foram determinadas segundo a NBR 9778:2005 (115) e calculadas, respectivamente, através das Equações 17, 18, 19, 20 e 21. A Tabela 35 contém os resultados do ensaio de determinação destas propriedades para o concreto produzido com o compósito.

Tabela 35 – Resultados do ensaio de determinação da absorção de água, do índice de vazios e da massa específica real, seca e saturada do concreto produzido com o compósito.

| CP | $m_s$ (kg) | $m_{sat}$ (kg) | $m_i$ (kg) | A (%) | Iv (%) | $\rho_r$ (kg/dm$^3$) | $\rho_s$ (kg/dm$^3$) | $\rho_{sat}$ (kg/dm$^3$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 18 | 2,880 | 3,120 | 1,565 | 8,333 | 15,434 | 2,190 | 1,852 | 2,006 |
| 19 | 2,880 | 3,133 | 1,571 | 8,785 | 16,197 | 2,200 | 1,844 | 2,006 |
| 20 | 2,870 | 3,128 | 1,575 | 8,972 | 16,586 | 2,216 | 1,849 | 2,014 |
| Média | - | - | - | 8,697 | 16,072 | 2,202 | 1,848 | 2,009 |
| Desvio Padrão | - | - | - | 0,329 | 0,586 | 0,013 | 0,004 | 0,005 |

O concreto produzido com o compósito caracterizou-se por apresentar: absorção de água igual a 8,697%, índice de vazios igual a 16,072%, massa específica real igual a 2,202 kg/dm$^3$, massa específica seca igual a 1,848 kg/dm$^3$ e massa específica saturada igual a 2,009 kg/dm$^3$.

### 5.8.2 Propriedades físicas e mecânicas do concreto-referência

O concreto-referência, produzido com relação em massa entre os materiais cimento:areia:pedra:água igual a 1:4,8:5,8:0,8, caracterizou-se por apresentar consistência de 50 ± 10 mm determinada segundo a NBR 7223:1982 (112).

A metodologia utilizada na determinação das propriedades físicas e mecânicas do concreto-referência foi a mesma utilizada na determinação das propriedades físicas e mecânicas do concreto produzido com o compósito. A Tabela 36 contém a resistência à compressão axial e os módulos de elasticidade e

deformação secante do concreto-referência. O concreto-referência caracterizou-se por apresentar: resistência à compressão axial de 20,937 MPa, módulo de elasticidade de 27,971 GPa e módulo de deformação secante igual a 7,318 GPa.

Tabela 36 – Resultados dos ensaios de determinação da resistência à compressão axial e dos módulos de elasticidade e de deformação secante do concreto-referência.

| CP | $f_c$ (MPa) | Eci (GPa) | Ecs (GPa) |
|---|---|---|---|
| 01 | 19,999 | 28,122 | 7,563 |
| 02 | 25,554 | 28,379 | 8,915 |
| 03 | 18,111 | 27,221 | 7,084 |
| 04 | 20,087 | 28,162 | 5,712 |
| Média | 20,937 | 27,971 | 7,318 |
| Desvio Padrão | 3,210 | 0,513 | 1,322 |

Na Tabela 37 podem ser observados os resultados do ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral do concreto referência. O concreto-referência caracterizou-se por apresentar resistência à tração por compressão diametral média igual a 2,241 MPa.

Tabela 37 – Resultados do ensaio de determinação da resistência à tração por compressão diametral do concreto-referência.

| CP | Carga de Ruptura (kN) | $f_{ct}$ (MPa) |
|---|---|---|
| 05 | 69,7 | 2,218 |
| 06 | 71,1 | 2,264 |
| Média | - | 2,241 |
| Desvio Padrão | - | 0,033 |

A Figura 52 contém o diagrama deformação x tensão do corpo-de-prova 01 do concreto-referência. Na Tabela 02 do Anexo C encontram-se todos os valores de deformação e tensão obtidos no ensaio experimental de determinação dos módulos de elasticidade e deformação, a partir dos quais foi traçado este diagrama.

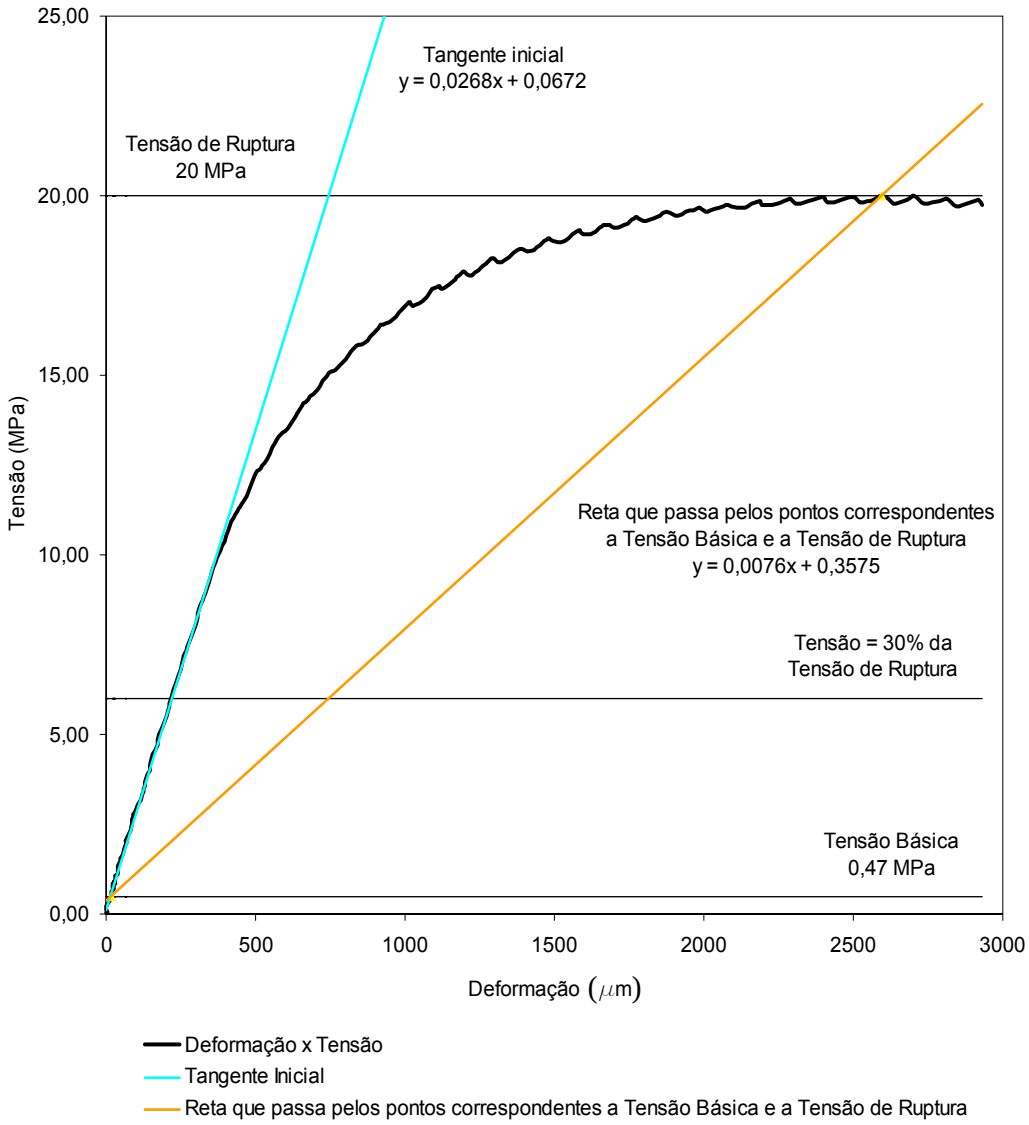



Figura 52 – Diagrama deformação x tensão do corpo-de-prova 01 do concreto-referência.

Na Tabela 38 podem ser observados os resultados do ensaio de determinação da absorção de água, do índice de vazios e da massa específica real, seca e saturada, do concreto-referência.

Tabela 38 – Resultados do ensaio de determinação da absorção de água, do índice de vazios e da massa específica real, seca e saturada, do concreto-referência.

| CP | $m_s$ (kg) | $m_{sat}$ (kg) | $m_i$ (kg) | A (%) | Iv (%) | $\rho_r$ (kg/dm$^3$) | $\rho_s$ (kg/dm$^3$) | $\rho_{sat}$ (kg/dm$^3$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 07 | 3,826 | 4,018 | 2,407 | 5,005 | 11,887 | 2,695 | 2,375 | 2,494 |
| 08 | 3,833 | 4,031 | 2,414 | 5,166 | 12,249 | 2,702 | 2,371 | 2,493 |
| Média | - | - | - | 5,086 | 12,068 | 2,699 | 2,373 | 2,494 |
| Desvio Padrão | - | - | - | 0,114 | 0,256 | 0,005 | 0,003 | 0,001 |

O concreto-referência caracterizou-se por apresentar: absorção de água igual a 5,086%, índice de vazios igual a 12,068%, massa específica real igual a 2,699 kg/dm$^3$, massa específica seca igual a 2,373 kg/dm$^3$ e massa específica saturada igual a 2,494 kg/dm$^3$.

## 5.9 Propriedades térmicas dos concretos em estudo

A Tabela 39 contém os valores da condutividade térmica, do calor específico e da difusividade térmica dos concretos em estudo, obtidos pelo método do fio quente paralelo descrito no capítulo 4, item 4.5.

Tabela 39 – Propriedades térmicas dos concretos em estudo.

| Propriedades térmicas | Concreto produzido com o compósito | Concreto-referência |
|---|---|---|
| Condutividade térmica (W/m.K) | 1,89 | 2,46 |
| Calor específico (J/Kg.K) | 839,038 | 850,755 |
| Difusividade térmica (m$^2$/s) | $1{,}220.10^{-6}$ | $1{,}233.10^{-6}$ |
| Coeficiente de correlação | 0,99996 | 0,99976 |

A Tabela 40 contém os valores da densidade e da condutividade térmica dos concretos em estudo e de concretos produzidos com argila expandida apresentados pela NBR 15220-2:2005 (122).

Tabela 40 – Valores da densidade e da condutividade térmica dos concretos em estudo e de concretos com argila expandida apresentados pela NBR 15220-2:2005 (122).

| **Concreto** | **Densidade kg/m$^3$** | | **Condutividade Térmica W/m.K** |
|---|---|---|---|
| | **Entre** | **Média** | |
| Com argila expandida: | 1.200 - 1.400 | 1.300 | 0,70 |
| - Dosagem de cimento > 300 kg/m$^3$ | 1.400 - 1.600 | 1.500 | 0,85 |
| - Densidade dos inertes > 350 kg/m$^3$ | 1.600 - 1.800 | 1.700 | 1,05 |
| Concreto produzido com o compósito | – | 1.848 | 1,89 |
| Concreto-referência | – | 2.373 | 2,47 |

A condutividade térmica do concreto produzido com o compósito de densidade média igual a 1,848 kg/m$^3$ é 23,17% menor do que a condutividade térmica do concreto-referência com densidade média igual a 2,373 kg/m$^3$. Entretanto, ambas as condutividades térmicas são maiores do que a condutividade térmica de concretos produzidos com agregados de argila expandida.

## 5.10 Deterioração por abrasão dos concretos em estudo

Na Tabela 41 e na Tabela 42 podem ser observados os resultados dos ensaios experimentais de determinação da durabilidade dos concretos em estudo a partir da deterioração por desgaste superficial, denominado abrasão.

Tabela 41 – Resultados do ensaio de determinação da durabilidade do concreto produzido com o compósito a partir da deterioração por abrasão.

| CP | Dimensões do CP | | | Massa Inicial | Massa Final | Tempo de Ensaio | Abrasão |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | (cm) | | (g) | (g) | | ($cm^3$) |
| 01 | 4,35 | 11,45 | 11,60 | 1145,44 | 1109,74 | 7min e 20s | 18,01 |
| 02 | 4,40 | 11,45 | 11,35 | 1158,03 | 1129,18 | 7min e 28s | 14,25 |
| 03 | 4,50 | 11,60 | 11,60 | 1180,32 | 1154,34 | 7min e 20s | 13,33 |
| Média | – | – | – | – | – | – | 15,19 |
| Desvio Padrão | – | – | – | – | – | – | 2,479 |

O concreto produzido com o compósito caracterizou-se por apresentar desgaste por abrasão igual a 15,19 $cm^3$.

Tabela 42 – Resultado do ensaio de determinação da durabilidade do concreto-referência a partir da deterioração por abrasão.

| CP | Dimensões do CP | | | Massa Inicial | Massa Final | Tempo de Ensaio | Abrasão |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | (cm) | | (g) | (g) | | ($cm^3$) |
| 01 | 4,20 | 11,50 | 11,60 | 1361,16 | 1346,80 | 7min e 21s | 5,91 |
| 02 | 4,20 | 11,50 | 11,60 | 1373,13 | 1360,96 | 7min e 27s | 4,97 |
| 03 | 4,20 | 11,60 | 11,60 | 1355,66 | 1340,38 | 7min e 40s | 6,37 |
| Média | – | – | – | – | – | – | 5,75 |
| Desvio Padrão | – | – | – | – | – | – | 0,714 |

O concreto-referência caracterizou-se por apresentar desgaste por abrasão igual a 5,75 $cm^3$.

A deterioração por abrasão do concreto produzido com o compósito é 2,64 vezes maior do que a deterioração por abrasão do concreto-referência.

## 5.11 Classificação dos resíduos dos concretos em estudo

A Tabela 43 contém a concentração dos metais (alumínio, ferro e chumbo) nos extratos solubilizados e lixiviados dos concretos em estudo e os limites estabelecidos pela NBR 10004:2004 (11).

Tabela 43 – Concentração de metais nos extratos solubilizados e lixiviados dos concretos em estudo e limites estabelecidos pela NBR 10004:2004 (11).

| **Concreto** | **Extrato** | **Alumínio (mg/L)** | | **Ferro (mg/L)** | | **Chumbo (mg/L)** | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **No Extrato** | **Limite NBR 10004** | **No Extrato** | **Limite NBR 10004** | **No Extrato** | **Limite NBR 10004** |
| Produzido com o compósito | Lixiviado | 0,14 | - | 0,03 | - | <0,01 | 1,0 |
| | Solubilizado | 19,96 | 0,2 | 0,004 | 0,3 | <0,01 | 0,01 |
| Referência | Lixiviado | < 0,02 | - | <0,004 | - | <0,01 | 1,0 |
| | Solubilizado | 1,12 | 0,2 | 0,009 | 0,3 | <0,01 | 0,01 |

O resíduo do concreto produzido com o compósito, assim como o resíduo do concreto=referência foi classificado pela NBR 10004:2004 (11) como resíduo sólido não perigoso e não inerte. Entretanto, a concentração de alumínio é maior no resíduo do concreto produzido com o compósito do que no resíduo do concreto-referência. No extrato solubilizado do concreto-referência a concentração de alumínio é igual a 1,12 mg/L enquanto no extrato solubilizado do concreto produzido com o compósito a concentração deste metal é igual a 19,96 mg/L.

# Capítulo 6

# CONCLUSÕES

A partir da revisão da literatura, da metodologia aplicada e da análise dos resultados apresentados no capítulo 5 é possível concluir que:

- É viável, em termos técnicos e científicos, o desenvolvimento de um compósito a base de lodo de estação de tratamento de água e serragem de madeira para uso como agregado graúdo em concreto;
- A queima dos grãos do compósito a elevadas temperaturas não os tornam mais densos e rígidos, pois a presença de matéria orgânica no compósito é elevada e o lodo de ETA apresenta alta concentração de metais, tais como alumínio e ferro. Estes metais se superaquecem e provocam microfissuras. Portanto, a melhor opção é o bom amassamento, adensamento e compactação dos grãos;
- A melhor relação em massa entre os materiais constituintes do compósito (serragem:lodo:água) foi 1:6:4,5;
- Para o uso do compósito como agregado graúdo em concreto, é necessário reduzir e controlar a absorção de água dos grãos do compósito. A redução e o controle da absorção de água do compósito foram realizados através da imersão dos grãos em óleo de linhaça cozido e da secagem dos mesmos à temperatura ambiente. O menor tempo de imersão necessário para que os grãos do compósito não se desmanchem durante o preparo do concreto utilizando betoneira e vibrador mecânico é de 1 minuto;
- O compósito produzido na forma angulosa/redonda, com dimensão máxima característica de 14 mm, massa específica de 1,82 kg/dm$^3$, massa unitária no estado seco e solto de 672 kg/m$^3$ e absorção de água de 24%, foi classificado como agregado graúdo leve de elevada porosidade e absorção de água;

- A partir da determinação das características físicas do lodo e da serragem, e também das observações microscópicas do compósito e da serragem, foi possível observar que a aderência entre a serragem de madeira e o lodo é suficiente para proporcionar uma ligação que os tornam um único material compósito;
- É possível a produção de concreto com a substituição total do agregado graúdo natural pelo compósito;
- Considerando a trabalhabilidade e a resistência à compressão axial, a melhor relação em massa entre os materiais cimento:areia:compósito:água para a produção do concreto com o compósito é 1:2,5:0,67:0,6;
- O concreto produzido com o compósito caracterizou-se por apresentar massa específica seca igual a 1.848 kg/m$^3$ e resistência a compressão axial igual a 11,1 MPa, classificando-se, portanto, como concreto não estrutural de peso leve. O concreto-referência, produzido como relação em massa entre os materiais cimento:areia:brita:água igual a 1:4,8:5,8:0,8, caracterizou-se por apresentar massa específica seca igual a 2,373 kg/m$^3$ e resistência à compressão axial igual a 20,9 MPa, classificando-se portanto como concreto estrutural de media-baixa resistência. Vale salientar que neste trabalho foi utilizado cimento Portland de alta resistência inicial e que as propriedades, resistência e módulos de elasticidade e deformação, foram determinadas aos sete dias de cura;
- A resistência à compressão axial do concreto produzido com o compósito é menor do que a resistência à compressão axial do concreto-referência. Entretanto, a relação entre o módulo de elasticidade e a resistência à compressão axial do concreto produzido com o compósito é similar a do concreto-referência. O concreto produzido com o compósito caracterizou-se por apresentar módulo de elasticidade igual a 15,955 GPa e o concreto-referência módulo de elasticidade igual a 27,971 GPa;
- A resistência à tração do concreto produzido com o compósito é menor do que a resistência a tração do concreto-referência. Entretanto, a relação entre a resistência à tração e à compressão do concreto produzido com o compósito e do concreto-referência são similares aos

valores encontrados na literatura para concretos de baixa e média resistência. O concreto produzido com o compósito caracterizou-se por apresentar resistência à tração igual a 1,226 MPa, e o concreto produzido com o compósito, resistência à tração igual a 2,241 MPa;

- A elevada absorção de água do compósito exigiu elevada quantidade de água para o amassamento do concreto, e durante a cura formaram-se bolhas de ar na zona de transição entre o compósito e argamassa matriz, aumentando a porosidade e diminuindo a aderência entre o compósito e a argamassa e, conseqüentemente, a resistência do concreto assim produzido;
- A elevada absorção de água do compósito, não causou fissuras por retração plástica no concreto; entretanto, prejudicou a resistência do mesmo. Portanto, o período de tempo de imersão dos grãos do compósito em óleo de linhaça não foi suficiente para reduzir a absorção de água a um valor que não prejudicasse a resistência do concreto;
- O concreto produzido com o compósito não deve ser aplicado em ambientes onde sejam expostos ao desgaste superficial. A deterioração por abrasão do concreto produzido com o compósito é 2,64 vezes maior do que a deterioração por abrasão do concreto-referência;
- O calor específico e difusividade térmica do concreto produzido com o compósito são similares ao calor específico e a difusividade térmica do concreto-referência; entretanto, a condutividade térmica do concreto produzido com o compósito é 23,17% menor do que a condutividade térmica do concreto-referência e, ambas as condutividades, são maiores do que a condutividade térmica de concretos leves produzidos com agregados de argila expandida. O concreto produzido com o compósito caracteriza-se por apresentar calor específico igual a 839 J/kg.K, difusividade térmica igual a $1{,}220.10^{-6}$ $m^2/s$ e condutividade térmica igual a 1,894 W/m.K;
- O resíduo do concreto produzido com o compósito, assim como o resíduo do concreto-referência, foram classificados pela NBR 10004:2004 (11) como resíduo sólido não perigoso e não inerte. Entretanto, a concentração de alumínio é maior no resíduo do concreto produzido com o compósito do que no resíduo do concreto-referência. A reciclagem do

lodo e da serragem na produção do compósito é eco-eficiente porque os materiais retornam ao meio ambiente de forma menos concentrada, A concentração de alumínio no extrato solubilizado do concreto produzido com o compósito é 19,96 mg/L, enquanto no lodo da estação de tratamento de água de São Carlos é 11.100 mg/L;

- Considerando as propriedades térmicas e mecânicas, o concreto produzido com o compósito pode ser utilizado na produção de placas e blocos de vedação, bem como material de enchimento.

# Capítulo 7 SUGESTÕES PARA A CONTINUIDADE DO TRABALHO

Este trabalho é um estudo pioneiro no desenvolvimento de um compósito com base no uso conjunto do lodo de estação de tratamento de água e serragem de madeira para aplicação como agregado graúdo em concreto. Portanto, no desenvolvimento do compósito e na produção dos concretos em estudo, não foram utilizados aditivos complementares, para que os resultados obtidos não ficassem vinculados ao uso destes materiais.

É possível melhorar as propriedades do compósito e, conseqüentemente, do concreto produzido com o compósito. Para tanto, com base nos resultados e nas conclusões obtidas, são oferecidas algumas sugestões para a continuidade deste trabalho:

- Reproduzir o compósito com melhor amassamento, adensamento e compactação dos materiais, com o uso, por exemplo, de uma máquina extrusora/prensa;
- Determinar a relação em massa entre os materiais lodo, serragem e água em função da melhor compactação e resistência. Para tanto, sugere-se a utilização dos procedimentos e especificações da NBR 7182:1986 (123). Esta norma prescreve o método para determinar a relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca de solos quando compactados. Neste trabalho, a relação em massa entre os materiais foi obtida em função da consistência e da trabalhabilidade para a produção do compósito;
- Diminuir a absorção de água do compósito, por exemplo, aumentando o tempo de imersão dos grãos no óleo de linhaça;
- Diminuindo a absorção de água do compósito, reproduzi-lo com menor dimensão máxima característica e maior variabilidade granulométrica. De acordo com Mehta e Monteiro (78), para um mesmo teor de cimento e

mesma consistência do concreto, as misturas de concreto contendo agregados grandes requerem menos água de amassamento do que aquelas que contem agregados menores. Entretanto, agregados grandes tendem a formar regiões de transição mais fracas contendo mais microfissuras;

- Realizar ensaios de durabilidade do concreto produzido com o compósito envolvendo a ação química por ataque de sulfato e comparar os valores obtidos com os de um concreto-referência;
- Reproduzir os concretos em estudo, substituindo a areia por agregado graúdo miúdo reciclado de resíduo de construção e demolição civil, e comparar as propriedades deste concreto com as propriedades dos concretos produzidos neste trabalho. Afinal, o objetivo da realização de trabalhos como o realizado é fomentar o desenvolvimento, a produção e a aplicação de materiais à base de resíduos para o desenvolvimento social, econômico e ecológico de nosso país.

# REFERÊNCIAS

1 BOURGEOIS, J. C.; WALSH, M. E.; GAGNON, G. A. Treatment of drinking water residuals: comparing sedimentation and dissolved air flotation performance with optimal cation ratios. **Water Research**, v. 38, n. 5, p. 1173-1182, Mar. 2004.

2 CORDEIRO, J. S. Processamento de lodos de Estações de Tratamento de Água (ETAs). In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final.** Rio de Janeiro: RIMA - ABES, 2001. cap. 5, p. 121-142.

3 MATOS, G.; WAGNER, L. Consumption of materials in the United States 1900 – 1995. **Annual Review of Energy and the Environment**, v. 23, p. 107-122.

4 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D3878-01:**. standard terminology for composite materials. West Conshohocken, Pa., U.S.A., 2001.

5 TITA, V. **Análise dinâmica teórica e experimental de vigas fabricadas a partir de materiais compósitos poliméricos reforçados.** 1999. 125p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

6 CALLISTER JR., W. D. **Ciência e engenharia de materiais:** uma introdução.Tradução de Sérgio Murilo Stamile Soares. 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 2002.

7 PANSHIN, A. J.; ZEEUW DE C. **Textbook of wood technology.** New York: McGraw-Hill, 1970.

8 GORNI, A. A. **A evolução dos materiais poliméricos ao longo do tempo**. Disponível em: <http://www.gorni.eng.br/hist_pol.html>. Acesso em: 10 abr. 2006.

9 BITTENCOURT, C. B. **Procedimento de ensaio para avaliar propriedades ao cisalhamento de materiais compósitos – método da viga com entalhe em V.** 2001. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia) – Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá, 2001. Disponível em:<http://www.iem.efei.br/dpr/td/julho2001/pdf/Td092.pdf>. Acesso em: set. 2005.

10 RATNER, B. D.; HOFFMAN, A. S.; SCHOEN F. J.; LEMONS, J. E. (Ed.). **Biomaterials science:** an introduction to materials in medicine. Orlando, FL, USA: Academic Press Inc., 1996.

11 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004:** resíduos sólidos – classificação. 2ª ed. Rio de Janeiro, 2004. 71p.

12 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005:** procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. 2ª ed. Rio de Janeiro, 2004. 16p.

13 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10007:** amostragem de resíduos sólidos. 2ª ed. Rio de Janeiro, 2004. 21p.

14 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006:** procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. 2ª ed. Rio de Janeiro, 2004. 3p.

15 ABOY, N. **Secagem natural e disposição final de lodos de estações de tratamento de água.** 1999. 101p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre,1999.

16 RICHTER, C. A. **Tratamento de lodos de estações de tratamento de água.** São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 2001.

17 SILVA, A. P.; BIDONE, F. R. A.; MARQUES, D. M. L. M. Avaliação da lixiviação de alumínio e da produção de ácidos graxos voláteis em reatores anaeróbicos utilizados para estudar a disposição final de lodos de estações de tratamento de água em aterros sanitários. In: CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERIA SANITÁRIA Y AMBIENTAL, 27., 2000, Porto Alegre. **Anais...** São Paulo: AIDIS, 2000. CD-ROM.

18 CORDEIRO, J. S. Importância do tratamento e disposição adequada dos lodos de ETA's. In: REALI, M. A. P. (Org.). **Noções gerais do tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água.** Rio de Janeiro: ABES, 1999. cap. 01, p. 01-18.

19 YUZHU, W. **Condicionamento de lodo de estação de tratamento de água:** estudo de caso**.** 1996. 419p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

20 REALI, M. A. P. Principais características quantitativas e qualitativas do lodo de ETA. In: REALI, M. A. P. (Org.). **Noções gerais do tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água**. Rio de Janeiro: ABES, 1999. v.1, p. 21-39.

21 SARON, A.; LEITE, V. M. B. Quantificação de lodo em estação de tratamento de água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21., 2001. João Pessoa, **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 2001. CD-ROM.

22 HSIEH, H. N.; RAGHU, D. **Criteria dewatering for water treatment plant residual monofill**. Denver: American Water Works Association Research Foundation, 1997. 199p.

23 FYTIANOS, K.; VOUDRIAS, E.; RAIKOS, N. Modelling of phosphorus removal from aqueous and wastewater samples using ferric iron. **Environmental Pollution**, v. 101, n.1, p. 123-130, 1998.

24 SOTERO-SANTOS, R. B.; ROCHA, O.; POVINELLI, J. Toxicity of ferric chloride sludge to aquatic organisms. **Chemosphere**, v. 68, n.4, p. 628-636, Jun. 2007.

25 BARBOSA, R. M. **Avaliação do impacto de efluentes (lodos) de ETA's à biota aquática através de testes de toxidade**. 2000. 199p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

26 ROCHOW, E. G. **Silicon and Silicones:** about Stone-age tools, antique pottery, modern ceramics, computers, space, materials and how they all got that way**.** Berlim: Spring-Verlag*,* 1987, p. 180.

27 ROBERTS, N. S.; CLOUGH, A.; BELLIA, J. P.; KIM, J. Y. Increased absortion of aluminium from a normal dietary intake in dementia. **Journal of Inorganic Biochemistry**, New York, v. 69, n.3, p. 171-176, 1998.

28 ONIWANWA, P. C.; IKADEH, G. C.; NWEZE, S. E. Aluminium contents of some raw and processed Nigerian foods. **Food Chemistry Barking**, v. 58, n. 4, p. 351-353, 1997.

29 CORDEIRO, J. S. **Disposição, tratabilidade e reuso de lodos de estações de tratamento de água.** 1981. 155f. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos. 1981.

30 TSUTIYA, M. T.; HIRATA, A. Y. Aproveitamento e disposição final de lodos de estação de tratamento de água do Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21., 2001, João Pessoa, **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 2001. CD-ROM.

31 CORNWELL, D. A.; BISHOP, M. M.; GOULD, R. R.; VANDERMEYDEN, C. **Handbook on water treatment plant wastes management**. Denver: American Water Works Association Research Foundation, 1987. 461p.

32 HOPPEN, C. **Reciclagem de lodo de ETA centrifugado na construção civil:** método alternativo para preservação ambiental**.** 2004. 132p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

33 BIDONE, F.; SILVA, A. P.; MARQUES, D. DA M. Lodos produzidos nas Estações de Tratamento de Água (ETA's): desidratação em leitos de secagem e codisposição em aterros sanitários. In: ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Resíduos sólidos do saneamento:** processamento, reciclagem e disposição final**.** Rio de Janeiro: RIMA - ABES, 2001. cap. 9. p. 215-244.

34 SENGUPTA, A. K.; SHI, B. Selective alum recovery from clarifier sludge. **Journal American Water Works Association**, v. 84, n. 1, p. 96-103, Jan. 1992.

35 PEAVY, H. S.; ROWE, D. R.; TCHOBANOGLOUS, G. **Environmental engineering.** Singapore: Mc-Graw Hill Book Companies Inc., 1985. p. 207-228.

36 CHU, W. Dye removal from textile dye wastewater using recycled alum sludge. **Water Research**, v. 35, n. 13, p. 3147-3152, Sept. 2001.

37 GUAN, X. H.; CHEN, G. H.; SHANG, C. Re-use of water treatment works sludge to enhance particulate pollutant removal from sewage. **Water Research**, v. 39, n. 15, p. 3433-3440, Sept. 2005.

38 SMITH, E.; NAIDU, R.; ALSTON, A. M. Arsenic in the soil environmental: a review. **Advances in Agronomy,** v. 64, p. 149-195, 1998.

39 MURPHY, E. A.; AUCOTT, M. An assessment of the amounts of arsenical pesticide use historically in a geographic area. **Science of The Total Environment**, v. 218, n. 02-03, p. 89-101, 1998.

40 SARKAR, D.; MAKRIS, K. C.; VANDANAPU, V.; DATTA, R. Arsenic immobilization in soils amended with drinking-water treatment residual. **Environmental Pollution**, v. 146, n. 02, p. 414-419, Mar. 2007.

41 KAWAMURA, S.; TRUSSELL, R. R. Main features of large water treatment plants in Japan. **Journal American Water Works Association**, v. 83, n. 06, p. 56-62, Jun. 1991.

42 SARTORI, H. J. F.; NUNES, M. S. Caracterização geotécnica de lodos provenientes de estações de tratamento de água e de esgotos sanitários. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19., Foz do Iguaçu. 1997. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 1997. CD-ROM.

43 MORITA, D. M.; SAMPAIO, A. O.; MIKI, M. K.; DAVID, A. C. Incorporação de lodos de estações de tratamento de água em blocos cerâmicos. In: ENCONTRO NACIONAL DE SANEAMENTO BÁSICO / SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 10., Braga/Portugal. 2002. **Anais...** Braga/Portugal: ABES, 2002. CD-ROM.

44 TEIXEIRA, S. R.; SOUZA, S. A.; SOUZA, N. R.; ALÉSSIO, P.; SANTOS, G. T. A. Effect of the addition of sludge from water treatment plant on the properties of structural ceramic material. **Cerâmica**, v. 52, p. 215-220, 2006.

45 RAUPP-PEREIRA, F.; SILVA, L.; SEGADÃES, A. M.; HOTZA, D.; LABRINCHA, J. A. Potable water filtration sludge: use as set retarder in one-coat plastering mortars. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 03, p. 646-653, Mar. 2007.

46 SALES, A.; CORDEIRO, J. S.; DE SOUZA, F. R. Estudo da resistência à compressão e da absorção de água de concretos produzidos com a adição de resíduo de construção e demolição e lodo de estação de tratamento de água. **Ambiente Construído**, v. 04, n. 02, p. 33-42, abr/jun 2004.

47 BUEHLMANN, U. Value-added opportunities for recycled wood. **Recycling woods**: a supplement to recycling works. Summer 2002, p.01-04.

48 BRAND, M. A.; MUÑIZ, G. I. B.; SILVA, D. A.; KLOCK, U. Caracterização do rendimento e quantificação dos resíduos gerados em serraria através do balanço de materiais. **Revista Floresta**, v. 32, n. 02, p. 247-259, 2002.

49 CLINE, R. W. **The economics of global warming**. Washington, DC.: Institute for International Economics, 1992. 399p.

50 ZOBEL, B. J.; BUIJTENEN, J. P. **Wood variation - its causes and control.** Berlin: Springer Verlag, 1989. 363p. (Springer Series in Wood Science).

51 REZENDE, M. A.; ESCOBEDO, J. F.; FERRAZ, E. S. Retratilidade volumétrica e densidade aparente da madeira. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, v. 39**,** p. 33-40, 1988.

52 STONE, J. E. The porous structure of wood and fibres. **Pulp and Paper Magazine of Canada**, p. 3-11, Jan. 1964.

53 BAMBER, R. K. The wood anatomy of eucalypts and papermaking. **Appita**, v. 38, n. 03, p. 210-216, May. 1985.

54 WEBB, P. A.; ORR, C. **Analytical methods in fine particle technology.** Norcross, GA, USA: Micromeritics Instrument Corporation, 1997. 301p.

55 SMITH, D. Characterization of lactose by Helium Pycnometer. **The microreport:** news and ideas for decision makers, v. 7, n. 2, 1996.

56 MOURA, M. J.; FIGUEIREDO, M. M. Aplicação das técnicas de picnometria de gás e porosimetria de mercúrio à caracterização da madeira *E. globulus*. **Silva Lusitana**, v. 10, p. 207-216, 2002.

57 CLARK, J. A. **Pulp technology and treatment for paper.** 2nd ed. San Francisco**:** Miller Freeman Publications, Inc. 1985. cap. 6.

58 RENDLE, B. J. Juvenile and adult wood. **Journal of the Institute of Wood Science**, v. 5, p. 58-61, 1960.

59 FOELKEL, C. E. B. et al. Celulose Kraft de madeiras juvenil e adulta de *Pinnus elliotti***. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, n. 12, p. 127-142, 1976.

60 FOELKEL, C. E. B. et al. Variabilidade no sentido radial de madeira de *Pinnus elliotti*. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, n.10, p. 1-11, 1975.

61 FONTES, P. J. P. de. **Auto-suficiência energética em serraria de *Pinus spp.*, e aproveitamento dos resíduos**. 1994. 104f. Dissertação (Mestrado). Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 1994.

62 WIHERSAARI, M. Evaluation of greenhouse gas emission risks from storage of wood residue. **Biomass and Bionergy**, v. 28, n. 05, p. 444-453, May. 2005.

63 HARTLEY, I. D.; WOOD, L. J. Hygroscopic properties of densified softwood pellets. **Biomass and Bioenergy**, v. 32, n. 01, p. 90-93, Jan. 2008.

64 KUNZ, A.; HIGARASHI M. M.; OLIVEIRA, P. A. V. de. **Utilização de maravalha e serragem como substrato para compostagem de dejetos suínos**. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2005. 5p. Comunicado Técnico, 414.

65 MONACO, P. A. Lo; MATOS, A. T. de; JORDÃO, C. P.; CECON, P. R.; MARTINEZ, M. A. Influência da granulometria da serragem de madeira como material filtrante no tratamento de águas residuárias. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 8, n. 1, p. 116-119, 2004.

66 ŠĆIBAN, M.; KLAŠNJA, M.; SKRBIĆ, B. Modified hardwood sawdust as absorbent of heavy metal ions from water. **Wood Science and Technology**, v. 40 p. 217-227, 2006.

67 KOENIG, K. M.; SYPKENS, C. W. Wood-plastic composites for market share. **Wood and Wood Products**, v. 107, n. 05, p. 49-58, 2002.

68 CLEMONS, C. Wood-plastic composites in the United States. **Forest Products Journal**, v. 52, n. 06, p. 10-18, 2002.

69 BRANDT, C. W.; FRIDLEY, K. J. Effect of load rate on flexural properties of wood-plastic composites. **Wood and Fiber Science**, v. 35, n. 01, p. 135-147, 2003.

70 SAHEB, D. N.; JOG, J. P. Natural fiber polymer composites: a review. **Advances in Polymer Technology**, v. 18, n. 04, p. 351-363, 1999.

71 SCHUT, J. H. Wood is good for compounding, sheet & profile**. Plastics Technology**, v. 45, n. 3, p. 46-47, Mar. 1999.

72 ENGLISH, B. Wood-filled plastics: an introduction. In: ANNUAL MEETING OF WINDOW AND DOOR MANUFACTURERS ASSOCIATION, 2000, USA. **Summaries...** Arizona, 2000.

73 BERALDO, A. L. Materiais não convencionais para construções rurais. In: SIMPÓSIO MATERIAIS NÃO CONVENCIONAIS PARA CONSTRUÇÕES RURAIS, 1997, Campina Grande, **Anais...** Campina Grande: Editora Marcone, 1997. cap. 01, p. 01-48.

74 PIMIENTA, P.; CHANDELLIER, J.; RUBAUD, M.; DUTREL, F.; NICOLE, H. **Étude de faisabilité des procédés de construction à base de béton de bois.** Paris: CSTB, 1994. p. 12-36.

75 BEDERINA, M.; MARMORET, L.; MEZREB, K.; KHENFER, M. M.; BALI, A.; QUÉNEUDEC, M. Effect of the addition of wood shavings on thermal conductivity of sand concretes: experimental study and modelling. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 03, p. 662-668, Mar. 2007.

76 ALBUQUERQUE, A. S. Agregados. In: FALCÃO BAUER, L. A. (Coord.). **Materiais de construção**. 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 1995. v. 1, cap. 04, p. 63-120.

77 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211:** agregados para concreto – especificação. 3ª ed. Rio de Janeiro, 1983. 9p.

78 MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto:** estruturas, propriedades e materiais. São Paulo: Editora Pini Ltda., 1994.

79 TANYILDIZI, H.; COSKUN, A. The effect of high temperature on compressive strength and splitting tensile strength of structural lightweight concrete containing fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 11, p. 2269-2275, Nov. 2008.

80 ÜNAL, O.; UYGUNOĞLU, T.; YILDIZ, A. Investigation of properties of low-strength lightweight concrete for thermal insulation. **Building and Environment**, v. 42, n. 02, p. 584-590, Feb. 2007.

81 DERMIRDAG, S.; GUNDUZ, L. Strength properties of volcanic slag aggregate lightweight concrete for high performance masonry units. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 03, p. 135-142, Mar. 2008.

82 ERDEM, T. K.; MERAL, Ç.; TOKYAY, M.; ERDOĞAN, T. Y. Use of perlite as a pozzolanic addition in producing blended cements. **Cement and Concrete Composites**. v. 29, n. 01, p. 13-21, Jan. 2007.

83 PRISZKULNIK, S.; SBRIGHI NETO, C.; CINCOTTO, M. A.; TEZUKA, Y. **Concretos refratários**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1972.

84 VARELLA, F. K. O. M.; TAVARES NETO, M.; WANDERLEY, R. F.; MAITELLI, C. W. P. Estudo comparativo entre concreto leve com argila expandida e concreto convencional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 44., 2002. Belo Horizonte. **Anais…** São Paulo: IBRACON, 2002. CD-ROM.

85 LO, T. Y.; CUI, H. Z.; TANG, W. C.; LEUNG, W. M. The effect of aggregate absorption on pore area at interfacial zone of lightweight concrete. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 04, p. 623-628, Apr. 2008.

86 MILED, K.; SAB, K.; ROY, R. L. Particle size effect on EPS lightweight concrete compressive strength: Experimental investigation and modeling. **Mechanics of Materials**, v. 39, n. 03, p. 222-240, Mar. 2007.

87 QIAO, X. C., NG, B. R.; TYRER, M.; POON, C. S.; CHEESEMAN, C. R. Production of lightweight concrete using incinerator bottom ash. **Construction and Building Materials,** v. 22, n. 04, p. 473-480, Apr. 2008.

88 COATANLEM, P.; JAUBERTHIE, R.; RENDELL, F. Lightweight wood chipping concrete durability. **Construction and Building Materials**, v. 20, n. 09, p. 776-781, Nov. 2006.

89 CHIOU, I. J.; WANG, K. S.; CHEN, C. H.; LIN, Y. T. Lightweight aggregate made from sewage sludge and incinerated ash. **Waste Management**, v. 26, n. 12, p. 1453-1461, 2006.

90 KAYALI, O. Fly ash lightweight aggregates in high performance concrete. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 12, p. 2393-2399, Dec. 2008.

91 AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Guide to durable concrete**:** reported by ACI Committee 201. **ACI Materials Journal**, v. 88, n. 05, p. 544-582, Sep./Oct., 1991.

92 MEHTA, P. K.; GERWICK, B. C. Jr. Cracking-corrosion interaction in concrete exposed to marine environment. **Concrete International**, v. 04, n. 10, p. 45-51, 1982.

93 VERBECK, G. J.; LANDGREN, R. Influence of physical characteristics of aggregate on the frost resistance of concrete. **American Society of Testing and Materials**, v. 30, p. 1063-1079, 1960.

94 ROSSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, M. V. C. Concreto estrutural leve. In: ISAIA, G C. (Org.) **Concreto:** ensino, pesquisa e realizações**.** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2005. v.02, p. 1333-1362.

95 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181:** solo – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984. 13p.

96 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13600:** solo – determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440$^{o}$C. Rio de Janeiro, 1996. 2p.

97 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459:** solo – determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984. 6p.

98 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180:** solo – determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro. 1984. 3p.

99 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733:** cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991. 5p.

100 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215:** cimento Portland – determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996. 8p.

101 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7217:** agregados – determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987. 3p.

102 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7216:** amostragem de agregados. Rio de Janeiro, 1987. 4p.

103 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7251:** agregado em estado seco e solto – determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1982. 3p.

104 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7810:** agregado em estado compactado seco – determinação da massa unitária. Rio de Janeiro, 1983. 3p.

105 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9776:** agregados – determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do Frasco de Chapman. Rio de Janeiro, 1987. 3p.

106 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457:** agregados – determinação do inchamento de agregado miúdo. Rio de Janeiro, 1987. 5p.

107 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM53:** agregado graúdo – determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003. 8p.

108 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7219:** agregados – determinação do teor de materiais pulverulentos. Rio de Janeiro, 1987. 3p.

109 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7809:** agregado graúdo – determinação do índice de forma pelo método do paquímetro. Rio de Janeiro, 1983. 3p.

110 HOLM, T. A.; BREMNER, T. W. **State-of-the-art report on high-strength, high durability structural low-density concrete for applications in severe marine environments.** USA: US Army Corps of Engineers, 2000. 104p.

111 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738:** moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 1994. 8p.

112 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7223:** concreto – determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1982. 6p.

113 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739:** concreto – ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994. 4p.

114 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222:** argamassas e concretos – determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1983. 3p.

115 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778:** argamassa e concretos endurecidos – determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005. 4p.

116 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522:** concreto – determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro, 2003. 9p.

117 AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS. ASTM C779**:** standard test method for abrasion resident of horizontal concrete surfaces. In: _____. **Annual book of ASTM standards.** Philadelphia, 1991.

118 AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS. ASTM C704**:** standard test method for abrasion resistance of refractory materials at room temperature. In: _____. **Annual book of ASTM standards.** Philadelphia, 1994. v. 15.01.

119 AMERICAN SOCIETY for TESTING and MATERIALS. ASTM G87-02**:** standard practice for conducting moist $SO_2$ tests. In: _____. **Annual book of ASTM Standards**. Philadelphia, 2007. v. 03.02.

120 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8096:** material metálico revestido e não revestido – corrosão por exposição ao dióxido de enxofre. Rio de Janeiro, 1983. 3p.

121 ABOISSA ÓLEOS VEGETAIS. **Óleo de linhaça:** especificações disponíveis de óleo de linhaça no mercado mundial. São Paulo, 2007. Disponível em: <http://www.aboissa.com.br/linhaca/index.htm>. Acesso em: fev, 2007.

122 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2:** desempenho térmico de edificações – métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005. 34p.

123 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182:** solo – ensaio de compactação. Rio de Janeiro. 1986. 10p.

# APÊNDICE A – Porosimetria de mercúrio

A Tabela 01 contém todos os valores obtidos no ensaio experimental de porosimetria de mercúrio da serragem de madeira.

Tabela 01 – Todos os valores obtidos no ensaio experimental de porosimetria de mercúrio da serragem de madeira.

| Pressão (psia) | Diâmetro Poro (µm) | Diâmetro Médio (µm) | Volume Cumulativo (mL/g) | Volume Incremental (mL/g) | Log. Dif. Vol. dV/dlogD mL/g |
|---|---|---|---|---|---|
| 0,57 | 316,3788 | 316,3788 | 0,0000 | 0,0000 | 7,3200E-02 |
| 0,77 | 234,1776 | 275,2782 | 0,0096 | 0,0096 | 7,6710E-02 |
| 0,96 | 189,1544 | 211,6660 | 0,0173 | 0,0077 | 9,7270E-02 |
| 1,18 | 153,2306 | 171,1925 | 0,0271 | 0,0098 | 9,7410E-02 |
| 1,38 | 131,0128 | 142,1217 | 0,0330 | 0,0059 | 8,4880E-02 |
| 1,59 | 114,0733 | 122,5430 | 0,0380 | 0,0050 | 7,9120E-02 |
| 1,80 | 100,4516 | 107,2625 | 0,0421 | 0,0041 | 7,2500E-02 |
| 2,02 | 89,4182 | 94,9349 | 0,0457 | 0,0035 | 6,5500E-02 |
| 2,23 | 80,9956 | 85,2069 | 0,0484 | 0,0027 | 6,0180E-02 |
| 2,46 | 73,5266 | 77,2611 | 0,0507 | 0,0023 | 5,7610E-02 |
| 2,69 | 67,3146 | 70,4206 | 0,0529 | 0,0022 | 5,6740E-02 |
| 2,96 | 61,0509 | 64,1827 | 0,0554 | 0,0025 | 5,6020E-02 |
| 3,20 | 56,5374 | 58,7941 | 0,0571 | 0,0017 | 5,4660E-02 |
| 3,43 | 52,6991 | 54,6182 | 0,0589 | 0,0017 | 5,3310E-02 |
| 3,69 | 49,0565 | 50,8778 | 0,0605 | 0,0016 | 5,1770E-02 |
| 3,93 | 45,9978 | 47,5271 | 0,0619 | 0,0015 | 5,1030E-02 |
| 4,34 | 41,7008 | 43,8493 | 0,0639 | 0,0020 | 5,3700E-02 |
| 4,92 | 36,7484 | 39,2246 | 0,0671 | 0,0031 | 6,8710E-02 |
| 5,61 | 32,2519 | 34,5001 | 0,0716 | 0,0045 | 1,0400E-01 |
| 6,00 | 30,1606 | 31,2063 | 0,0749 | 0,0033 | 1,2530E-01 |

(Continua)

(Continuação)

| Pressão (psia) | Diâmetro Poro (µm) | Diâmetro Médio (µm) | Volume Cumulativo (mL/g) | Volume Incremental (mL/g) | Log. Dif. Vol. dV/dlogD mL/g |
|---|---|---|---|---|---|
| 6,25 | 28,9273 | 29,5940 | 0,0777 | 0,0028 | 1,3990E-01 |
| 6,56 | 27,5650 | 28,2462 | 0,0805 | 0,0028 | 1,5650E-01 |
| 7,24 | 24,9667 | 26,2659 | 0,0879 | 0,0074 | 1,8370E-01 |
| 7,76 | 23,3131 | 24,1399 | 0,0940 | 0,0061 | 2,0130E-01 |
| 8,97 | 21,8821 | 22,5976 | 0,0995 | 0,0056 | 2,1590E-01 |
| 8,98 | 20,1437 | 21,0129 | 0,1075 | 0,0080 | 2,2800E-01 |
| 9,96 | 18,1635 | 19,1536 | 0,1185 | 0,0110 | 2,3300E-01 |
| 11,11 | 16,2842 | 17,2239 | 0,1294 | 0,0108 | 2,2490E-01 |
| 12,24 | 14,7744 | 15,5293 | 0,1385 | 0,0092 | 2,1840E-01 |
| 13,72 | 13,1820 | 13,9782 | 0,1493 | 0,0108 | 2,1340E-01 |
| 14,97 | 12,0827 | 12,6323 | 0,1573 | 0,0080 | 2,0790E-01 |
| 16,11 | 11,2239 | 11,6533 | 0,1639 | 0,0066 | 2,0040E-01 |
| 17,22 | 10,5025 | 10,8632 | 0,1697 | 0,0058 | 1,9180E-01 |
| 18,24 | 9,9143 | 10,2084 | 0,1744 | 0,0047 | 1,8350E-01 |
| 19,21 | 9,4156 | 9,6650 | 0,1784 | 0,0039 | 1,7470E-01 |
| 20,13 | 8,9868 | 9,2012 | 0,1818 | 0,0034 | 1,6650E-01 |
| 21,11 | 8,5664 | 8,7766 | 0,1853 | 0,0035 | 1,5880E-01 |
| 22,08 | 8,1926 | 8,3795 | 0,1882 | 0,0029 | 1,4880E-01 |
| 22,96 | 7,8757 | 8,0341 | 0,1907 | 0,0025 | 1,3600E-01 |
| 23,80 | 7,5991 | 7,7374 | 0,1930 | 0,0002 | 1,2180E-01 |
| 24,65 | 7,3370 | 7,4681 | 0,1949 | 0,0019 | 1,0700E-01 |
| 25,55 | 7,0779 | 7,2075 | 0,1971 | 0,0022 | 9,1830E-02 |
| 30,00 | 6,0287 | 6,5533 | 0,2001 | 0,0030 | 4,5810E-02 |
| 58,81 | 3,0237 | 4,5262 | 0,2139 | 0,0138 | 3,3890E-02 |
| 89,64 | 2,0176 | 2,5207 | 0,2182 | 0,0043 | 2,5560E-02 |
| 119,47 | 1,5139 | 1,7658 | 0,2216 | 0,0034 | 2,3740E-02 |
| 149,30 | 1,2114 | 1,3626 | 0,2235 | 0,0019 | 1,6550E-02 |

(Continua)

(Continuação)

| Pressão (psia) | Diâmetro Poro (µm) | Diâmetro Médio (µm) | Volume Cumulativo (mL/g) | Volume Incremental (mL/g) | Log. Dif. Vol. dV/dlogD mL/g |
|---|---|---|---|---|---|
| 179,63 | 1,0069 | 1,1091 | 0,2247 | 0,0012 | 1,3730E-02 |
| 210,46 | 0,8594 | 0,9331 | 0,2256 | 0,0009 | 1,1300E-02 |
| 249,80 | 0,7240 | 0,7917 | 0,2263 | 0,0007 | 8,8590E-03 |
| 298,63 | 0,6056 | 0,6648 | 0,2269 | 0,0006 | 6,2460E-03 |
| 349,30 | 0,5178 | 0,5617 | 0,2273 | 0,0003 | 5,7230E-03 |
| 401,30 | 0,4507 | 0,4842 | 0,2277 | 0,0004 | 5,0250E-03 |
| 449,80 | 0,4021 | 0,4264 | 0,2279 | 0,0002 | 3,2250E-03 |
| 499,13 | 0,3624 | 0,3822 | 0,2279 | 0,0001 | 2,7070E-03 |
| 599,63 | 0,3016 | 0,3320 | 0,2282 | 0,0003 | 2,7100E-03 |
| 697,80 | 0,2592 | 0,2804 | 0,2283 | 0,0001 | 1,6070E-03 |
| 798,46 | 0,2265 | 0,2429 | 0,2284 | 0,0001 | 1,1360E-03 |
| 897,13 | 0,2016 | 0,2141 | 0,2285 | 0,0001 | 6,3000E-04 |
| 997,46 | 0,1813 | 0,1915 | 0,2285 | 0,0000 | 1,3040E-04 |
| 1146,80 | 0,1577 | 0,1695 | 0,2285 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 1295,46 | 0,1396 | 0,1487 | 0,2285 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 1446,13 | 0,1251 | 0,1323 | 0,2285 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 1596,13 | 0,1133 | 0,1192 | 0,2285 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 1746,80 | 0,1035 | 0,1084 | 0,2285 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 1896,80 | 0,0954 | 0,0994 | 0,2285 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 2198,97 | 0,0822 | 0,0888 | 0,2285 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 2498,63 | 0,0724 | 0,0773 | 0,2285 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 2795,47 | 0,0647 | 0,0685 | 0,2285 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 3095,13 | 0,0584 | 0,0616 | 0,2285 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 3395,80 | 0,0533 | 0,0558 | 0,2285 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 3794,14 | 0,0477 | 0,0505 | 0,2285 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 4192,64 | 0,0431 | 0,0454 | 0,2285 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 4592,14 | 0,0394 | 0,0413 | 0,2285 | 0,0000 | 0,0000E+00 |

(Continua)

(Continuação)

| Pressão (psia) | Diâmetro Poro (µm) | Diâmetro Médio (µm) | Volume Cumulativo (mL/g) | Volume Incremental (mL/g) | Log. Dif. Vol. dV/dlogD mL/g |
|---|---|---|---|---|---|
| 4988,14 | 0,0363 | 0,0378 | 0,2285 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 5490,31 | 0,0329 | 0,0346 | 0,2285 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 5986,81 | 0,0302 | 0,0316 | 0,2285 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 6487,47 | 0,0279 | 0,0290 | 0,2285 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 6985,31 | 0,0259 | 0,0269 | 0,2285 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 7484,81 | 0,0242 | 0,0250 | 0,2285 | 0,0000 | 2,4620E-06 |
| 7985,48 | 0,0226 | 0,0234 | 0,2285 | 0,0000 | 2,5720E-04 |
| 8508,31 | 0,0213 | 0,0220 | 0,2285 | 0,0000 | 2,0070E-03 |
| 9007,98 | 0,0201 | 0,0207 | 0,2285 | 0,0000 | 4,3190E-03 |
| 9502,65 | 0,0190 | 0,0196 | 0,2285 | 0,0001 | 7,0270E-03 |
| 10003,48 | 0,0181 | 0,0186 | 0,2289 | 0,0003 | 9,5080E-03 |
| 10502,65 | 0,0172 | 0,0177 | 0,2290 | 0,0001 | 1,1900E-02 |
| 11004,31 | 0,0164 | 0,0168 | 0,2294 | 0,0004 | 1,3980E-02 |
| 11505,65 | 0,0157 | 0,0161 | 0,2296 | 0,0002 | 1,5870E-02 |
| 12009,65 | 0,0151 | 0,0154 | 0,2299 | 0,0003 | 1,7930E-02 |
| 12503,82 | 0,0145 | 0,0148 | 0,2302 | 0,0003 | 1,9910E-02 |
| 13005,82 | 0,0139 | 0,0142 | 0,2305 | 0,0003 | 2,1080E-02 |
| 13504,48 | 0,0134 | 0,0136 | 0,2309 | 0,0004 | 2,1890E-02 |
| 14004,48 | 0,0129 | 0,0132 | 0,2314 | 0,0005 | 2,2180E-02 |
| 14498,32 | 0,0125 | 0,0127 | 0,2318 | 0,0004 | 2,1910E-02 |
| 15001,82 | 0,0121 | 0,0123 | 0,2321 | 0,0003 | 2,1360E-02 |
| 15998,99 | 0,0113 | 0,0117 | 0,2326 | 0,0005 | 2,0530E-02 |
| 16991,99 | 0,0106 | 0,0110 | 0,2331 | 0,0005 | 2,0980E-02 |
| 17992,32 | 0,0101 | 0,0103 | 0,2336 | 0,0005 | 2,2980E-02 |
| 18990,82 | 0,0095 | 0,0098 | 0,2342 | 0,0006 | 2,5670E-02 |
| 19987,32 | 0,0090 | 0,0093 | 0,2348 | 0,0007 | 2,7920E-02 |
| 20985,16 | 0,0086 | 0,0088 | 0,2354 | 0,0006 | 3,0200E-02 |

(Continua)

(Continuação)

| Pressão (psia) | Diâmetro Poro (μm) | Diâmetro Médio (μm) | Volume Cumulativo (mL/g) | Volume Incremental (mL/g) | Log. Dif. Vol. dV/dlogD mL/g |
|---|---|---|---|---|---|
| 21984,33 | 0,0082 | 0,0084 | 0,2360 | 0,0006 | 3,2140E-02 |
| 22982,83 | 0,0079 | 0,0080 | 0,2367 | 0,0007 | 3,4340E-02 |
| 23984,83 | 0,0075 | 0,0077 | 0,2372 | 0,0005 | 3,6240E-02 |
| 24979,50 | 0,0072 | 0,0074 | 0,2380 | 0,0007 | 3,9030E-02 |
| 25972,00 | 0,0070 | 0,0071 | 0,2386 | 0,0006 | 4,1800E-02 |
| 26976,00 | 0,0067 | 0,0068 | 0,2394 | 0,0009 | 4,3470E-02 |
| 27972,67 | 0,0065 | 0,0066 | 0,2400 | 0,0005 | 4,5080E-02 |
| 28975,83 | 0,0062 | 0,0064 | 0,2406 | 0,0007 | 4,5830E-02 |
| 29470,33 | 0,0061 | 0,0062 | 0,2412 | 0,0005 | 4,5830E-02 |
| 28948,83 | 0,0062 | 0,0062 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 27953,00 | 0,0065 | 0,0064 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 26963,33 | 0,0067 | 0,0066 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 25974,16 | 0,0070 | 0,0068 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 24967,15 | 0,0072 | 0,0071 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 23981,65 | 0,0075 | 0,0074 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 22981,15 | 0,0079 | 0,0077 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 21987,64 | 0,0082 | 0,0080 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 20987,14 | 0,0086 | 0,0084 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 19988,97 | 0,0090 | 0,0088 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 18989,47 | 0,0095 | 0,0093 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 17990,80 | 0,0101 | 0,0098 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 16995,96 | 0,0106 | 0,0103 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 15995,29 | 0,0113 | 0,0110 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 14988,13 | 0,0121 | 0,0117 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 14485,96 | 0,0125 | 0,0123 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 13990,12 | 0,0129 | 0,0127 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |

(Continua)

(Continuação)

| Pressão (psia) | Diâmetro Poro (µm) | Diâmetro Médio (µm) | Volume Cumulativo (mL/g) | Volume Incremental (mL/g) | Log. Dif. Vol. dV/dlogD mL/g |
|---|---|---|---|---|---|
| 13488,62 | 0,0134 | 0,0132 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 12988,12 | 0,0139 | 0,0137 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 12485,45 | 0,0145 | 0,0142 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 11989,95 | 0,0151 | 0,0148 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 11488,29 | 0,0157 | 0,0154 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 10988,95 | 0,0165 | 0,0161 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 10489,12 | 0,0172 | 0,0169 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 9990,45 | 0,0181 | 0,0177 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 9488,28 | 0,0191 | 0,0186 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 8991,11 | 0,0201 | 0,0196 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 8489,45 | 0,0213 | 0,0207 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 7989,61 | 0,0226 | 0,0220 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 7492,11 | 0,0241 | 0,0234 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 6989,94 | 0,0259 | 0,0250 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 6492,28 | 0,0279 | 0,0269 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 5991,28 | 0,0302 | 0,0290 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 5490,28 | 0,0329 | 0,0316 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 4991,44 | 0,0362 | 0,0346 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 4491,27 | 0,0403 | 0,0383 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 3991,27 | 0,0453 | 0,0428 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 3490,94 | 0,0518 | 0,0486 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 2993,27 | 0,0604 | 0,0561 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 2493,94 | 0,0725 | 0,0665 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 1991,60 | 0,0908 | 0,0817 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 1509,60 | 0,1198 | 0,1053 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 1002,27 | 0,1805 | 0,1501 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 899,77 | 0,2010 | 0,1907 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |

(Continua)

(Continuação)

| Pressão (psia) | Diâmetro Poro (µm) | Diâmetro Médio (µm) | Volume Cumulativo (mL/g) | Volume Incremental (mL/g) | Log. Dif. Vol. dV/dlogD mL/g |
|---|---|---|---|---|---|
| 797,60 | 0,2268 | 0,2139 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 699,60 | 0,2585 | 0,2426 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 597,27 | 0,3028 | 0,2807 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 384,77 | 0,4701 | 0,3864 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 299,61 | 0,6037 | 0,5369 | 0,2412 | 0,0000 | 0,0000E+00 |
| 200,77 | 0,9008 | 0,7522 | 0,2412 | 0,0000 | 1,5850E-05 |
| 99,94 | 1,8097 | 1,3552 | 0,2407 | -0,0005 | 5,0630E-03 |
| 70,11 | 2,5797 | 2,1947 | 0,2394 | -0,0013 | 8,6550E-03 |
| 50,11 | 3,6091 | 3,0944 | 0,2380 | -0,0015 | 1,6590E-02 |
| 29,62 | 6,1062 | 4,8576 | 0,2338 | -0,0042 | 1,8450E-02 |

A Tabela 02 contém todos os valores obtidos no ensaio experimental de porosimetria de mercúrio do compósito.

Tabela 02 – Todos os valores obtidos no ensaio experimental de porosimetria de mercúrio do compósito.

| Pressão (psia) | Diâmetro (µm) | Diâmetro Médio (µm) | Volume Cumulativo (mL/g) | Volume Incremental (mL/g) | Log. Dif. Vol. dV/dlogD mL/g |
|---|---|---|---|---|---|
| 0,54 | 332,5710 | 332,5710 | 0,0000 | 0,0000 | 1,659E-03 |
| 0,80 | 225,7028 | 279,1369 | 0,0003 | 0,0003 | 1,701E-03 |
| 1,13 | 159,4211 | 192,5619 | 0,0005 | 0,0003 | 1,324E-03 |
| 1,52 | 119,3685 | 139,3948 | 0,0006 | 0,0001 | 4,249E-04 |
| 2,23 | 81,0803 | 100,2244 | 0,0007 | 0,0001 | 3,324E-04 |
| 2,98 | 60,7603 | 70,9203 | 0,0007 | 0,0000 | 3,594E-04 |
| 3,92 | 46,0915 | 53,4259 | 0,0008 | 0,0000 | 3,862E-04 |
| 4,99 | 36,2221 | 41,1568 | 0,0008 | 0,0000 | 4,259E-04 |
| 5,99 | 30,1858 | 33,2040 | 0,0009 | 0,0000 | 3,682E-04 |
| 6,76 | 26,7477 | 28,4667 | 0,0009 | 0,0000 | 3,860E-04 |
| 7,65 | 23,6428 | 25,1952 | 0,0009 | 0,0000 | 6,513E-04 |
| 8,33 | 21,7214 | 22,6821 | 0,0009 | 0,0000 | 8,490E-04 |
| 9,37 | 19,3120 | 20,5167 | 0,0010 | 0,0001 | 9,721E-04 |
| 10,38 | 17,4192 | 18,3656 | 0,0010 | 0,0000 | 1,008E-03 |
| 11,46 | 15,7874 | 16,6033 | 0,0011 | 0,0000 | 1,433E-03 |
| 12,35 | 14,6430 | 15,2152 | 0,0011 | 0,0000 | 2,421E-03 |
| 13,49 | 13,4102 | 14,0266 | 0,0012 | 0,0001 | 4,750E-03 |
| 14,45 | 12,5204 | 12,9653 | 0,0014 | 0,0002 | 8,341E-03 |
| 15,45 | 11,7053 | 12,1129 | 0,0016 | 0,0003 | 1,400E-02 |
| 16,39 | 11,0380 | 11,3717 | 0,0020 | 0,0004 | 2,170E-02 |
| 17,37 | 10,4107 | 10,7243 | 0,0026 | 0,0006 | 2,846E-02 |
| 18,40 | 9,8299 | 10,1203 | 0,0034 | 0,0008 | 3,219E-02 |
| 19,36 | 9,3398 | 9,5848 | 0,0046 | 0,0013 | 3,226E-02 |

(Continua)

(Continuação)

| Pressão (psia) | Diâmetro (μm) | Diâmetro Médio (μm) | Volume Cumulativo (mL/g) | Volume Incremental (mL/g) | Log. Dif. Vol. dV/dlogD mL/g |
|---|---|---|---|---|---|
| 20,50 | 8,8205 | 9,0801 | 0,0054 | 0,0008 | 2,940E-02 |
| 21,66 | 8,3506 | 8,5855 | 0,0060 | 0,0006 | 2,468E-02 |
| 22,82 | 7,9264 | 8,1385 | 0,0063 | 0,0003 | 2,029E-02 |
| 23,96 | 7,5482 | 7,7373 | 0,0067 | 0,0004 | 2,038E-02 |
| 24,98 | 7,2413 | 7,3948 | 0,0070 | 0,0003 | 2,325E-02 |
| 26,00 | 6,9560 | 7,0986 | 0,0072 | 0,0003 | 2,759E-02 |
| 29,92 | 6,0450 | 6,5005 | 0,0096 | 0,0024 | 4,513E-02 |
| 59,76 | 3,0263 | 4,5357 | 0,0256 | 0,0160 | 4,998E-02 |
| 89,52 | 2,0205 | 2,5234 | 0,0340 | 0,0084 | 7,629E-02 |
| 119,55 | 1,5129 | 1,7667 | 0,0478 | 0,0138 | 1,040E-01 |
| 149,30 | 1,2114 | 1,3622 | 0,0562 | 0,0085 | 7,647E-02 |
| 179,58 | 1,0071 | 1,1093 | 0,0616 | 0,0054 | 6,077E-02 |
| 209,04 | 0,8652 | 0,9362 | 0,0653 | 0,0037 | 5,308E-02 |
| 249,01 | 0,7263 | 0,7958 | 0,0691 | 0,0038 | 4,822E-02 |
| 298,97 | 0,6050 | 0,6656 | 0,0728 | 0,0037 | 4,475E-02 |
| 349,94 | 0,5168 | 0,5609 | 0,0757 | 0,0029 | 4,188E-02 |
| 398,25 | 0,4541 | 0,4855 | 0,0780 | 0,0023 | 4,058E-02 |
| 448,23 | 0,4035 | 0,4288 | 0,0801 | 0,0021 | 4,007E-02 |
| 497,88 | 0,3633 | 0,3834 | 0,0819 | 0,0018 | 3,989E-02 |
| 597,19 | 0,3029 | 0,3331 | 0,0851 | 0,0031 | 3,916E-02 |
| 696,49 | 0,2597 | 0,2813 | 0,0876 | 0,0026 | 3,857E-02 |
| 796,31 | 0,2271 | 0,2434 | 0,0899 | 0,0022 | 3,924E-02 |
| 896,95 | 0,2016 | 0,2144 | 0,0919 | 0,0021 | 4,051E-02 |
| 995,77 | 0,1816 | 0,1916 | 0,0938 | 0,0019 | 4,159E-02 |
| 1145,08 | 0,1579 | 0,1698 | 0,0964 | 0,0026 | 4,305E-02 |
| 1295,55 | 0,1396 | 0,1488 | 0,0987 | 0,0023 | 4,529E-02 |
| 1444,70 | 0,1252 | 0,1324 | 0,1009 | 0,0022 | 4,798E-02 |

(Continua)

(Continuação)

| Pressão (psia) | Diâmetro (µm) | Diâmetro Médio (µm) | Volume Cumulativo (mL/g) | Volume Incremental (mL/g) | Log. Dif. Vol. dV/dlogD mL/g |
|---|---|---|---|---|---|
| 1595,35 | 0,1134 | 0,1193 | 0,1030 | 0,0021 | 5,086E-02 |
| 1746,16 | 0,1036 | 0,1085 | 0,1051 | 0,0020 | 5,400E-02 |
| 1896,64 | 0,0954 | 0,0995 | 0,1071 | 0,0020 | 5,719E-02 |
| 2197,44 | 0,0823 | 0,0888 | 0,1109 | 0,0039 | 6,390E-02 |
| 2496,90 | 0,0724 | 0,7740 | 0,1146 | 0,0037 | 7,131E-02 |
| 2798,20 | 0,0646 | 0,0685 | 0,1183 | 0,0037 | 7,854E-02 |
| 3096,50 | 0,0584 | 0,0615 | 0,1219 | 0,0036 | 8,565E-02 |
| 3392,30 | 0,0533 | 0,0559 | 0,1254 | 0,0035 | 9,310E-02 |
| 3795,42 | 0,0477 | 0,0505 | 0,1302 | 0,0048 | 1,039E-01 |
| 4191,21 | 0,0432 | 0,0454 | 0,1349 | 0,0047 | 1,135E-01 |
| 4589,66 | 0,0394 | 0,0413 | 0,1396 | 0,0047 | 1,219E-01 |
| 4990,28 | 0,0362 | 0,0378 | 0,1441 | 0,0045 | 1,277E-01 |
| 5488,40 | 0,0330 | 0,0346 | 0,1496 | 0,0055 | 1,318E-01 |
| 5986,35 | 0,0302 | 0,0316 | 0,1546 | 0,0050 | 1,315E-01 |
| 9487,64 | 0,0279 | 0,0290 | 0,1593 | 0,0047 | 1,253E-01 |
| 6984,60 | 0,0259 | 0,0269 | 0,1633 | 0,0040 | 1,163E-01 |
| 7483,90 | 0,0242 | 0,0250 | 0,1665 | 0,0032 | 1,056E-01 |
| 7983,55 | 0,0227 | 0,0234 | 0,1694 | 0,0028 | 9,485E-02 |
| 8510,52 | 0,0213 | 0,0220 | 0,1719 | 0,0026 | 8,426E-02 |
| 9003,84 | 0,0201 | 0,0207 | 0,1739 | 0,0019 | 7,503E-02 |
| 9504,49 | 0,0190 | 0,0196 | 0,1755 | 0,0017 | 6,700E-02 |
| 10008,14 | 0,0181 | 0,0186 | 0,1768 | 0,0013 | 6,089E-02 |
| 10505,97 | 0,0172 | 0,0176 | 0,1779 | 0,0011 | 5,685E-02 |
| 11006,79 | 0,0164 | 0,0168 | 0,1790 | 0,0011 | 5,428E-02 |
| 11501,28 | 0,0157 | 0,0161 | 0,1801 | 0,0010 | 5,279E-02 |
| 12002,61 | 0,0151 | 0,0154 | 0,1811 | 0,0010 | 5,184E-02 |
| 12502,93 | 0,0145 | 0,0148 | 0,1820 | 0,0009 | 5,094E-02 |

(Continua)

(Continuação)

| Pressão (psia) | Diâmetro (μm) | Diâmetro Médio (μm) | Volume Cumulativo (mL/g) | Volume Incremental (mL/g) | Log. Dif. Vol. dV/dlogD mL/g |
|---|---|---|---|---|---|
| 13009,59 | 0,0139 | 0,0142 | 0,1829 | 0,0009 | 4,976E-02 |
| 13502,92 | 0,0134 | 0,0136 | 0,1837 | 0,0008 | 4,851E-02 |
| 14003,91 | 0,0129 | 0,0132 | 0,1844 | 0,0007 | 4,726E-02 |
| 14497,57 | 0,0125 | 0,0127 | 0,1851 | 0,0007 | 4,609E-02 |
| 14996,07 | 0,0121 | 0,0123 | 0,1858 | 0,0007 | 4,499E-02 |
| 15993,56 | 0,0113 | 0,0117 | 0,1870 | 0,0012 | 4,319E-02 |
| 16997,21 | 0,0106 | 0,0110 | 0,1881 | 0,0011 | 4,171E-02 |
| 17995,71 | 0,0101 | 0,0103 | 0,1891 | 0,0010 | 4,037E-02 |
| 18984,87 | 0,0095 | 0,0098 | 0,1901 | 0,0010 | 3,937E-02 |
| 19986,19 | 0,0090 | 0,0093 | 0,1909 | 0,0009 | 3,945E-02 |
| 20984,35 | 0,0086 | 0,0088 | 0,1917 | 0,0008 | 7,359E-02 |
| 21983,52 | 0,0082 | 0,0084 | 0,1924 | 0,0007 | 1,001E-01 |
| 22983,34 | 0,0079 | 0,0080 | 0,1932 | 0,0007 | 1,151E-01 |
| 23980,84 | 0,0075 | 0,0077 | 0,1938 | 0,0006 | 1,217E-01 |
| 24974,74 | 0,0072 | 0,0074 | 0,2043 | 0,0005 | 1,208E-01 |
| 25977,57 | 0,0070 | 0,0071 | 0,2049 | 0,0006 | 1,129E-01 |
| 26976,40 | 0,0067 | 0,0068 | 0,2054 | 0,0006 | 9,870E-02 |
| 27970,73 | 0,0065 | 0,0066 | 0,2060 | 0,0005 | 7,886E-02 |
| 28972,39 | 0,0062 | 0,0064 | 0,2065 | 0,0005 | 5,678E-02 |
| 29467,06 | 0,0061 | 0,0062 | 0,2068 | 0,0003 | 4,543E-02 |
| 28951,72 | 0,0062 | 0,0062 | 0,2068 | 0,0000 | 0,000E+00 |
| 27961,55 | 0,0065 | 0,0064 | 0,2068 | 0,0000 | 0,000E+00 |
| 26970,55 | 0,0067 | 0,0066 | 0,2068 | 0,0000 | 0,000E+00 |
| 25979,21 | 0,0070 | 0,0068 | 0,2068 | 0,0000 | 5,160E-08 |
| 24981,38 | 0,0072 | 0,0071 | 0,2068 | 0,0000 | 1,464E-04 |
| 23978,71 | 0,0075 | 0,0074 | 0,2068 | 0,0000 | 1,046E-03 |
| 22987,54 | 0,0079 | 0,0077 | 0,2068 | 0,0000 | 2,589E-03 |

(Continua)

(Continuação)

| Pressão (psia) | Diâmetro (µm) | Diâmetro Médio (µm) | Volume Cumulativo (mL/g) | Volume Incremental (mL/g) | Log. Dif. Vol. dV/dlogD mL/g |
|---|---|---|---|---|---|
| 21987,87 | 0,0082 | 0,0080 | 0,2067 | -0,0001 | 4,422E-03 |
| 20990,21 | 0,0086 | 0,0084 | 0,2066 | -0,0001 | 6,158E-03 |
| 19984,37 | 0,0091 | 0,0088 | 0,2064 | -0,0001 | 7,117E-03 |
| 18990,71 | 0,0095 | 0,0093 | 0,2063 | -0,0002 | 7,408E-03 |
| 17992,54 | 0,0101 | 0,0098 | 0,2061 | -0,0002 | 7,788E-03 |
| 16993,21 | 0,0106 | 0,0103 | 0,2059 | -0,0002 | 8,315E-03 |
| 15991,37 | 0,0113 | 0,0110 | 0,2057 | -0,0002 | 9,020E-03 |
| 14992,71 | 0,0121 | 0,0117 | 0,2054 | -0,0003 | 9,604E-03 |
| 14494,04 | 0,0125 | 0,0123 | 0,2053 | -0,0001 | 9,877E-03 |
| 13981,71 | 0,0129 | 0,0127 | 0,2051 | -0,0002 | 1,021E-02 |
| 13494,04 | 0,0134 | 0,0132 | 0,2050 | -0,0002 | 1,050E-02 |
| 12991,71 | 0,0139 | 0,0137 | 0,2048 | -0,0002 | 1,081E-02 |
| 12493,38 | 0,0145 | 0,0142 | 0,2046 | -0,0002 | 1,117E-02 |
| 11991,71 | 0,0151 | 0,0148 | 0,2044 | -0,0002 | 1,149E-02 |
| 11493,21 | 0,0157 | 0,0154 | 0,2042 | -0,0002 | 1,166E-02 |
| 10988,05 | 0,0165 | 0,0161 | 0,2039 | -0,0002 | 1,204E-02 |
| 10488,05 | 0,0172 | 0,0169 | 0,2037 | -0,0002 | 1,253E-02 |
| 9985,38 | 0,0181 | 0,0177 | 0,2034 | -0,0003 | 1,292E-02 |
| 9490,55 | 0,0191 | 0,0186 | 0,2031 | -0,0003 | 1,366E-02 |
| 8991,39 | 0,0201 | 0,0196 | 0,2028 | -0,0003 | 1,397E-02 |
| 8490,89 | 0,0213 | 0,0207 | 0,2024 | -0,0004 | 1,404E-02 |
| 7990,73 | 0,0226 | 0,0220 | 0,2021 | -0,0003 | 1,407E-02 |
| 7490,73 | 0,0241 | 0,0234 | 0,2017 | -0,0004 | 1,456E-02 |
| 6995,73 | 0,0259 | 0,0250 | 0,2012 | -0,0004 | 1,605E-02 |
| 6491,07 | 0,0279 | 0,0269 | 0,2007 | -0,0006 | 1,772E-02 |
| 5990,58 | 0,0302 | 0,0290 | 0,2000 | -0,0006 | 1,900E-02 |
| 5493,08 | 0,0329 | 0,0316 | 0,1993 | -0,0007 | 2,092E-02 |

(Continua)

(Continuação)

| Pressão (psia) | Diâmetro (μm) | Diâmetro Médio (μm) | Volume Cumulativo (mL/g) | Volume Incremental (mL/g) | Log. Dif. Vol. dV/dlogD mL/g |
|---|---|---|---|---|---|
| 4997,26 | 0,0362 | 0,0346 | 0,1984 | -0,0009 | 2,349E-02 |
| 4492,77 | 0,0403 | 0,0382 | 0,1973 | -0,0011 | 2,588E-02 |
| 3995,28 | 0,0453 | 0,0428 | 0,1959 | -0,0014 | 2,932E-02 |
| 3494,30 | 0,0518 | 0,0485 | 0,1940 | -0,0018 | 3,353E-02 |
| 2998,82 | 0,0603 | 0,0560 | 0,1916 | -0,0024 | 3,954E-02 |
| 2495,85 | 0,0725 | 0,0664 | 0,1881 | -0,0036 | 5,149E-02 |
| 2000,24 | 0,0904 | 0,0814 | 0,1822 | -0,0058 | 7,437E-02 |
| 1507,34 | 0,1200 | 0,1052 | 0,1718 | -0,0104 | 6,109E-02 |
| 998,74 | 0,1811 | 0,1505 | 0,1651 | -0,0067 | 2,738E-02 |
| 901,25 | 0,2007 | 0,1909 | 0,1639 | -0,0012 | 2,581E-02 |
| 803,93 | 0,2250 | 0,2128 | 0,1627 | -0,0013 | 2,425E-02 |
| 702,11 | 0,2576 | 0,2413 | 0,1613 | -0,0013 | 2,172E-02 |
| 601,46 | 0,3007 | 0,2792 | 0,1599 | -0,0014 | 2,162E-02 |
| 494,97 | 0,3654 | 0,3331 | 0,1580 | -0,0019 | 2,034E-02 |
| 399,66 | 0,4525 | 0,4090 | 0,1563 | -0,0017 | 1,951E-02 |
| 300,85 | 0,6012 | 0,5269 | 0,1538 | -0,0026 | 2,056E-02 |
| 200,88 | 0,9003 | 0,7508 | 0,1502 | -0,0036 | 2,083E-02 |
| 99,12 | 1,8247 | 1,3625 | 0,1428 | -0,0074 | 2,652E-02 |
| 69,50 | 2,6025 | 2,2136 | 0,1385 | -0,0044 | 3,029E-02 |
| 50,04 | 3,6144 | 3,1084 | 0,1340 | -0,0044 | 3,191E-02 |
| 30,11 | 6,0070 | 4,8107 | 0,1270 | -0,0071 | 3,208E-02 |

# APÊNDICE B – Índice de Forma

A Tabela 01 contém todos os valores obtidos no ensaio experimental de determinação do índice de forma do agregado graúdo natural.

Tabela 01 – Valores de comprimento e de espessura dos grãos do agregado graúdo natural utilizados na determinação do índice de forma.

| Peneira ABNT # 12,5 mm | | | | Peneira ABNT # 9,5 mm | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Grão** | **c (cm)** | **e (cm)** | **c/e** | **Grão** | **c (cm)** | **e (cm)** | **c/e** |
| **1** | 3,2 | 0,7 | 4,6 | **1** | 1,6 | 0,8 | 2,0 |
| **2** | 2,3 | 0,9 | 2,6 | **2** | 2,4 | 0,7 | 3,4 |
| **3** | 2,3 | 0,7 | 3,3 | **3** | 1,9 | 1,0 | 1,9 |
| **4** | 2,8 | 0,7 | 4,0 | **4** | 1,7 | 0,8 | 2,1 |
| **5** | 2,6 | 0,6 | 4,3 | **5** | 2,2 | 0,5 | 4,4 |
| **6** | 2,1 | 0,8 | 2,6 | **6** | 2,4 | 1,0 | 2,4 |
| **7** | 2,7 | 0,9 | 3,0 | **7** | 1,5 | 1,0 | 1,5 |
| **8** | 2,2 | 1,0 | 2,2 | **8** | 1,8 | 0,7 | 2,6 |
| **9** | 2,6 | 0,7 | 3,7 | **9** | 2,2 | 0,6 | 3,7 |
| **10** | 2,3 | 0,8 | 2,9 | **10** | 1,6 | 0,5 | 3,2 |
| **11** | 2,1 | 0,3 | 7,0 | **11** | 1,8 | 0,6 | 3,0 |
| **12** | 2,0 | 0,9 | 2,2 | **12** | 2,2 | 0,9 | 2,4 |
| **13** | 2,4 | 1,0 | 2,4 | **13** | 2,9 | 0,7 | 4,1 |
| **14** | 2,6 | 0,5 | 5,2 | **14** | 1,1 | 0,6 | 1,8 |
| **15** | 2,5 | 0,9 | 2,8 | **15** | 1,6 | 0,9 | 1,8 |
| **16** | 2,0 | 0,7 | 2,9 | **16** | 1,8 | 0,5 | 3,6 |
| **17** | 2,2 | 1,1 | 2,0 | **17** | 2,2 | 0,3 | 7,3 |
| **18** | 2,4 | 1,2 | 2,0 | **18** | 2,3 | 0,6 | 3,8 |
| **19** | 2,9 | 1,1 | 2,6 | **19** | 2,2 | 0,5 | 4,4 |
| **20** | 2,2 | 0,8 | 2,8 | **20** | 1,6 | 0,9 | 1,8 |
| **21** | 2,2 | 0,9 | 2,4 | **21** | 1,8 | 0,5 | 3,6 |

(Continua)

(Continuação)

| Peneira ABNT # 12,5 mm | | | | Peneira ABNT # 9,5 mm | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Grão** | **c (cm)** | **Grão** | **c (cm)** | **Grão** | **c (cm)** | **Grão** | **c (cm)** |
| **22** | 2,3 | 0,8 | 2,9 | **22** | 1,7 | 0,4 | 4,3 |
| **23** | 2,1 | 0,4 | 5,3 | **23** | 1,1 | 0,8 | 1,4 |
| **24** | 2,1 | 0,8 | 2,6 | **24** | 2,5 | 0,4 | 6,3 |
| **25** | 2,1 | 1,3 | 1,6 | **25** | 1,8 | 1,1 | 1,6 |
| **26** | 2,2 | 0,4 | 5,5 | **26** | 1,4 | 0,6 | 2,3 |
| **27** | 2,0 | 0,9 | 2,2 | **27** | 2,1 | 0,9 | 2,3 |
| **28** | 2,0 | 1,1 | 1,8 | **28** | 2,1 | 0,5 | 4,2 |
| **29** | 2,1 | 0,9 | 2,3 | **29** | 2,8 | 0,6 | 4,7 |
| **30** | 2,1 | 0,8 | 2,6 | **30** | 2,0 | 0,7 | 2,9 |
| **31** | 1,9 | 0,7 | 2,7 | **31** | 1,9 | 0,6 | 3,2 |
| **32** | 1,9 | 1,0 | 1,9 | **32** | 2,3 | 0,7 | 3,3 |
| **33** | 2,3 | 0,6 | 3,8 | **33** | 1,9 | 0,7 | 2,7 |
| **34** | 2,1 | 0,9 | 2,3 | **34** | 1,6 | 0,4 | 4,0 |
| **35** | 1,8 | 1,0 | 1,8 | **35** | 1,9 | 0,7 | 2,7 |
| **36** | 2,2 | 0,6 | 3,7 | **36** | 2,0 | 0,4 | 5,0 |
| **37** | 1,7 | 0,8 | 2,1 | **37** | 1,5 | 0,7 | 2,1 |
| **38** | 2,1 | 0,9 | 2,3 | **38** | 1,4 | 0,8 | 1,8 |
| **39** | 2,3 | 0,9 | 2,6 | **39** | 2,0 | 0,8 | 2,5 |
| **40** | 2,2 | 0,7 | 3,1 | **40** | 1,7 | 0,9 | 1,9 |
| **41** | 3,1 | 0,7 | 4,4 | **41** | 1,8 | 0,8 | 2,3 |
| **42** | 1,9 | 1,1 | 1,7 | **42** | 2,4 | 0,8 | 3,0 |
| **43** | 1,9 | 1,1 | 1,7 | **43** | 1,1 | 0,7 | 1,6 |
| **44** | 2,1 | 0,8 | 2,6 | **44** | 1,6 | 0,6 | 2,7 |
| **45** | 2,0 | 1,2 | 1,7 | **45** | 1,9 | 0,5 | 3,8 |
| **46** | 2,1 | 0,6 | 3,5 | **46** | 1,5 | 0,9 | 1,7 |
| **47** | 2,3 | 0,9 | 2,6 | **47** | 1,6 | 0,3 | 5,3 |
| **48** | 2,4 | 0,7 | 3,4 | **48** | 1,4 | 1,1 | 1,3 |

(Continua)

(Continuação)

| Peneira ABNT # 12,5 mm | | | | Peneira ABNT # 9,5 mm | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Grão** | **c (cm)** | **Grão** | **c (cm)** | **Grão** | **c (cm)** | **Grão** | **c (cm)** |
| **49** | 1,7 | 1,3 | 1,3 | **49** | 2,4 | 0,6 | 4,0 |
| **50** | 1,8 | 1,5 | 1,2 | **50** | 2,2 | 0,6 | 3,7 |
| **51** | 1,9 | 0,9 | 2,1 | **51** | 1,8 | 0,8 | 2,3 |
| **52** | 2,1 | 0,6 | 3,5 | **52** | 1,5 | 0,7 | 2,1 |
| **53** | 1,9 | 1,6 | 1,2 | **53** | 1,6 | 0,6 | 2,7 |
| **54** | 2,1 | 0,8 | 2,6 | **54** | 2,4 | 0,5 | 4,8 |
| **55** | 1,8 | 1,1 | 1,6 | **55** | 1,8 | 0,6 | 3,0 |
| **56** | 2,2 | 1,1 | 2,0 | **56** | 2,4 | 0,7 | 3,4 |
| **57** | 2,6 | 1,0 | 2,6 | **57** | 1,5 | 0,8 | 1,9 |
| **58** | 2,7 | 0,9 | 3,0 | **58** | 1,6 | 0,9 | 1,8 |
| **59** | 1,8 | 1,0 | 1,8 | **59** | 1,2 | 0,7 | 1,7 |
| **60** | 1,7 | 0,7 | 2,4 | **60** | 2,2 | 0,4 | 5,5 |
| **61** | 1,9 | 1,3 | 1,5 | **61** | 2,3 | 0,5 | 4,6 |
| **62** | 2,6 | 0,6 | 4,3 | **62** | 1,5 | 0,9 | 1,7 |
| **63** | 2,3 | 1,3 | 1,8 | **63** | 1,6 | 0,5 | 3,2 |
| **64** | 2,0 | 0,8 | 2,5 | **64** | 1,7 | 0,5 | 3,4 |
| **65** | 1,8 | 1,2 | 1,5 | **65** | 1,7 | 0,9 | 1,9 |
| **66** | 2,0 | 1,8 | 1,1 | **66** | 1,9 | 0,9 | 2,1 |
| **–** | **–** | **–** | **–** | **67** | 1,7 | 0,4 | 4,3 |
| **–** | **–** | **–** | **–** | **68** | 2,2 | 0,7 | 3,1 |
| **–** | **–** | **–** | **–** | **69** | 1,6 | 0,6 | 2,7 |
| **–** | **–** | **–** | **–** | **70** | 2,3 | 0,8 | 2,9 |
| **–** | **–** | **–** | **–** | **71** | 1,6 | 0,9 | 1,8 |
| **–** | **–** | **–** | **–** | **72** | 2,2 | 0,7 | 3,1 |
| **–** | **–** | **–** | **–** | **73** | 1,8 | 0,5 | 3,6 |
| **–** | **–** | **–** | **–** | **74** | 1,9 | 0,4 | 4,8 |
| **–** | **–** | **–** | **–** | **75** | 2,3 | 0,4 | 5,8 |

(Continua)

(Continuação)

| Peneira ABNT # 12,5 mm | | | | Peneira ABNT # 9,5 mm | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Grão** | **c (cm)** | **Grão** | **c (cm)** | **Grão** | **c (cm)** | **Grão** | **c (cm)** |
| – | – | – | – | **76** | 1,5 | 0,6 | 2,5 |
| – | – | – | – | **77** | 1,7 | 0,6 | 2,8 |
| – | – | – | – | **78** | 1,6 | 0,4 | 4,0 |
| – | – | – | – | **79** | 1,8 | 0,9 | 2,0 |
| – | – | – | – | **80** | 2,3 | 0,5 | 4,6 |
| – | – | – | – | **81** | 2,0 | 1,8 | 1,1 |
| – | – | – | – | **82** | 2,4 | 0,6 | 4,0 |
| – | – | – | – | **83** | 1,2 | 0,8 | 1,5 |
| – | – | – | – | **84** | 1,7 | 0,6 | 2,8 |
| – | – | – | – | **85** | 2,2 | 0,7 | 3,1 |
| – | – | – | – | **86** | 2,8 | 0,4 | 7,0 |
| – | – | – | – | **87** | 1,7 | 0,5 | 3,4 |
| – | – | – | – | **88** | 1,4 | 1,3 | 1,1 |
| – | – | – | – | **89** | 1,8 | 0,7 | 2,6 |
| – | – | – | – | **90** | 2,1 | 0,8 | 2,6 |
| – | – | – | – | **91** | 2,3 | 0,6 | 3,8 |
| – | – | – | – | **92** | 1,7 | 0,7 | 2,4 |
| – | – | – | – | **93** | 1,5 | 0,8 | 1,9 |
| – | – | – | – | **94** | 2,0 | 1,0 | 2,0 |
| – | – | – | – | **95** | 2,0 | 0,8 | 2,5 |
| – | – | – | – | **96** | 1,6 | 1,0 | 1,6 |
| – | – | – | – | **97** | 1,9 | 0,4 | 4,8 |
| – | – | – | – | **98** | 1,8 | 1,0 | 1,8 |
| – | – | – | – | **99** | 1,6 | 0,7 | 2,3 |
| – | – | – | – | **100** | 1,5 | 1,0 | 1,5 |
| – | – | – | – | **101** | 2,5 | 1,0 | 2,5 |
| – | – | – | – | **102** | 1,6 | 0,8 | 2,0 |

(Continua)

(Continuação)

| Peneira ABNT # 12,5 mm | | | | Peneira ABNT # 9,5 mm | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Grão** | **c (cm)** | **Grão** | **c (cm)** | **Grão** | **c (cm)** | **Grão** | **c (cm)** |
| – | – | – | – | **103** | 1,4 | 0,7 | 2,0 |
| – | – | – | – | **104** | 1,7 | 0,5 | 3,4 |
| – | – | – | – | **105** | 1,8 | 1,1 | 1,6 |
| – | – | – | – | **106** | 2,1 | 0,4 | 5,3 |
| – | – | – | – | **107** | 1,8 | 0,5 | 3,6 |
| – | – | – | – | **108** | 2,4 | 0,7 | 3,4 |
| – | – | – | – | **109** | 1,4 | 0,4 | 3,5 |
| – | – | – | – | **110** | 2,0 | 0,9 | 2,2 |
| – | – | – | – | **111** | 2,0 | 0,8 | 2,5 |
| – | – | – | – | **112** | 1,7 | 1,2 | 1,4 |
| – | – | – | – | **113** | 2,4 | 0,9 | 2,7 |
| – | – | – | – | **114** | 2,4 | 0,9 | 2,7 |
| – | – | – | – | **115** | 1,5 | 0,3 | 5,0 |
| – | – | – | – | **116** | 1,5 | 1,0 | 1,5 |
| – | – | – | – | **117** | 1,5 | 0,9 | 1,7 |
| – | – | – | – | **118** | 2,2 | 0,8 | 2,8 |
| – | – | – | – | **119** | 2,1 | 0,9 | 2,3 |
| – | – | – | – | **120** | 1,7 | 0,5 | 3,4 |
| – | – | – | – | **121** | 1,6 | 1,0 | 1,6 |
| – | – | – | – | **122** | 2,1 | 0,4 | 5,3 |
| – | – | – | – | **123** | 2,2 | 0,5 | 4,4 |
| – | – | – | – | **124** | 2,1 | 1,1 | 1,9 |
| – | – | – | – | **125** | 1,7 | 1,0 | 1,7 |
| – | – | – | – | **126** | 2,0 | 0,9 | 2,2 |
| – | – | – | – | **127** | 1,8 | 1,0 | 1,8 |
| – | – | – | – | **128** | 1,5 | 0,6 | 2,5 |
| – | – | – | – | **129** | 1,5 | 0,4 | 3,8 |

(Continua)

(Continuação)

| Peneira ABNT # 12,5 mm | | | | Peneira ABNT # 9,5 mm | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Grão** | **c (cm)** | **Grão** | **c (cm)** | **Grão** | **c (cm)** | **Grão** | **c (cm)** |
| – | – | – | – | **130** | 1,6 | 0,9 | 1,8 |
| – | – | – | – | **131** | 1,5 | 0,9 | 1,7 |
| – | – | – | – | **132** | 1,7 | 0,7 | 2,4 |
| – | – | – | – | **133** | 1,6 | 1,0 | 1,6 |
| – | – | – | – | **134** | 1,5 | 0,7 | 2,1 |

# APÊNDICE C – Módulo de Elasticidade e Deformação

A Tabela 01 contém todos os valores obtidos no ensaio experimental de determinação dos módulos de elasticidade e deformação do corpo-de-prova 10 do concreto produzido como o compósito.

Tabela 01 – Todos os valores obtidos no ensaio experimental de determinação dos módulos de elasticidade e deformação do corpo-de-prova 10 do concreto produzido como o compósito.

| **Deformação Específica (μm)** | **Tensão (MPa)** |
|---|---|
| 2 | 0,07 |
| 0 | 0,06 |
| 1 | 0,05 |
| 6 | 0,06 |
| 6 | 0,05 |
| 9 | 0,10 |
| 7 | 0,13 |
| 10 | 0,17 |
| 12 | 0,21 |
| 11 | 0,29 |
| 17 | 0,34 |
| 22 | 0,41 |
| **25** | **0,48** |
| 32 | 0,61 |
| 37 | 0,71 |
| 41 | 0,80 |
| 49 | 0,89 |
| 52 | 0,97 |
| 50 | 0,91 |
| 46 | 0,88 |
| 47 | 0,90 |

(Continua)

(Continuação)

| Deformação Específica (μm) | Tensão (MPa) |
|---|---|
| 48 | 0,91 |
| 44 | 0,89 |
| 47 | 0,90 |
| 51 | 0,91 |
| 47 | 0,93 |
| 49 | 0,93 |
| 47 | 0,96 |
| 56 | 1,02 |
| 60 | 1,16 |
| 68 | 1,25 |
| 71 | 1,35 |
| 78 | 1,46 |
| 84 | 1,60 |
| 88 | 1,67 |
| 92 | 1,75 |
| 99 | 1,89 |
| 107 | 2,01 |
| 109 | 2,07 |
| 113 | 2,17 |
| 123 | 2,35 |
| 133 | 2,49 |
| 138 | 2,63 |
| 147 | 2,79 |
| 159 | 3,02 |
| 168 | 3,17 |
| 178 | 3,31 |
| 189 | 3,50 |
| 200 | 3,72 |

(Continua)

(Continuação)

| Deformação Específica (μm) | Tensão (MPa) |
|---|---|
| 207 | 3,89 |
| 221 | 4,02 |
| 228 | 4,20 |
| 243 | 4,45 |
| 254 | 4,60 |
| 261 | 4,73 |
| 272 | 4,92 |
| 288 | 5,15 |
| 297 | 5,25 |
| 309 | 5,41 |
| 324 | 5,61 |
| 338 | 5,85 |
| 345 | 5,99 |
| 360 | 6,16 |
| 377 | 6,38 |
| 392 | 6,63 |
| 407 | 6,79 |
| 420 | 6,97 |
| 437 | 7,18 |
| 455 | 7,47 |
| 470 | 7,64 |
| 484 | 7,79 |
| 507 | 8,07 |
| 529 | 8,32 |
| 537 | 8,46 |
| 562 | 8,67 |
| 580 | 8,93 |
| 606 | 9,15 |

(Continua)

(Continuação)

| Deformação Específica (μm) | Tensão (MPa) |
|---|---|
| 620 | 9,33 |
| 640 | 9,52 |
| 663 | 9,79 |
| 685 | 9,99 |
| 707 | 10,13 |
| 730 | 10,31 |
| 756 | 10,53 |
| 777 | 10,67 |
| 799 | 10,78 |
| 823 | 10,90 |
| 859 | 11,12 |
| 885 | 11,20 |
| 911 | 11,24 |
| 939 | 11,33 |
| **976** | **11,44** |
| 1004 | 11,27 |
| 1031 | 11,16 |
| 1061 | 11,09 |
| 1090 | 10,91 |
| 1111 | 10,65 |
| 1132 | 10,36 |
| 1156 | 10,20 |
| 1169 | 9,97 |
| 1176 | 9,76 |
| 1172 | 9,58 |
| 1140 | 9,42 |
| 1116 | 9,23 |
| 1104 | 9,08 |

(Continua)

(Continuação)

| Deformação Específica (μm) | Tensão (MPa) |
|---|---|
| 1089 | 8,93 |
| 1085 | 8,81 |
| 1087 | 8,53 |
| 1092 | 8,34 |
| 1108 | 8,20 |
| 1125 | 8,04 |
| 1087 | 7,19 |
| 1083 | 7,15 |
| 1100 | 7,29 |
| 1084 | 6,94 |
| 1070 | 6,72 |

A Tabela 02 contém todos os valores de deformação e tensão obtidos no ensaio experimental de determinação dos módulos de elasticidade e deformação do corpo-de-prova 01 do concreto-referência.

Tabela 02 – Todos os valores obtidos no ensaio experimental de determinação dos módulos de elasticidade e deformação do corpo-de-prova 01 do concreto-referência.

| **Deformação Específica (μm)** | **Tensão (MPa)** |
|---|---|
| 7 | 0,03 |
| 4 | 0,03 |
| 3 | 0,03 |
| 1 | 0,03 |
| 4 | 0,08 |
| 1 | 0,15 |
| 6 | 0,26 |
| 5 | 0,29 |
| 12 | 0,37 |
| **15** | **0,47** |
| 15 | 0,56 |
| 19 | 0,64 |
| 18 | 0,64 |
| 23 | 0,67 |
| 25 | 0,71 |
| 23 | 0,76 |
| 26 | 0,80 |
| 25 | 0,79 |
| 23 | 0,80 |
| 25 | 0,83 |
| 27 | 0,87 |
| 26 | 0,86 |
| 26 | 0,83 |

(Continua)

(Continuação)

| Deformação Específica (μm) | Tensão (MPa) |
|---|---|
| 26 | 0,83 |
| 29 | 0,83 |
| 28 | 0,87 |
| 29 | 0,86 |
| 27 | 0,85 |
| 27 | 0,85 |
| 28 | 0,87 |
| 28 | 0,89 |
| 28 | 0,87 |
| 25 | 0,87 |
| 28 | 0,92 |
| 32 | 1,04 |
| 36 | 1,09 |
| 38 | 1,18 |
| 39 | 1,32 |
| 46 | 1,47 |
| 49 | 1,57 |
| 53 | 1,60 |
| 56 | 1,68 |
| 60 | 1,81 |
| 69 | 2,00 |
| 66 | 2,05 |
| 73 | 2,17 |
| 80 | 2,33 |
| 87 | 2,54 |
| 93 | 2,71 |
| 97 | 2,80 |
| 104 | 2,99 |

(Continua)

(Continuação)

| Deformação Específica (μm) | Tensão (MPa) |
|---|---|
| 115 | 3,20 |
| 123 | 3,49 |
| 127 | 3,59 |
| 134 | 3,78 |
| 145 | 4,02 |
| 152 | 4,31 |
| 162 | 4,56 |
| 172 | 4,72 |
| 179 | 4,98 |
| 194 | 5,32 |
| 206 | 5,68 |
| 211 | 5,84 |
| 222 | 6,08 |
| 234 | 6,42 |
| 248 | 6,80 |
| 260 | 7,15 |
| 268 | 7,29 |
| 280 | 7,62 |
| 297 | 8,01 |
| 309 | 8,47 |
| 320 | 8,66 |
| 329 | 8,87 |
| 344 | 9,24 |
| 358 | 9,64 |
| 377 | 10,00 |
| 383 | 10,14 |
| 397 | 10,35 |
| 410 | 10,70 |

(Continua)

(Continuação)

| Deformação Específica (μm) | Tensão (MPa) |
|---|---|
| 431 | 11,09 |
| 445 | 11,29 |
| 453 | 11,43 |
| 469 | 11,64 |
| 487 | 11,98 |
| 506 | 12,35 |
| 519 | 12,40 |
| 531 | 12,57 |
| 549 | 12,81 |
| 570 | 13,17 |
| 586 | 13,36 |
| 599 | 13,44 |
| 616 | 13,64 |
| 634 | 13,87 |
| 658 | 14,23 |
| 672 | 14,30 |
| 683 | 14,39 |
| 708 | 14,60 |
| 723 | 14,83 |
| 747 | 15,09 |
| 761 | 15,11 |
| 775 | 15,23 |
| 801 | 15,45 |
| 819 | 15,67 |
| 837 | 15,80 |
| 854 | 15,84 |
| 874 | 15,97 |
| 897 | 16,19 |

(Continua)

(Continuação)

| Deformação Específica (μm) | Tensão (MPa) |
|---|---|
| 918 | 16,41 |
| 928 | 16,40 |
| 949 | 16,47 |
| 971 | 16,62 |
| 993 | 16,84 |
| 1014 | 17,02 |
| 1028 | 16,93 |
| 1046 | 17,00 |
| 1072 | 17,18 |
| 1092 | 17,39 |
| 1112 | 17,48 |
| 1127 | 17,39 |
| 1148 | 17,51 |
| 1168 | 17,67 |
| 1195 | 17,88 |
| 1209 | 17,83 |
| 1223 | 17,78 |
| 1246 | 17,92 |
| 1272 | 18,09 |
| 1292 | 18,24 |
| 1309 | 18,16 |
| 1324 | 18,14 |
| 1350 | 18,30 |
| 1373 | 18,47 |
| 1391 | 18,50 |
| 1411 | 18,44 |
| 1430 | 18,47 |
| 1454 | 18,63 |

(Continua)

(Continuação)

| Deformação Específica (μm) | Tensão (MPa) |
|---|---|
| 1476 | 18,81 |
| 1495 | 18,73 |
| 1511 | 18,70 |
| 1534 | 18,74 |
| 1559 | 18,92 |
| 1581 | 19,04 |
| 1595 | 18,94 |
| 1620 | 18,94 |
| 1638 | 19,00 |
| 1663 | 19,17 |
| 1686 | 19,20 |
| 1699 | 19,12 |
| 1723 | 19,16 |
| 1744 | 19,23 |
| 1771 | 19,42 |
| 1789 | 19,34 |
| 1804 | 19,29 |
| 1834 | 19,36 |
| 1853 | 19,44 |
| 1877 | 19,57 |
| 1895 | 19,47 |
| 1915 | 19,46 |
| 1941 | 19,54 |
| 1966 | 19,61 |
| 1984 | 19,65 |
| 2005 | 19,57 |
| 2023 | 19,58 |
| 2051 | 19,66 |

(Continua)

(Continuação)

| Deformação Específica (μm) | Tensão (MPa) |
|---|---|
| 2072 | 19,74 |
| 2092 | 19,72 |
| 2111 | 19,65 |
| 2137 | 19,67 |
| 2159 | 19,78 |
| 2184 | 19,85 |
| 2195 | 19,74 |
| 2218 | 19,73 |
| 2244 | 19,77 |
| 2266 | 19,85 |
| 2290 | 19,94 |
| 2307 | 19,80 |
| 2325 | 19,77 |
| 2350 | 19,84 |
| 2378 | 19,94 |
| 2399 | 19,96 |
| 2413 | 19,80 |
| 2434 | 19,81 |
| 2461 | 19,87 |
| 2486 | 19,96 |
| 2504 | 19,95 |
| 2524 | 19,82 |
| 2546 | 19,84 |
| 2568 | 19,89 |
| 2593 | 20,00 |
| 2616 | 19,92 |
| 2633 | 19,79 |
| 2655 | 19,82 |

(Continua)

(Continuação)

| Deformação Específica (μm) | Tensão (MPa) |
|---|---|
| 2680 | 19,89 |
| 2703 | 19,98 |
| 2720 | 19,89 |
| 2738 | 19,77 |
| 2764 | 19,80 |
| 2787 | 19,85 |
| 2810 | 19,93 |
| 2829 | 19,83 |
| 2846 | 19,71 |
| 2868 | 19,74 |
| 2892 | 19,80 |
| 2917 | 19,87 |
| 2929 | 19,75 |
| 2950 | 19,65 |
| 2970 | 19,68 |
| 2994 | 19,71 |
| 3015 | 19,76 |
| 3033 | 19,65 |
| 3051 | 19,55 |
| 3074 | 19,58 |
| 3095 | 19,64 |
| 3116 | 19,65 |
| 3133 | 19,53 |
| 3151 | 19,45 |
| 3174 | 19,47 |
| 3191 | 19,54 |
| 3214 | 19,51 |
| 3233 | 19,43 |

(Continua)

(Continuação)

| Deformação Específica (μm) | Tensão (MPa) |
|---|---|
| 3247 | 19,34 |
| 3271 | 19,37 |
| 3294 | 19,43 |
| 3310 | 19,36 |
| 3327 | 19,28 |
| 3344 | 19,21 |
| 3373 | 19,24 |
| 3390 | 19,30 |
| 3404 | 19,18 |
| 3424 | 19,11 |
| 3441 | 19,06 |
| 3463 | 19,08 |
| 3484 | 19,11 |
| 3498 | 19,00 |
| 3515 | 18,93 |
| 3533 | 18,87 |
| 3553 | 18,91 |
| 3569 | 18,90 |
| 3583 | 18,78 |
| 3603 | 18,73 |
| 3617 | 18,68 |
| 3639 | 18,73 |
| 3655 | 18,66 |
| 3667 | 18,57 |
| 3684 | 18,52 |
| 3701 | 18,47 |
| 3719 | 18,54 |
| 3729 | 18,42 |

(Continua)

(Continuação)

| Deformação Específica (μm) | Tensão (MPa) |
|---|---|
| 3749 | 18,34 |
| 3763 | 18,31 |
| 3778 | 18,28 |
| 3797 | 18,29 |
| 3805 | 18,19 |
| 3823 | 18,13 |
| 3836 | 18,11 |
| 3851 | 18,07 |
| 3864 | 18,05 |
| 3880 | 17,96 |
| 3891 | 17,90 |
| 3906 | 17,90 |
| 3919 | 17,87 |
| 3930 | 17,76 |
| 3943 | 17,68 |
| 3957 | 17,64 |
| 3971 | 17,63 |
| 3984 | 17,63 |
| 3991 | 17,48 |
| 4002 | 17,42 |
| 4015 | 17,38 |
| 4029 | 17,38 |
| 4036 | 17,34 |
| 4043 | 17,17 |
| 4053 | 17,11 |
| 4064 | 17,09 |