

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC
PRÓ-REITORIA ACADÊMICA - PROACAD
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS - PPGCEM
MESTRADO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS**

JÚLIO PREVE MACHADO

**EFEITO DA ADIÇÃO DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR
E/OU LÃ DE VIDRO SOBRE AS PROPRIEDADES FÍSICAS E
DE DILATAÇÃO TÉRMICA LINEAR DOS CONCRETOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade do Extremo Sul Catarinense para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Junca
Co-Orientador: Prof. Dr. Felipe Fardin Grillo

**CRICIÚMA,
2018**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

M149e Machado, Júlio Preve.

Efeito da adição do bagaço da cana-de-açúcar e/ou lã de vidro sobre as propriedades físicas e de dilatação térmica linear dos concretos / Júlio Preve Machado. - 2018.

143 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, 2018.

Orientação: Eduardo Junca.

Coorientação: Felipe Fardin Grillo.

1. Concreto – Comportamento mecânico. 2. Coeficiente de dilatação térmica linear. 3. Bagaço da cana-de-açúcar. 4. Lã de vidro. 5. Concreto – Aditivos. I. Título.

CDD 23. ed. 620.136

Bibliotecária Eliziane de Lucca Alosilla – CRB 14/1101

Biblioteca Central Prof. Eurico Back - UNESC

Júlio Preve Machado

Efeito da adição do bagaço da cana-de-açúcar e lã de vidro sobre as propriedades físicas e de dilatação térmica linear dos concretos.

Esta dissertação foi julgada adequada à obtenção do grau de Mestre (a) em Ciência e Engenharia de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (Área de concentração: Tecnologia de Materiais) da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC.

Criciúma, SC, 31 de julho de 2018.

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Michael Peterson

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC



Prof. Dr. Elídio Angioletto

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC



Prof. Dr. Joner Oliveira Alves

Instituto SENAI de Inovação em Tecnologias Mineraias - ISI-TM

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a Deus por ter me dando forças e sabedoria para o desenvolvimento deste trabalho.

A minha esposa Luciana que me apoiou durante todo o trabalho.

Aos meus pais Pedro Paulo e Sônia que sempre me motivaram a estudar, não medindo esforços para a realização dos meus objetivos.

A minha irmã Paula que também sempre me apoiou para essa conquista.

Ao professor orientador Eduardo Junca por ter me orientado para todas as questões científicas e de pesquisa, me orientando em todas as decisões, estando presente em todo o dia-a-dia das atividades, esclarecendo dúvidas até mesmo das disciplinas ministradas por outros professores, não me desamparando em nenhum momento, tornando peça fundamental para esse trabalho.

A professor Co-Orientador Felipe Grillo e a todos os demais professores do PPGCEM por estarem sempre dispostos a ajudar no que for preciso.

A toda UNESC pela oportunidade e infra-estrutura disponibilizada, me possibilitando adquirir conhecimentos que levarei para todos os momentos da minha vida.

A acadêmica Talita por todo apoio e disposição em ajudar, em todos os momentos da pesquisa.

Aos colegas e técnicos da UNESC Tchesare, Rodrigo, Higor e Mateus pela parceria e disposição em ajudar.

Ao Centro Universitário Barriga Verde pelo apoio dado para essa conquista.

RESUMO

A variação de temperatura pode resultar em tensões de tração nos concretos, resultando em deformações e rachaduras, comprometendo o desempenho de desgaste, segurança, durabilidade e vida útil das construções. Visando a redução desses efeitos, este trabalho teve como objetivo estudar o comportamento mecânico e o coeficiente de dilatação térmica linear dos concretos com a adição do bagaço da cana-de-açúcar e lã de vidro. Inicialmente, a lã de vidro foi moída num moinho de bolas e caracterizada por difração de Raios-X, fluorescência de Raios-X, granulometria a laser, termogravimetria (TG) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). O bagaço da cana-de-açúcar foi moído num triturador para obtenção de fibras de 12,0 mm e tratado quimicamente, com uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) em água a 98°C. As fibras foram caracterizadas com o microscópio eletrônico de varredura (MEV) e análise termogravimétrica. Foi feito um planejamento fatorial de 2² com um ponto central para determinar a composição dos corpos de prova. Os teores máximos de adição de bagaço de cana e lã de vidro foram de 3 e 10%, respectivamente, tendo o ponto central contendo 1,5% de bagaço de cana de açúcar e 5% de lã de vidro. Em seguida, os corpos de provas para realização dos testes foram moldados e curados, em água, por 7, 28 e 56 dias. Após este tempo, iniciou-se os ensaios mecânicos de compressão, tração por compressão diametral, módulo de elasticidade, tração na flexão, índice de vazios, absorção de água e massa específica aparente seca. O coeficiente de dilatação térmica linear foi determinado para temperaturas entre 4±2°C a 50±2°C. Esta etapa foi realizada com auxílio de um relógio comparador. Os resultados mostraram que somente com a adição da lã de vidro (10%) a porosidade dos concretos diminuíram, aumentando as resistências mecânicas, a impermeabilidade e o coeficiente de dilatação térmica linear. Já as amostras contendo a adição das fibras do bagaço da cana-de-açúcar, tiveram restrições na mobilidade do concreto, prejudicando a sua compactação (redução da consistência), implicando em uma maior quantidade de poros e, conseqüentemente, na redução das resistências mecânicas. Porém, o aumento na quantidade de poros facilitou a expansão térmica interna dos constituintes dos concretos, diminuindo o seu coeficiente de expansão térmica linear.

Palavras-chave: Bagaço da cana-de-açúcar. Lã de vidro. Concreto. Comportamento mecânico. Coeficiente de dilatação térmica linear.

ABSTRACT

The variation of temperature can result in tensile stresses in concrete. This results in deformations and cracking, which compromising the wear performance, safety, durability and durability of constructions. In order to reduce these effects, the aim of this work was study the mechanical behavior and the linear thermal expansion coefficient of concretes with addition of sugarcane bagasse and glass wool. Initially, the glass wool was milled in a ball mill equipment. Then, it was performed the characterization by X-ray diffraction, X-ray fluorescence, size analysis, thermogravimetry test (TG) and scanning electron microscopy (SEM). The sugarcane bagasse was milled fiber of 12.0 mm in a knife mill. Then, the fibers were chemically treated with a solution of sodium hydroxide (NaOH) in water at 98 ° C. The fibers were characterized by scanning electron microscopy (SEM) and thermogravimetric analysis. It was accomplished a factorial planning of 2² with a central point in order to determine the composition of samples. The maximum content of sugarcane bagasse and glass wool were 3 and 10% respectively. The center point contained 1.5% of sugarcane bagasse and 5% glass wool. Then, the samples were molded and cured in water for 7, 28 and 56 days. After this time, it was initiated the mechanical compression tests, diametrical compression traction, modulus of elasticity, flexural tensile strength, voids index, water absorption and apparent specific dry mass were started. The linear thermal expansion coefficient was determined in temperatures in the range of 4 ± 2°C to 50 ± 2°C. This step was performed with a dial indicator. The results showed that to concretes containing only addition of 10 wt. % of glass wool was noted a decrease of porosity, an increasing of mechanical strength, impermeability and linear thermal expansion coefficient. On the other hand, the samples containing fibers of sugarcane bagasse had restrictions on the mobility of the concrete, which impairing its compactness (reduction of consistency), implying in a greater quantity of pores and reduction of mechanical resistance. However, the increase of porosity facilitated the internal thermal expansion of concrete constituents, which reduced their coefficient of linear thermal expansion.

Keywords: Sugarcane bagasse. Glass wool. Concrete. Mechanical behavior. Linear thermal expansion coefficient.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Imagem obtida pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV) com 0,05% de aditivos incorporadores de ar.	32
Figura 2 - (a) Representação esquemática da exsudação no concreto fresco recém-lançado; (b) falha de aderência por cisalhamento em um corpo de prova ensaiado à compressão uniaxial.	36
Figura 3 - (a) Micrografia da pasta de cimento aos 28 dias sem nano sílica; (b) Micrografia da pasta de cimento aos 28 dias com 3,0 % de nano sílica.	37
Figura 4 - Fissuração microestrutural do concreto submetido a esforços de tração (a) e compressão (b).	39
Figura 5 - Gráfico da energia potencial em função da distância interatômica, demonstrando o aumento da separação interatômica (r_0 evoluindo para r_1 , r_2 até r_5 , em função do aumento de temperatura). ..	40
Figura 6 - Influência do tipo de agregado no coeficiente de expansão térmica do concreto.	41
Figura 7 - Trinca típica no topo da parede paralela ao comprimento da laje resultante das tensões de tração (σ_t).	42
Figura 8 - Microestrutura dos concretos com adições minerais (a) 30% de cinza volante e (b) 15% de fumo de sílica.	43
Figura 9 - Esquema de concentração de tensões para um concreto sem e com o reforço de fibras.	50
Figura 10 - Imagem do concreto fissurado (a) sem adição de fibras e (b) com 0,1 % de adições de fibras de aço, poliolefina e polipropileno.	51
Figura 11 - Imagem do Microscópio Eletrônico de Varredura (ampliação de 200X) do composto de cimento com 3,0% de adição de fibras do bagaço.	53
Figura 12 - Microscopia óptica do compósito reforçado com a fibra do bagaço da cana, no sentido paralelo ao comprimento da amostra.	55
Figura 13 - Imagem das amostras das argamassas aos 91 dias (a) sem lã de rocha e (b) com 40% de lã de rocha na composição.	56
Figura 14 - Resíduo do bagaço da cana-de-açúcar estocado após moagem da lanchonete localizada em Urussanga de onde o resíduo foi extraído.	58
Figura 15 - (a) Estrutura interna do refrigerador sucateado após a retirada da lã de vidro e (b) resíduo da lã de vidro após retirada do refrigerador sucateado.	59

Figura 16 - Lavagem com água corrente dos resíduos dos bagaços de cana-de-açúcar.	60
Figura 17 - Bagaço da cana-de-açúcar armazenado em local coberto após lavagem inicial.	60
Figura 18 - (a) Sistema de facas do triturador e (b) amostras dos bagaços da cana-de-açúcar pós moagem.	61
Figura 19 - Resíduos do bagaço da cana-de-açúcar moído armazenados na estufa antes do tratamento químico.	62
Figura 20 - (a) Sistema de aquecimento da solução química formada pelo recipiente metálico de 200 litros, blocos refratários e sistema de gás canalizado e (b) resíduos do bagaço da cana-de-açúcar durante o tratamento químico.	63
Figura 21 - Imagem do resíduo da lã de vidro (a) no processo de moagem e (b) após moagem.	64
Figura 22 - Agregados miúdos e grão submetidos a estufa para o processo de secagem.	66
Figura 23 - Corpos-de-prova cilíndricos recém moldados, produzidos para a realização dos ensaios de compressão.	72
Figura 24 - Ensaio do <i>slump test</i> (a) Retirada do molde durante a realização do ensaio (b) Medição da consistência do concreto.	74
Figura 25 - Corpo-de-prova pesado para o cálculo da determinação da absorção de água.	76
Figura 26 - Corpos-de-prova submetidos em banho Maria para saturação dos corpos-de-prova.	76
Figura 27 - Corpo-de-prova de concreto inserido na prensa, durante a realização do ensaio de compressão.	78
Figura 28 - Corpo-de-prova prismático inserido na prensa durante a realização do ensaio de tração na flexão.	79
Figura 29 - Posição do corpo-de-prova para a realização do ensaio de tração por compressão diametral.	81
Figura 30 - Corpo-de-prova de concreto inserido na prensa durante a realização do ensaio do módulo de elasticidade.	82
Figura 31 - Corpo-de-prova no processo de resfriamento em ambiente de laboratório sob controle da queda de temperatura, medindo tais contrações após retirada da estufa a 50°C.	84
Figura 32 - Corpo-de-prova durante o processo de ganho de temperatura após a retirada do refrigerador, com o multímetro instalado controlando temperatura e o relógio comparador mensurando as expansões.	85

Figura 33 - Representação gráfica da difração de raios-X da lã de vidro moída.....	90
Figura 34 - Curva granulométrica da lã de vidro moída.....	91
Figura 35 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da lã de vidro moída.....	92
Figura 36 - Termogravimetria (TG) da lã de vidro moída.	93
Figura 37 - Termogravimetria (TG) do bagaço da cana-de-açúcar.	94
Figura 38 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da amostra de fibras do bagaço da cana-de-açúcar.....	95
Figura 39 - Ensaio de consistência (a) do concreto C_{ref} e (b) do concreto $C_{bc3,0}$	99
Figura 40 - Gráfico de Pareto dos fatores Lã de vidro moída, Fibras do bagaço da cana-de-açúcar e 1 by 2 (Lã de vidro moída com fibras do bagaço da cana-de-açúcar) para a consistência por abatimento com tronco de cone.	101
Figura 41 - Gráfico da consistência por abatimento com tronco de cone dos concretos C_{ref} e $C_{bc3,0}$	102
Figura 42 - Gráfico de Pareto dos fatores Lã de vidro moída, Fibras do bagaço da cana-de-açúcar e 1 by 2 (Lã de vidro moída com fibras do bagaço da cana-de-açúcar) para a absorção de água após os 56 dias. .	105
Figura 43 - Gráfico de valores médios de absorção de água dos concretos C_{ref} e $C_{bc3,0}$ após os 56 dias.	106
Figura 44 - Gráfico de Pareto dos fatores Lã de vidro moída, Fibras do bagaço da cana-de-açúcar e 1 by 2 (Lã de vidro moída com fibras do bagaço da cana-de-açúcar) para o índice de vazios após os 56 dias....	108
Figura 45 - Gráfico de valores médios de índice de vazios dos concretos C_{ref} e $C_{bc3,0}$ após os 56 dias.	109
Figura 46 - Gráfico de Pareto dos fatores Lã de vidro moída, Fibras do bagaço da cana-de-açúcar e 1 by 2 (Lã de vidro moída com fibras do bagaço da cana-de-açúcar) para a massa específica aparente seca após os 56 dias.	111
Figura 47 - Gráfico de valores médios da massa específica aparente seca dos concretos C_{ref} e $C_{bc3,0}$ após os 56 dias.	112
Figura 48 - Gráfico de Pareto dos fatores Lã de vidro moída, Fibras do bagaço da cana-de-açúcar e 1 by 2 (Lã de vidro moída com fibras do bagaço da cana-de-açúcar) para a resistência à compressão aos 7 dias.	115

Figura 49 - Gráfico de resistências médias à compressão dos concretos C_{ref} e $C_{bc3,0}$ aos 7 dias.	116
Figura 50 - Gráfico de Pareto dos fatores Lã de vidro moída, Fibras do bagaço da cana-de-açúcar e 1 by 2 (Lã de vidro moída com fibras do bagaço da cana-de-açúcar) para a resistência à compressão aos 28 dias.	118
Figura 51 - Gráfico de resistências médias à compressão dos concretos C_{ref} e $C_{bc3,0}$ aos 28 dias.	119
Figura 52 - Gráfico de Pareto dos fatores Lã de vidro moída, Fibras do bagaço da cana-de-açúcar e 1 by 2 (Lã de vidro moída com fibras do bagaço da cana-de-açúcar) para a resistência à compressão aos 56 dias.	121
Figura 53 - Gráfico de resistências médias à compressão dos concretos C_{ref} e $C_{bc3,0}$ aos 56 dias.	122
Figura 54 - Gráfico de Pareto dos fatores Lã de vidro moída, Fibras do bagaço da cana-de-açúcar e 1 by 2 (Lã de vidro moída com fibras do bagaço da cana-de-açúcar) para a resistência de tração por compressão diametral aos 56 dias.	125
Figura 55 - Gráfico de resistências médias de tração por compressão diametral dos concretos C_{ref} e $C_{bc3,0}$ aos 56 dias.	126
Figura 56 - Gráfico de Pareto dos fatores Lã de vidro moída, Fibras do bagaço da cana-de-açúcar e 1 by 2 (Lã de vidro moída com fibras do bagaço da cana-de-açúcar) para a resistência de tração na flexão aos 56 dias.	128
Figura 57 - Gráfico de resistências médias de tração na flexão dos concretos C_{ref} e $C_{bc3,0}$ aos 56 dias.	129
Figura 58 - Gráfico de Pareto dos fatores Lã de vidro moída, Fibras do bagaço da cana-de-açúcar e 1 by 2 (Lã de vidro moída com fibras do bagaço da cana-de-açúcar) para o módulo de elasticidade aos 56 dias.	132
Figura 59 - Gráfico de valores médios do módulo de elasticidade dos concretos C_{ref} e $C_{bc3,0}$ aos 56 dias.	133
Figura 60 - Gráfico de Pareto dos fatores Lã de vidro moída, Fibras do bagaço da cana-de-açúcar e 1 by 2 (Lã de vidro moída com fibras do bagaço da cana-de-açúcar) para o coeficiente de dilatação térmica linear após os 56 dias.	136
Figura 61 - Gráfico de valores médios do coeficiente de dilatação térmica linear dos concretos C_{ref} e $C_{bc3,0}$ após os 56 dias.	137

Figura 62 - Termogravimetria (TG) das amostras de concreto.	138
Figura 63 - Imagens da microscopia óptica realizada nos concretos (a) C_{ref} , (b) $C_{lv10,0}$, (c) $C_{bc3,0}$, (d) $C_{bc3,0lv10,0}$ e (e) $C_{bc1,5lv5,0}$	139

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Teores dos componentes de cimentos Portland.....	34
Tabela 2 - Impacto do tipo de cimento no calor de hidratação.....	35
Tabela 3 - Relação de gastos com novas construções, manutenção e reparos em países como: França, Alemanha, Itália e Reino Unido.	46
Tabela 4 - Composição Química do resíduo de Lã de vidro por fluorescência de raios X (FRX).....	49
Tabela 5 - Etapas da pesquisa e atividades a serem desenvolvidas em cada etapa.	57
Tabela 6 - Série de peneiras normal e intermediária que será utilizada nos testes de análise granulométrica.	65
Tabela 7 - Tipos de concreto a produzir, com seus materiais constituintes e quantidades para a produção do volume de concreto necessário para moldar a quantidade de corpos-de-prova necessárias para os ensaios mecânicos e do coeficiente de expansão térmica linear.	69
Tabela 8 - Quantidades de corpos-de-prova a serem produzidos para cada ensaio.....	71
Tabela 9 - Análise química da lã de vidro moída.	89
Tabela 10 - Granulometria da areia média.	96
Tabela 11 - Granulometria da areia fina.....	96
Tabela 12 - Granulometria da brita nº 0.	97
Tabela 13 - Resultados dos ensaios de consistência dos concretos (slump test).....	98
Tabela 14 - Resultados do método ANOVA para o abatimento com tronco de cone.	100
Tabela 15 - Absorção de água, índice de vazios e massa específica aparente seca dos concretos após os 56 dias.	103
Tabela 16 - Resultados do método ANOVA para a absorção de água após os 56 dias.....	104
Tabela 17 - Resultados do método ANOVA para o índice de vazios após os 56 dias.....	107
Tabela 18 - Resultados do método ANOVA para a massa específica aparente seca após os 56 dias.	110
Tabela 19 - Resistência à compressão dos concretos nos períodos de 7, 28 e 56 dias.....	113
Tabela 20 - Resultados do método ANOVA para a resistência a compressão aos 7 dias.	114

Tabela 21 - Resultados do método ANOVA para a resistência a compressão aos 28 dias.....	117
Tabela 22 - Resultados do método ANOVA para a resistência a compressão aos 56 dias.....	120
Tabela 23 - Resistência de tração por compressão diametral e tração na flexão dos concretos aos 56 dias.	123
Tabela 24 - Resultados do método ANOVA para a resistência de tração por compressão diametral aos 56 dias.....	124
Tabela 25 - Resultados do método ANOVA para a resistência de tração na flexão aos 56 dias.	127
Tabela 26 - Módulo de elasticidade dos concretos aos 56 dias.....	130
Tabela 27 - Resultados do método ANOVA para o módulo de elasticidade aos 56 dias.....	131
Tabela 28 - Coeficiente de dilatação térmica linear dos concretos após 56 dias.	134
Tabela 29 - Resultados do método ANOVA para o coeficiente de dilatação térmica linear após os 56 dias.....	135

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
A/C – Relação água/cimento
ANOVA – Análise da variância
B - Boro
CaO – Óxido de Cálcio (cal)
Ca(OH)₂ – Hidróxido de Cálcio
CaO-SiO₂-H₂O – Silicato de Cálcio Hidratado
C_{bc3,0} – Concreto com adição de 3,0% de fibras do bagaço da cana-de-açúcar
C_{bc3,0lv10,0} – Concreto com adição de 3,0% de fibras do bagaço da cana-de-açúcar e 10,0% de lã de vidro moída
C_{bc1,5lv5,0} – Concreto com adição de 1,5% de fibras do bagaço da cana-de-açúcar e 5,0% de lã de vidro moída
C_{lv10,0} – Concreto com adição de 10,0% de lã de vidro moída.
CP I, II, III, IV e V – Cimentos Portland do tipo I, II, III, IV e V
C_{ref} – Concreto sem adições de fibras do bagaço da cana-de-açúcar e lã de vidro moída
C₃A₃CS.H₁₂ – Cristais de monossulfatoaluminato
D_q – Deformação do concreto obtida após estufa a 50 ± 2°C
D_f – Deformação do concreto obtida após refrigerador a 4 ± 2°C
DRX – Difração de Raios-X
E_{ci} – Módulo de elasticidade
f_c – Resistência à compressão
f_{ct,f} – Resistência à tração na flexão
f_{ct,sp} – Resistência de tração por compressão diametral
FRX – Fluorescência de Raios-X
HSR – Cimento resistente aos sulfatos
Ia – Índice de vazios
K_r – Grau de restrição
M_{CH} – Conteúdo de Portlandita
M_{esp,seca} – Massa específica aparente seca
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
M_i – Massa do corpo-de-prova saturado imerso em água
mmCa(CH)₂ – Massa molar do Hidróxido de Cálcio
mmH₂O – Massa molar da água
M_{sat} – Massa do corpo-de-prova saturado
M_s – Massa do corpo-de-prova seco em estufa
NA – Cimento de baixo teor alcalino
Na₂CO₃ – Carbonato de sódio

NaOH – Hidróxido de Sódio

NBR's – Normas brasileiras aprovadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas

P – Porosidade

pmCH – Perda de massa de Ca(OH)_2

RCD's – Resíduos de construção e demolição

R-sqr – Valor do R quadrado da análise estatística

SiO_2 – Dióxido de Silício (Sílica)

T_f – Temperatura interna do concreto no momento da retirada do refrigerador

TG – Termogravimetria

T_q – Temperatura interna do concreto no momento da retirada da estufa

Valor P – Valor da probabilidade de significância

LISTA DE SÍMBOLOS

σ – Tensão

ε – Deformação

Δl – Variação de comprimento

Δt – Variação de temperatura

α_{10} – Coeficiente de expansão térmica linear

σ_t – Tensões de tração

φ – Coeficiente de fluência

Å – angström

Π – Pi (3,14159265359)

$\Delta\sigma$ – Variação de tensão

$\Delta\varepsilon$ – Variação de deformação específica

σ_b – Tensão maior

ε_b – Deformação específica média na maior tensão

ε_a – Deformação específica média dos corpos-de-prova sob a tensão básica

θ – Ângulo dos picos obtidos na difração de raios-X

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	27
2 OBJETIVOS	29
2.1 OBJETIVO GERAL.....	29
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	29
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	31
3.1 CONCRETO ESTRUTURAL.....	31
3.2 CARACTERÍSTICAS E PROPORÇÕES DOS MATERIAIS QUE CONSTITUEM O CONCRETO	31
3.2.1 Relação água/cimento	31
3.2.2 Incorporação de ar	32
3.2.3 Tipo de cimento	33
3.2.4 Tipo de agregados.....	35
3.2.5 Aditivos e adições	36
3.2.6 Condições de cura.....	37
3.3 DEFORMAÇÕES E FISSURAS NO CONCRETO.....	38
3.3.1 Mecanismos de formação de fissuras.....	38
3.3.2 Efeito da temperatura na deformação do concreto	39
3.3.3 Impactos das manifestações patológicas.....	45
3.4 RESÍDUO DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR	46
3.5 RESÍDUOS DE LÃS MINERAIS.....	48
3.6 CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS.....	50
3.7 CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS NATURAIS	52
3.8 CONCRETO REFORÇADO COM LÃS MINERAIS	55
4 METODOLOGIA	57
4.1 OBTENÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS	58
4.2 PREPARAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS	59
4.2.1 Moagem dos bagaços da cana-de-açúcar	59
4.2.2 Tratamento químico do bagaço de cana-de-açúcar.....	61
4.2.3 Moagem da lã de vidro.....	63
4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS	64
4.3.1 Distribuição granulométrica	64
4.3.2 Fluorescência de raios-X (FRX).....	67
4.3.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	67
4.3.4 Termogravimetria (TG).....	67
4.3.5 Difração de raios-X (DRX)	68
4.4 MISTURA DOS EXPERIMENTOS	68
4.4.1 Dosagem dos concretos	68
4.4.2 Mistura dos concretos	70
4.5 MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA.....	70

4.5.1	Preparo dos corpos-de-prova para os ensaios de resistência à compressão.....	72
4.5.2	Preparo dos corpos-de-prova dos concretos para os ensaios de resistência de tração na flexão	72
4.5.3	Preparo dos corpos-de-prova dos concretos para os ensaios de tração por compressão diametral	73
4.5.4	Preparo dos corpos-de-prova dos concretos para os ensaios de determinação do coeficiente de expansão térmica linear	73
4.6	ENSAIO DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO	73
4.7	ENSAIO DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO	74
4.7.1	Ensaio de absorção de água.....	75
4.7.2	Ensaio de índice de vazios	76
4.7.3	Ensaio de massa específica aparente seca	77
4.7.4	Ensaio de compressão	77
4.7.5	Ensaio de tração na flexão.....	79
4.7.6	Ensaio de tração por compressão diametral.....	80
4.7.7	Ensaio do módulo de elasticidade	81
4.7.8	Ensaio para a determinação do coeficiente de dilatação térmica linear	83
4.7.9	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	86
4.7.10	Microscopia óptica	86
4.8	TRATAMENTO ESTATÍSTICO	86
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	89
5.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	89
5.1.1	Caracterização da lâ de vidro	89
5.1.1.1	Análise química	89
5.1.1.2	Difração de raios X	89
5.1.1.3	Análise granulométrica	90
5.1.1.4	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) lâ de vidro	91
5.1.1.5	Termogravimetria (TG) Lã de vidro moída	92
5.1.2	Caracterização do Bagaço da cana-de-açúcar.....	93
5.1.2.1	Termogravimetria (TG) do Bagaço da cana-de-açúcar.....	93
5.1.2.2	Microscopia eletrônica de varredura (MEV) das fibras do bagaço da cana-de-açúcar.....	95
5.1.3	Caracterização dos agregados.....	95
5.1.3.1	Análise granulométrica dos agregados miúdos.....	95
5.1.3.2	Análise granulométrica dos agregado graúdo	97
5.2	ENSAIOS DOS CONCRETOS NO ESTADO FRESCO.....	98
5.2.1	Ensaio de consistência (<i>Slump test</i>).....	98
5.2.1.1	Análise estatística dos resultados de consistência (<i>Slump test</i>). ..	99
5.3	ENSAIOS DOS CONCRETOS NO ESTADO ENDURECIDO	102

5.3.1 Absorção de água, índice de vazios e massa específica aparente seca dos concretos.....	102
5.3.1.1 Análise estatística dos resultados de absorção de água	104
5.3.1.2 Análise estatística dos resultados dos índices de vazios.....	106
5.3.1.3 Análise estatística dos resultados da massa específica aparente seca.....	109
5.3.2 Resistência a compressão dos concretos	112
5.3.2.1 Análise estatística dos resultados da resistência a compressão aos 7 dias	114
5.3.2.2 Análise estatística dos resultados da resistência a compressão aos 28 dias	116
5.3.2.3 Análise estatística dos resultados da resistência a compressão aos 56 dias	119
5.3.3 Resistência de tração: por compressão diametral e por esforços de flexão.....	122
5.3.3.1 Análise estatística dos resultados da resistência a tração por compressão diametral.....	124
5.3.3.2 Análise estatística dos resultados da resistência a tração na flexão.....	126
5.3.4 Módulo de elasticidade.....	129
5.3.4.1 Análise estatística dos resultados do módulo de elasticidade..	131
5.3.5 Coeficiente de dilatação térmica linear	133
5.3.5.1 Análise estatística dos resultados do coeficiente de dilatação térmica linear.....	135
5.4 TERMOGRAVIMETRIA DOS CONCRETOS	137
5.5 MICROSCOPIA ÓPTICA DOS CONCRETOS	139
6 CONCLUSÃO	141
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	143
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	145

1 INTRODUÇÃO

A qualidade das estruturas construídas de obras habitacionais, laborais e de infraestrutura têm sido afetadas por falhas e casos de imperícia, que comprometem o desempenho de uso, a segurança e a durabilidade de uma edificação (SOUZA; RIPPER, 2009, p. 13).

A fissuração é um tipo de patologia que pode comprometer o desempenho, a integridade e a durabilidade dos concretos. Esta patologia pode surgir em função da baixa resistência de tração do concreto em relação à sua resistência à compressão. Normalmente os valores de resistência à tração são de aproximadamente 8% a 15% de sua resistência à compressão. Por esta razão, são incorporados no concreto armaduras de aço a fim de aumentar os valores de resistência a tração (QUININO, 2015, p. 1). Porém, mesmo com o uso de armaduras de aço incorporadas no concreto, a NBR 6118 (2014, p. 79) cita que a fissuração no concreto por esforços de tração é inevitável.

Outro mecanismo formador de fissuras relacionado com as propriedades do concreto são as variações térmicas. Essas variações geram alterações dimensionais (dilatação ou contração) no elemento estrutural de concreto como lajes, vigas, pilares e/ou escadas, resultando em deformações. Se os elementos estruturais estiverem impedidos de se movimentarem, estes irão sofrer tensões que podem provocar fissuras. O efeito da variação de temperatura depende da variação térmica do ambiente no qual o elemento está exposto e do seu coeficiente de dilatação térmica (MARCELLI, 2007, p. 98).

As fissuras representam problemas patológicos em edifícios, que podem comprometer o desempenho da estrutura (THOMAZ, 2014, p. 15). Além disso, geram prejuízos econômicos e ambientais, visto que as atividades de correção demandam o consumo de novos materiais, mão-de-obra e de equipamentos. Do ponto de vista ambiental, essas atividades contribuem para o aumento da extração de recursos naturais no processamento de materiais e tecnologia, além do aumento na geração de resíduos de construção e de demolição (RCD's). Estima-se que em 2015, os municípios brasileiros coletaram mais de 45 milhões de toneladas de resíduos de construção e de demolição (RCD's) (ABRELPE, 2015, p. 64).

A fim de solucionar os problemas de fissuração do concreto e alterações dimensionais, causados, respectivamente, por esforços de tração e variações térmicas, as indústrias da construção civil têm buscado como alternativa o desenvolvimento das propriedades do concreto com a adição de fibras, formando um novo compósito. Neste conceito, o uso de fibras que são descartadas como resíduos pode ser uma alternativa para

diminuição dos custos, passivos ambientais e o consumo de matérias-primas primárias.

Dentre os resíduos que possuem potencial de serem utilizados como fibras para reforço em concreto, pode-se citar o bagaço de cana e a lã de vidro. O bagaço de cana-de-açúcar é resíduo gerado através das atividades de moagem da cana para a extração da garapa ou caldo de cana, onde são produzidos o açúcar e álcool (SILVA, 2010, p. 30). Segundo Silva (2006, p. 18), o fato do Brasil ser o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, favorece a importância econômica e ambiental em utilizar os componentes dessa biomassa vegetal, já que seus resíduos são produzidos na mesma proporção percentual. Segundo dados do Ministério da Agricultura (2016), o Brasil deverá colher até 2019, 47,34 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, o que corresponde a um acréscimo de 14,6 milhões de toneladas em relação ao período de 2007/2008. Para cada tonelada de cana-de-açúcar moída, cerca de 240 kg a 280 kg de resíduos do bagaço da cana são gerados. Desta forma, pode-se prever que até 2019 o Brasil gerará de 11,36 a 13,26 milhões de toneladas de resíduos do bagaço da cana (NOVACANA, 2017). Quanto à lã de vidro, este material pode ser encontrado em revestimentos de fornos, tubos bipartidos, painéis e lã branca, aplicada com o objetivo de melhorar o isolamento térmico das instalações, quando comparadas as situações sem nenhum tipo de tratamento. Esse material pode ser encontrado na forma de resíduo em aterros sanitários. Este descarte, gera despesas para o Brasil que passam de 100 milhões de reais (CERPOLO, 2014).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o reaproveitamento do bagaço da cana-de-açúcar e da lã de vidro como reforços no concreto para a prevenção de fissuração por esforços de tração e deformação por variação de temperatura.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o efeito da adição do bagaço da cana-de-açúcar como fibras de reforços nas propriedades mecânicas dos concretos;
- Avaliar o efeito do bagaço da cana-de-açúcar como fibras de reforços sobre a dilatação térmica dos concretos;
- Avaliar a contribuição da lã de vidro moída para os ganhos de resistência mecânica dos concretos;
- Avaliar a contribuição da lã de vidro moída para a redução da movimentação térmica dos concretos.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 CONCRETO ESTRUTURAL

Segundo a NBR 12655 (2015, p. 3) concreto de cimento Portland é um material formado pela mistura homogênea de cimento, agregados miúdo, agregados graúdos e água. Essa mistura poderá ou não incorporar componentes minoritários como aditivos químicos e adições de metacaulim ou sílica ativa, desenvolvendo suas propriedades através do endurecimento da pasta de cimento (cimento e água). Segundo Mehta e Monteiro (2014, p. 4 e 5) os concretos podem ser utilizados em barragens, revestimentos de canais e pavimentos, estacas, fundações, lajes, vigas, pilares, coberturas, muros externos e tubos.

3.2 CARACTERÍSTICAS E PROPORÇÕES DOS MATERIAIS QUE CONSTITUEM O CONCRETO

As características do concreto podem ser influenciadas pelos materiais e proporções que o constituem. Neste sentido, pode-se destacar a relação água/cimento (a/c), ar incorporado, tipo de cimento e agregados, além de aditivos e adições e condições de cura (MEHTA; MONTEIRO, 2014, p. 55 a 62).

3.2.1 Relação água/cimento

Uma pesquisa realizada por Piasta e Zarzycki (2017, p. 402) identificou através dos resultados de absorção de água, um aumento na porosidade capilar da pasta de cimento do concreto, com o aumento do fator água/cimento. Para um volume de pasta de cimento igual a $420 \text{ dm}^3/\text{m}^3$, os concretos com fatores água/cimento igual a 0,35 obtiveram resultados médios de absorção de água de 4,98%. Já os concretos com fatores água/cimento igual a 0,25, obtiveram resultados médios de absorção de água de 3,79%. Os concretos com fator a/c de 0,35 e 0,25, aos 28 dias, obtiveram resultados médios de resistência à compressão de 84,3 MPa e 110,2 MPa, respectivamente.

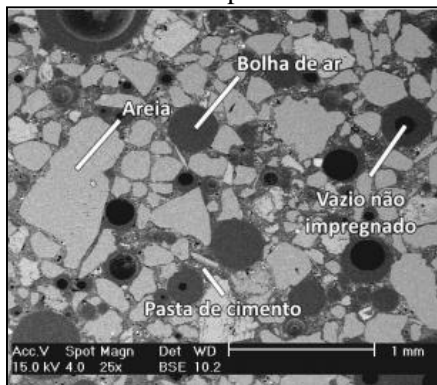
Shen et al., (2017, p. 411 a 415) produziram misturas de concreto com quantidades de água de 200, 180 e $171 \text{ dm}^3/\text{m}^3$ de concreto. Os resultados de resistência de tração axial mostram que os concretos com a menor quantidade de água, obtiveram os melhores valores de resistência aos 28 dias. As amostras com 200, 180 e $171 \text{ dm}^3/\text{m}^3$ de concreto

obtiveram valores médios de resistência à tração axial de 4,6 MPa, 5,2 MPa e 6,3 MPa, respectivamente.

3.2.2 Incorporação de ar

A incorporação de ar no concreto, quando feita de forma proposital através do uso de aditivos incorporadores de ar, tem como objetivo melhorar a trabalhabilidade de concretos e argamassas. Porém, no estado endurecido, o ar incorporado reduz as propriedades mecânicas do material. Os resultados do estudo realizado por Gleize et al., (2008, p. 10 a 14), mostram uma diminuição nos valores das resistências à compressão, tração na flexão, aderência à tração e o módulo de elasticidade dinâmico. Nesta pesquisa, foram ensaiadas argamassas de cimento sem adições e com adições de 0,05%, 0,10%, 0,15% e 0,20% de aditivos em pó. A água foi adicionada para obter um índice de consistência na mesa *flow-table* de (250 ± 10) mm. Os menores resultados foram com argamassas produzidas com 0,20% de ar incorporado. Os valores médios aproximados de resistência à compressão, tração na flexão, aderência à tração e o módulo de elasticidade foram de 2,0 MPa, 0,8 MPa, 0,16 MPa e 4,50 GPa, respectivamente, após 28 dias. A figura 1 apresenta a imagem da microestrutura da argamassa, obtida pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV) com 0,05% de adição.

Figura 1 – Imagem obtida pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV) com 0,05% de aditivos incorporadores de ar.



Fonte: Gleize et al. (2008).

Observando a figura 1 pode-se perceber as bolhas de ar e os vazios não impregnados existentes entre a pasta de cimento e areia, o que

contribui para a redução da resistência mecânica do material (GLEIZE et al. 2008, p. 10).

3.2.3 Tipo de cimento

A resistência do concreto pode ser influenciada também pelo tipo de cimento. Merah e Krobba (2017, p. 884) realizaram uma pesquisa produzindo misturas de concreto com as mesmas composições, modificando apenas os tipos de cimento. Foram produzidas amostras utilizando os cimentos calcário do tipo II e cimento Portland comum (CP I). Nesta pesquisa, ensaios de compressão foram realizados aos 7, 14 e 28 dias, obtendo-se os resultados de 17,75 MPa, 24,90 MPa e 30,37 MPa, respectivamente, utilizando o cimento CPI. Utilizando o cimento do tipo II, para as mesmas idades, os valores de resistência à compressão foram de 15,65 MPa, 22,09 MPa e 26,61 MPa, respectivamente.

O processo de hidratação nos concretos (que acarreta no ganho de resistência) consiste na redução progressiva do tamanho das partículas do cimento, à medida que um produto hidratado é formado. Assim, quanto mais fino for o cimento, maior será a velocidade de reação com o conseqüente ganho de resistência. A presença de adições minerais na fabricação do cimento é outro fator que influencia na sua resistência. (PASSUELO et al., 2011, 625). A tabela 1 apresenta os teores dos componentes dos cimentos Portland.

Tabela 1 - Teores dos componentes de cimentos Portland.

Siglas	Classes de resistência	Componentes (% em massa)			
		Clínquer + sulfato de cálcio	Escória de alto-forno	Material pozolânico	Material carbônico
CP I	25-32-40	100	-	-	-
CP I-S	25-32-40	99-95	1-5	1-5	1-5
CP II-E	25-32-40	94-56	6-34	-	0-10
CP II-Z	25-32-40	94-76	-	6-14	0-10
CP II-F	25-32-40	94-90	-	-	0-10
CP III	25-32-40	65-25	35-70	-	0-5
CP IV	25-32	85-45	-	15-50	0-5
CP V-ARI	-	100-95	-	-	-
RS	25-32-40				
BC	25-32-40			(*)	
CPB	25-32-40	-	-	-	-

(*) A composição depende do tipo original do qual é derivado

Fonte: Passuelo et al. (2011) (adaptado pelo autor).

Durante o processo de hidratação do cimento, outro fator que deve ser considerado é o surgimento de rachaduras. Neste processo, efeitos térmicos são gerados como consequência do calor liberado. A diferença de temperatura entre o interior e a superfície externa dos elementos de concreto gera tensões térmicas, implicando no surgimento de rachaduras que prejudicam a durabilidade e vida útil dos elementos de concreto. Utilizar cimentos com menor calor de hidratação é um método de reduzir esse problema (BOFANG, 2014, p. 70). A tabela 2 apresenta o impacto do tipo de cimento no calor de hidratação.

Tabela 2 - Impacto do tipo de cimento no calor de hidratação.

Tipo de cimento	Calor de hidratação (J/g) após:					
	12 h	24 h	36 h	48 h	60 h	72 h
CEM I 42,5R	77	170	212	235	253	269
CEM II/B-S 32,5R	58	125	163	182	195	206
CEM II/B-V 32,5R	31	86	124	148	162	173
CEM III/A 32,5N-LH/HSR/NA	46	93	125	142	155	164
CEM V/A (S-V) 32,5R-LH/HSR/NA	43	106	147	167	180	190
VLH V/B (S-V) 22,5	16	46	71	87	98	108

Fonte: Batog e Giergiczny (2017) (adaptado pelo autor).

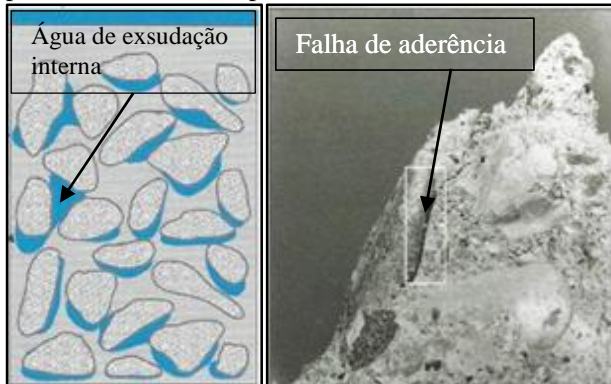
Analisando a tabela 2 percebe-se as variações dos valores de calor de hidratação em cada tipo de cimento até as 72 horas. O cimento do tipo CEM I 42,5R apresenta o maior valor de calor de hidratação, chegando a 269 J/g na idade de 72 horas. Isso se deve pelo fato dos cimentos do tipo I apresentarem um maior teor de clínquer em sua composição, que corresponde ao componente responsável pela formação do produto hidratado. Todos os cimentos citados na tabela 2 foram submetidos a ensaios de resistência à compressão nas idades de 2, 28 e 90 dias. Os cimentos que apresentaram maior calor de hidratação também apresentaram os maiores valores de resistência à compressão. Aos 90 dias o cimento CEM I 42,5 R apresentou o maior valor dos ensaios, chegando a 61,3 MPa. O cimento VLH V/B (S-V) 22,5 obteve o resultado de 45,4 MPa, resultando no menor valor de resistência à compressão aos 90 dias (BATOG; GIERGICZNY, 2017, p. 224).

3.2.4 Tipo de agregados

A porosidade, forma e a textura dos agregados graúdos afetam as propriedades do concreto. Quanto maior o tamanho das partículas dos agregados graúdos que compõem os concretos, menor será a necessidade de água de amassamento, contribuindo para a obtenção de melhores resistências mecânicas quando comparados com os concretos que contêm agregados menores. Por outro lado, agregados maiores tendem a formar uma zona de transição na interface agregado/pasta de cimento mais fraca, contendo uma maior quantidade de microfissuras, comparando com concretos de agregados menores. Esse fenômeno, conhecido como

exsudação, pode ser visualizado na figura 2 (MEHTA; MONTEIRO, 2014, p. 28).

Figura 2 - (a) Representação esquemática da exsudação no concreto fresco recém-lançado; (b) falha de aderência por cisalhamento em um corpo de prova ensaiado à compressão uniaxial.



Fonte: Mehta e Monteiro (2014).

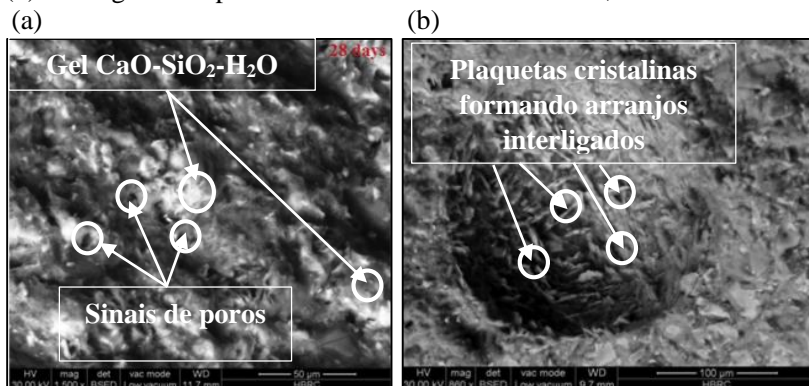
3.2.5 Aditivos e adições

O uso de aditivos e adições no concreto tem como objetivo modificar suas propriedades no seu estado fresco como trabalhabilidade, segregação, pega, endurecimento e conteúdo de ar incorporado, além de propriedades no seu estado endurecido como resistência às ações físicas, mecânicas e químicas. Aspectos econômicos também podem justificar o uso de aditivos no concreto (PASSUELO et al., 2005, p. 382).

Ahmed et al. (2014, p. 118) descreve que a resistência de tração na flexão do concreto pode ser influenciada pelos tipos de adições. Um estudo realizado por Abd. El. Aleem, Heikal e Morsi, (2014, p. 151 a 160) provou que o uso de adições minerais de nano sílica nos compósitos cimentícios é capaz de melhorar as características mecânicas e microestruturais do mesmo. Nesta pesquisa foram produzidas amostras de compósitos cimentícios, variando de 0,0% a 6,0% as substituições de cimento por nano sílica. Utilizando cimento CP I, os compósitos cimentícios com 5,0% de substituições de cimento por nano sílica, apresentaram os melhores resultados de resistência à compressão, com valores médios próximos a 43,0 MPa aos 90 dias. Os pesquisadores justificam esses valores na influência da nano sílica no comportamento

de hidratação e morfologia dos produtos hidratados formados da pasta de cimento. As figuras 3 (a) e 3 (b) apresentam, respectivamente, micrografias da pasta de cimento sem adição de nano sílica e com 3,0% de adição de sílica aos 28 dias.

Figura 3 - (a) Micrografia da pasta de cimento aos 28 dias sem nano sílica; (b) Micrografia da pasta de cimento aos 28 dias com 3,0 % de nano sílica.



Fonte: Abd. El. Aleem, Heikal e Morsi (2014).

Visualizando a figura 3(a) pode-se identificar uma estrutura com gel de silicato de cálcio hidratado (CaO-SiO₂-H₂O) formado, produzindo uma cobertura de superfície densa nas partículas de cimento, porém contendo ainda sinais de poros. A figura 3(b) mostra uma estrutura densa de hidratos do tipo (CaO-SiO₂-H₂O) semelhantes a plaquetas e hidratos cristalinos, formando uma estrutura estreita com arranjos interligados. Isso se deve a reação da nano sílica com o Hidróxido de Cálcio Ca(OH)₂ liberados na hidratação, formando silicato de cálcio hidratado (CaO-SiO₂-H₂O) adicional. Além do aumento da resistência à compressão em relação a pasta de cimento sem nano sílica, a pasta de cimento contendo nano sílica apresentou uma menor expansão térmica. Com 5,0% de nano sílica, o valor do coeficiente de expansão térmica da pasta de cimento a uma temperatura de 75°C chegou a um valor próximo de $1,6 \times 10^{-5}/K$. Já a pasta de cimento sem nano sílica chegou a um valor próximo de $3,0 \times 10^{-5}/K$ (ABD. EL. ALEEM; HEIKAL; MORSI, 2014, p. 159).

3.2.6 Condições de cura

Os processos de cura do concreto são os procedimentos adotados para promover a hidratação do cimento, controlando a temperatura, além

da entrada e saída da água. O objetivo é manter o concreto saturado até que os espaços inicialmente ocupados com a água da pasta do cimento fresca, tenham sido preenchidos pelos produtos produzidos com a hidratação do cimento (NEVILLE, 2016, p. 334).

Ramezianipour e Malhotra (1995, p. 132) analisaram quatro condições de umidade para os processos de cura. Essas condições foram a cura úmida, cura em ambiente de laboratório, cura em ambiente de laboratório após 2 dias de cura úmida e cura a uma temperatura de 38°C e com 65% de umidade relativa. Neste estudo, percebeu-se que os concretos submetidos à cura úmida obtiveram os melhores resultados de resistência à compressão. Nas idades de 1, 3, 7, 28 e 180 dias, os resultados médios obtidos foram de 19,6 MPa, 28,9 MPa, 37,8 MPa, 48,4 MPa e 48,9 MPa. Os concretos com cura em laboratório após dois dias de cura úmida, obtiveram os resultados médios de 19,6 MPa, 28,9 MPa, 34,9 MPa, 39,6 MPa e 44,3 MPa, nos respectivos períodos de 1, 3, 7, 28 e 180 dias.

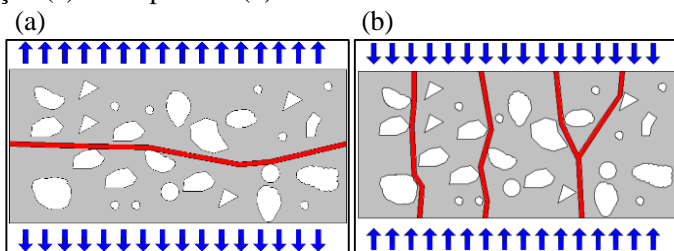
3.3 DEFORMAÇÕES E FISSURAS NO CONCRETO

O comportamento do concreto é dado em função das tensões atuantes e de suas propriedades. Os concretos estruturais costumam apresentar valores de resistência de tração na flexão na ordem 10 a 15% do valor de resistência à compressão (MEHTA; MONTEIRO, 2014, p. 17).

3.3.1 Mecanismos de formação de fissuras

Passuelo et al., (2011, p. 617 e 618) citam que um concreto submetido a um esforço de tração sofre uma falha na pasta de cimento, causando um enfraquecimento localizado no material. À medida que as tensões aplicadas aumentam, ocorre um processo de localização da tensão com o incremento do tamanho da falha, levando à propagação das microfissuras. Essa propagação é mais intensa na zona de transição da interface entre o agregado graúdo e a pasta de cimento hidratado, interconectando-se tridimensionalmente, causando ruptura do concreto por tração, conforme pode ser visualizado na figura 4(a). Já um concreto submetido a esforços de compressão, terá a ruptura por tração indireta, pois o mecanismo de propagação das microfissuras é o mesmo. A figura 4(b) apresenta a ruptura do concreto internamente por esforços de compressão.

Figura 4 - Fissuração microestrutural do concreto submetido a esforços de tração (a) e compressão (b).



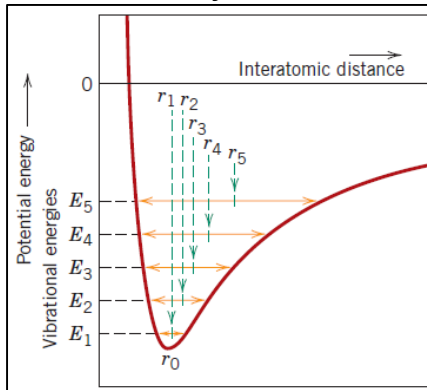
Fonte: Passuelo et al. (2011) (adaptado pelo autor).

O concreto também pode sofrer deformações elásticas e inelásticas no carregamento, além de deformações de retração por secagem ou por resfriamento. Quando restringidas, as deformações por retração ou térmicas resultam em tensões que podem causar fissurações, em função do surgimento de tensões elásticas de tração, onde a magnitude dessa tensão pode ser induzida por (σ), que é resultado da multiplicação da deformação (ϵ) pelo módulo de elasticidade (E) do material. Assim, as fissuras no material ocorrerão quando a combinação do módulo de elasticidade e da deformação por retração induz um nível de tensão que excede sua resistência à tração (MEHTA; MONTEIRO, 2014, p. 88).

3.3.2 Efeito da temperatura na deformação do concreto

Os materiais sólidos, estes expandem quando aquecidos e se contraem quando resfriados. Isso representa o aumento da distância média entre átomos, promovida pelo aumento das energias vibracionais provocadas pela absorção de calor dos materiais. Assim, quando a energia vibracional é diminuída, ocorre o aprofundamento e estreitamento do poço de energia potencial, conforme pode ser visualizado na figura 5 (CALLISTER; RETHWISCH, 2015, p. 670).

Figura 5 - Gráfico da energia potencial em função da distância interatômica, demonstrando o aumento da separação interatômica (r_0 evoluindo para r_1, r_2 até r_5 , em função do aumento de temperatura).



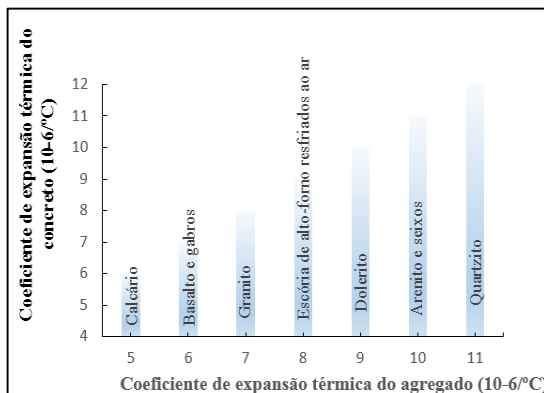
Fonte: Callister e Rethwisch (2015).

A fração da variação do comprimento (Δl) pela variação de temperatura (ΔT) representa o coeficiente de expansão térmica linear (α_{l0}) dos materiais, expressa pela equação 1 (CALLISTER; RETHWISCH, 2015, p. 670).

$$\frac{\Delta l}{\Delta T} = \alpha_{l0} \quad \text{Equação 1}$$

Nos concretos, controlar a temperatura já na fase de lançamento é uma forma de evitar fissurações em função dessas tensões geradas pela variação de temperatura. Este controle pode ser realizado pelo coeficiente de expansão térmica linear do agregado. A figura 6 apresenta o coeficiente de expansão térmica de alguns agregados (grãos e miúdos) do concreto e suas influências no coeficiente de expansão térmica do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014, p. 110 e 118).

Figura 6 - Influência do tipo de agregado no coeficiente de expansão térmica do concreto.



Fonte: Mehta e Monteiro (2014).

O coeficiente de expansão térmica do concreto é a resultante dos coeficientes de dilatação térmica da pasta de cimento hidratada e dos agregados. A variação da composição também influenciará nos resultados. O coeficiente de expansão térmica da pasta de cimento hidratada varia de $1,1 \times 10^{-5}$ a $2,0 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ (NEVILLE, 2016, p. 394). Materiais utilizados como adições para a pasta de cimento hidratado como a Sílica (SiO_2) apresentam valores de coeficiente de expansão térmica de $4,0 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ (CALLISTER; RETWISCH, 2015, p. 669).

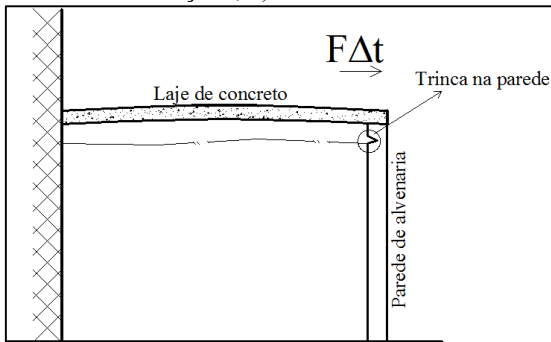
Tensões de tração (σ) poderão surgir nos concretos decorrentes de variáveis como coeficiente de expansão térmica (α), variação de temperatura (ΔT), módulo de elasticidade (E), grau de restrição (K_r) e coeficiente de fluência (ϕ), expressa pela equação 2 (MEHTA; MONTEIRO, 2014, p. 112).

$$\sigma_t = K_r * \frac{E}{1 + \phi} * \alpha \Delta T \quad \text{Equação 2}$$

Com o surgimento das tensões de tração, caso os elementos de concreto estejam totalmente restringidos, é possível ocorrer fissuração em função da inexistência do alívio de tensão e caso tais tensões sejam superiores a resistência à tração do concreto ((MEHTA; MONTEIRO, 2014, p. 112). Segundo THOMAZ (2014, p. 23), exemplificando o caso de uma laje plana interligada a uma parede de alvenaria, as tensões de

tração provocadas pela variação de temperatura, desenvolvendo trincas exclusivamente nas paredes, conforme pode ser visualizado na figura 7.

Figura 7 - Trinca típica no topo da parede paralela ao comprimento da laje resultante das tensões de tração (σ_t).



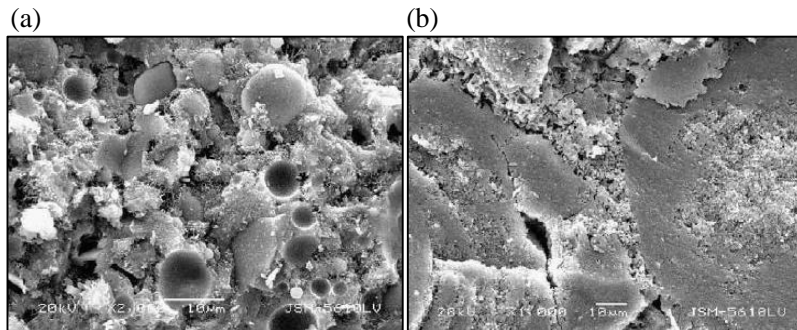
Fonte: Thomaz (2014) (adaptado pelo autor).

Fatores como consumo de água de emassamento e porosidade também influenciam no coeficiente de expansão térmica do concreto. Zeng et al., (2012, p. 475) realizaram uma pesquisa sobre o efeito da porosidade no coeficiente de expansão térmica de pastas de cimento e argamassas, onde obtiveram como conclusões a diminuição do coeficiente de expansão térmica com o aumento da porosidade. Com 15,1% de porosidade na pasta de cimento, o valor médio do coeficiente de expansão térmica chegou a $10,0 \mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$, enquanto para 21,0% de porosidade, o valor médio do coeficiente de expansão térmica chegou a valores próximos de $8,5 \mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$. Os pesquisadores justificam esses resultados na existência de uma camada densa em torno dos vazios de ar que impedem o arrasto de tais vazios com a variação da temperatura, promovendo a queda do coeficiente de expansão térmica linear. Abd. El. Aleem, Heikal e Morsi, (2014, p. 158) descrevem que os vazios existentes na microestrutura dos compostos cimentícios podem acomodar a expansão térmica interna do material, reduzindo o coeficiente de expansão térmica linear.

Shui et al., (2010, p. 1761 a 1767) estudaram os efeitos do uso de adições minerais nos concretos, em substituição do cimento Portland. Neste estudo, foram avaliados os coeficientes de expansão térmica linear e a porosidade dos concretos produzidos sem adições minerais, substituindo 15,0% e 30,0% do consumo de cimento por cinzas volantes e substituindo 10,0% e 15,0% do consumo de cimento por fumo de sílica.

As amostras foram curadas a 20°C num período de 28 dias. Os ensaios de deformação térmica foram realizados numa variação de temperatura de 30°C a 80°C. Os resultados desta pesquisa mostram que dentre as misturas, os concretos contendo 15,0% de fumo de sílica em substituição ao cimento apresentaram os menores valores de coeficiente de expansão térmica linear, com o resultado médio de $1,712 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$. Nas mesmas condições, os concretos sem adições minerais apresentaram um valor médio do coeficiente de expansão térmica linear de $2,284 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ e os concretos com 30,0% de cinzas volantes em substituição ao cimento, apresentaram valores médios de $1,724 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$. Quanto a porosidade, os concretos com 15,0% de fumo de sílica em sua constituição, apresentaram o menor valor de porosidade, com um resultado médio de 16,86%. Os concretos sem adições minerais apresentaram valores médios de 20,57% de porosidade. Os concretos com 30,0% de cinzas volantes em sua constituição, apresentaram valores de porosidade médios de 27,71%. As figuras 8 (a) e (b), apresentam as microestruturas dos concretos com adições de cinza volante e fumo de sílica.

Figura 8 - Microestrutura dos concretos com adições minerais (a) 30% de cinza volante e (b) 15% de fumo de sílica.



Fonte: Shui et al. (2010).

As imagens apresentadas nas figuras 8 (a) e (b) mostram que o concreto com 15% de fumo de sílica apresenta uma menor porosidade comparado com as imagens que representam a microestrutura contendo 30,0% de cinza volante. Os pesquisadores justificam a redução dos coeficientes de expansão térmica dos concretos com fumos de sílica pela alteração do conteúdo de Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e pelas porosidades. Parte da Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) formada na hidratação do clínquer é consumida pela reação do fumo de sílica, desenvolvendo a fase sólida de silicato de

cálcio hidratado (CaO-SiO₂-H₂O). Com isso, o coeficiente de expansão térmica do material é reduzido. O valor típico do coeficiente de expansão térmica da Portlandita (Ca(OH)₂) é de 5,25x10⁻⁵/ °C, valor superior ao coeficiente de expansão térmica da própria pasta de cimento hidratado. Os resultados finais desta pesquisa possibilitou a obtenção de um modelo de regressão linear para a obtenção do coeficiente de expansão térmica linear (α) em função da porosidade (P) e conteúdo de Portlandita (Ca(OH)₂) (M_{CH}), expressa pela equação 3 (SHUI et al., 2010, p. 1761 a 1767).

$$\alpha = 13,99 - 0,1177P + 1,725M_{CH} \quad \text{Equação 3}$$

Segundo Silva, Roman e Gleize (2002, p. 1385), o conteúdo de Portlandita (Ca(OH)₂) pode ser determinado por meio da perda de massa ocorrida com a desidratação da Portlandita (Ca(OH)₂) durante o ensaio de Termogravimetria. Essa desidratação deverá ocorrer entre as temperaturas de 410 °C a 520 °C. Conhecendo essa perda de massa, o conteúdo de Portlandita (Ca(OH)₂) pode ser determinado aplicando a equação 4.

$$\text{Ca(OH)}_2 = \text{pmCHx} \frac{\text{mmCa(OH)}_2}{\text{mmH}_2\text{O}} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

pmCH - é a perda de massa de Ca(OH)₂ em %;

mmCa(OH)₂ - é a massa molar do Hidróxido de Cálcio;

mmH₂O - é a massa molar da água.

Shui et al. (2010, p. 1766) descrevem que a massa de Portlandita (Ca(OH)₂) pode ser calculada com base na perda de massa do composto cimentício hidratado quando submetido a uma temperatura entre 400 °C a 450 °C. Os pesquisadores citam que a massa de Portlandita (Ca(OH)₂) resulta na multiplicação de 4,111 vezes a perda de massa ocorrida.

A Portlandita (Ca(OH)₂) compõe de 20,0% a 25,0% do volume dos sólidos produzidos das transformações de fases ocorridas na hidratação do cimento. Podem ser encontrados na forma de cristais prismáticos hexagonais que podem ser afetados pela disponibilidade de espaço, temperatura de hidratação e existência de impurezas no sistema (PASSUELO ET AL., 2011, p. 591). Já o silicato de cálcio hidratado (CaO-SiO₂-H₂O) compõe de 50,0% a 60,0% o volume dos sólidos existentes em uma pasta de cimento hidratado, fornecendo a maior parte

da resistência e durabilidade da pasta de cimento hidratado. Sua morfologia é representada por redes reticulares aglomeradas, com espaços interlamelares (MEHTA; MONTEIRO, 2014, p. 31).

As fissuras e deformações representam mecanismos geradores de manifestações patológicas em edificações, que causam prejuízos à segurança e desempenho de serviço por parte dos usuários, além da redução da durabilidade das construções. França et al. (2011, p. 72 a 77) definem patologia na construção civil como a ciência que estuda as anomalias ou problemas (possíveis doenças), causadoras de alterações anatômicas e funcionais.

3.3.3 Impactos das manifestações patológicas

As edificações têm estado expostas a ambientes como: proximidades litorâneas (presenças de sulfatos e cloretos), além da poluição urbana e industrial decorrente do crescimento das cidades. Esta exposição contribui para o surgimento de níveis de degradação relacionados à qualidade e durabilidade, afetando a estética, segurança, utilização e durabilidade das construções. Sinistros ocorridos no Brasil como o desabamento dos edifícios Palace II e Areia Branca, além do acidente no estádio de futebol Fonte Nova, representam exemplos dos impactos relacionados com a durabilidade das construções (POSSAN; DEMOLINER, 2013, p. 1 a 18).

Impactos econômicos também podem ser gerados pelas patologias na construção civil. A tabela 3 apresenta o impacto econômico que os serviços de reparo e manutenção de edificações têm gerado em diversos países (FRANÇA ET AL., 2011, p. 72).

Tabela 3 - Relação de gastos com novas construções, manutenção e reparos em países como: França, Alemanha, Itália e Reino Unido.

País	Gastos com construções novas	Gastos com manutenção e reparo	Gastos totais com construção
França	85,6 bilhões de euros (52%)	79,6 bilhões de euros (48%)	165,2 bilhões de euros (100%)
Alemanha	99,7 bilhões de euros (50%)	99,0 bilhões de euros (50%)	198,7 bilhões de euros (100%)
Itália	58,6 bilhões de euros (43%)	76,8 bilhões de euros (57%)	135,4 bilhões de euros (100%)
Reino Unido (Inglaterra, Escócia, País de Gales e Irlanda do Norte)	60,7 bilhões de pounds (50%)	61,2 bilhões de pounds (50%)	121,9 bilhões de pounds (100%)

Fonte: Medeiros e Helene (2009).

Em relação a sistemas estruturais em concreto armado e protendido, as atividades relacionadas à manutenção, reparo e restauração, correspondem a 35% do total do volume de trabalho do setor da construção civil (GARCIA-ALONSO et al., 2007, p. 1463 a 1471).

Estudos realizados no Brasil mostrou que os investimentos em intervenções de manutenção, em uma estrutura com alto grau de deterioração, se aproximam a 40% dos custos de execução do componente degradado (POSSAN; DEMOLINER, 2013, p. 1 a 18).

3.4 RESÍDUO DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR

A cana-de-açúcar é uma gramínea tropical, pertencente ao gênero *Saccharum* da família *Poaceae*, que se destaca pela sua capacidade de acumular altas quantidades de sacarose nos colmos, podendo chegar a 42% de seu peso seco (FERREIRA, 2013, p. 23). Seu cultivo é destinado para a produção do açúcar, álcool, aguardente e outras bebidas como o próprio caldo de cana (SILVA, 2010, p. 27).

Segundo dados do Ministério da Agricultura (2016), o Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, sendo o primeiro a produzir açúcar e etanol. O país deverá colher até a safra 2018/2019 um valor de 47,34 milhões de toneladas do produto, o que corresponde a um acréscimo de 14,6 milhões de toneladas em relação ao período de 2007/2008.

Durante o processo produtivo de seus derivados, a cana-de-açúcar gera resíduos como o bagaço, a vinhaça, torta de filtros (resíduo da filtragem do caldo de cana) e a cinza do bagaço (produzida pela queima do bagaço na co-geração de energia elétrica e mecânica). Após a moagem da cana para a extração da garapa ou caldo de cana, da qual são produzidos o açúcar e álcool, é gerado um subproduto denominado bagaço da cana-de-açúcar (SILVA, 2010, p. 27), constituído por 46% de fibra, 50% de água e 4% de sólidos dissolvidos, sendo este transportado por esteiras rolantes para as caldeiras e pátios de estocagem.

A quantidade de bagaço da cana-de-açúcar produzido varia de 240 a 280 kg por tonelada de cana moída. No final do ano de 2016, o Brasil gerou cerca de 2,86 milhões de toneladas de bagaço de cana-de-açúcar. Esse resíduo pode ser utilizado nas caldeiras a vapor, gerando toda a energia necessária para as etapas de processamento da cana com uma sobra que pode variar de 0 a 10% (NOVACANA, 2017).

De acordo com a NBR 10004 (2004), os resíduos do bagaço da cana-de-açúcar podem ser classificados como resíduos de classe II – B, que corresponde a resíduos não perigosos e inertes (SANTOS et al., 2012, p. 2).

A utilização dos resíduos do bagaço da cana-de-açúcar como matéria-prima na fabricação de novos produtos pode apresentar vantagens relacionadas ao baixo custo de obtenção e a qualidade do material verde. Com a aplicação de alguns tratamentos químicos, o bagaço da cana pode exibir propriedades mecânicas melhoradas como resistência à tração, flexão, dureza e resistência ao impacto (LOH et al., 2013, p. 15).

O bagaço da cana-de-açúcar pode chegar a valores de resistência à tração na faixa de 170-290 MPa e um módulo de elasticidade na faixa de 15-19 GPa (Wirawan et al., 2011, p. 1667-1674). El-Tayeb (2008, 305 a 314) estudando o bagaço de cana chegou a valores de resistência à tração de 170-180 MPa, além de 17-19 GPa de módulo de elasticidade.

Segundo Huang et al., (2012, p. 114 a 120) e Xu et al., (2010, p. 3280 a 3286), o bagaço da cana-de-açúcar é composto por, aproximadamente, 50 % de celulose, 25% de hemicelulose e 25% de lignina.

As fibras do bagaço de cana e outras fibras naturais apresentam vantagens nas aplicações em compósitos cimentícios como reforços pelas suas propriedades térmicas, mecânicas, além dos custos. Porém, a lignina presente na fibra natural pode ser atacada pelo cimento alcalino, resultando na sua degradação, prejudicando sua função como reforço do material composto (ONÉSIPPE et al., 2010, p. 549 a 556). Mendes et al., (2015, p. 60 a 67) descrevem que as hemiceluloses junto com a lignina encapsulam e restringem à celulose em microfibrilas, provocando a degradação do bagaço. Bilba, Arsène e Ouensanga (2003, p. 91 a 96) citam que misturar o bagaço da cana bruto no cimento causam impactos negativos em função dos açúcares solúveis em água, a hemicelulose e a lignina.

Moubarik et al., (2013, p. 233 a 238) realizaram uma pesquisa que tinha como objetivo eliminar a lignina e melhorar as propriedades das fibras do bagaço da cana-de-açúcar. O bagaço foi submetido inicialmente a um tratamento com água numa temperatura de 70°C por 2 horas, objetivando eliminar a hemicelulose. Na sequência, o bagaço de cana foi colocado num reator, contendo uma solução aquosa alcalina de 15% de Hidróxido de Sódio (NaOH), onde o mesmo sofreu agitações de 250 rpm, a uma temperatura de 98 °C, durante um período de noventa minutos afim de eliminar a lignina. Por último, foi realizado um estágio de branqueamento do bagaço. Os resultados desta pesquisa mostram uma melhora de 72% no módulo de Young e 85% de aumento do módulo de flexão.

3.5 RESÍDUOS DE LÃS MINERAIS

A lã de vidro é um componente utilizado em alto fornos, constituída de finas fibras de vidro, de diâmetro aproximado de 3 a 6 µm e de comprimento variado, aglomerada por resinas sintéticas, podendo ser utilizado como isolante termo acústico (BORGES, 2007, p. 32). Para Luoto et al. (1998, p. 25 a 37) as lãs minerais são fibras amorfas formadas por silicatos, fabricadas a partir do vidro, rocha ou outro mineral, atendendo os setores da construção civil, automotivo, eletroeletrônico e outros. Possui propriedades e aplicações parecidas com a lã de rocha, onde a sua composição química pode ser vista na tabela 4 (ALVES, 2008, p. 32, SILVA, 2016, p. 49).

Tabela 4 - Composição Química do resíduo de Lã de vidro por fluorescência de raios X (FRX).

Elementos	SiO₂ (%)	Al₂O₃ (%)	Fe₂O₃ (%)	SO₃ (%)	CaO (%)	TiO₂ (%)	Outros (%)
Lã de vidro	43,7	17,6	12,0	1,30	19,7	2,6	2,9
Lã de rocha	53,5	-	17,1	1,60	22,5	2,9	2,3

Fonte: Silva (2016).

O vidro fundido de carbonato de sódio (Na₂CO₃) e cal (CaO) é o material que dá origem a lã de vidro. Tem como principal matéria-prima o vidro borossilicato (fabricado através da adição de boro (B) aos componentes tradicionais do vidro) e outros componentes utilizados para obtenção de características específicas (ALVES, 2008, p. 33). Pode ser encontrada em produtos como:

Elementos cilíndricos bipartidos de lã de vidro e aglomerados com resinas sintéticas;

- Painéis leves, rígidos e/ou semi-rígidos e incombustíveis;
- Lã de vidro branca isenta de resinas aglomerantes (BORGES, 2007, p. 35).

A lã de vidro também perde as propriedades de isolante térmico, transformando-se em um resíduo industrial. Por ser um resíduo volumoso e apresentar geração constante nas indústrias, os resíduos de lã de vidro são depositados aterros sanitários e industriais (BORGES, 2007, p. 18).

Conforme NBR 10004 (2004), os resíduos da lã de vidro e rocha podem ser classificados como resíduos de classe II – A, que corresponde a resíduos não perigosos e não inertes. Desta forma, sem restrições, estes resíduos podem ser destinados para a reciclagem (ISOVER, 2007).

Cheng et al., (2011, p. 636) descrevem um outro tipo de lã mineral utilizada como isolantes térmico e acústico chamada de lã de rocha. A lã de rocha é uma substância fibrosa inorgânica produzida por jateamento a vapor e resfriamento de vidro fundido, utilizada em isolamentos acústico, proteção contra fogo, reforço de cimento, isolamento de tubos e solo sintético para plantas em crescimento. Em Taiwan, anualmente mais de 100 milhões de toneladas de resíduos de lã de rocha são gerados.

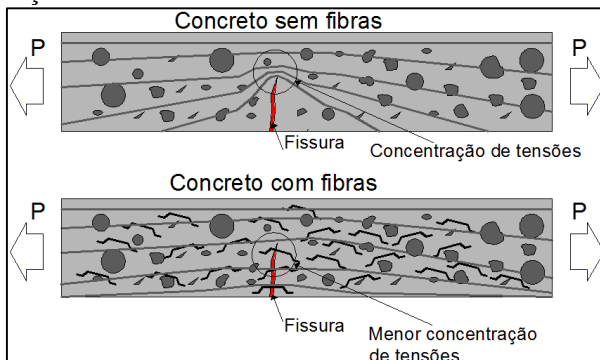
3.6 CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS

Segundo Shackelford (2008, p. 315) os materiais compósitos consistem na combinação de dois ou mais componentes classificados como materiais cerâmicos, poliméricos ou metálicos. O concreto é um exemplo de material compósito agregado, já que tanto a brita quanto a areia reforçam uma matriz cimento-silicato. Os compósitos estruturais podem ser reforçados através do uso de fibras, que suportam carregamentos mecânicos (LEVY NETO; PARDINI, 2006, p. 59).

As fibras adicionadas numa matriz de concreto poderão servir como ponte de transferência de tensões pelas fissuras, concentrando as tensões nas suas extremidades. Assim, a velocidade de propagação das fissuras no compósito é reduzida, resultando num comportamento pseudo-dúctil ou não frágil (PASSUELO et al., 2011, p. 1332).

Segundo Zhan e Meschke (2013, p. 10 a 14), a aplicação de fibras no concreto pode aumentar a capacidade do mesmo em resistir a fendas de tração e melhorar a absorção de energia do concreto. Lee, Cho e Choi, (2017, p. 222 a 231) avaliaram a resistência de flexão de concretos com a adição de 0,25, 0,375 e 0,50% de fibras de aço. Como resultado obtiveram valores médios de 4,81 MPa, 5,66 MPa e 6,81 MPa, respectivamente, de resistência à flexão, concluindo, neste caso, que os maiores resultados de resistência de flexão foram obtidos com as maiores porcentagens de adições de fibras de aço. Os autores explicam que este ganho de resistência tem origem no aumento dos obstáculos gerados pela fibra na propagação de fissuras, resultando numa menor concentração de tensões, como pode ser visto na figura 9.

Figura 9 - Esquema de concentração de tensões para um concreto sem e com o reforço de fibras.



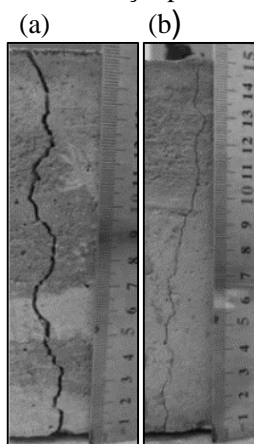
Fonte: Figueiredo (2011).

O comprimento da fibra deve ser igual ou superior ao dobro da dimensão máxima característica do agregado utilizado no concreto. Essa compatibilidade dimensional, permite a interceptar com maior frequência a fissura que ocorre no compósito, em relação as fibras com comprimento inferior a dimensão máxima característica do agregado. A fratura tende a se propagar na região de interface entre o agregado graúdo e a pasta do concreto (PASSUELO et al., 2011, p. 1336).

Pelisser et al., (2010, p. 2171 a 2176) estudaram o comprimento das rachaduras em argamassas, utilizando fibras de polipropileno, vidro, PET e nylon. Essas fibras foram adicionadas nas misturas variando seus teores de 0,05% a 0,10%. As argamassas foram lançadas em moldes afim de formar superfícies de 910 mm x 610 mm. Após 40 dias da produção das amostras, os resultados da pesquisa apontam que argamassas com 0,10% de adição de fibras de polipropileno, obtiveram os menores valores de comprimento de rachaduras, com aproximadamente 52 mm.

Yousefieh et al., (2017, p. 833 a 845) estudaram a influência das fibras no encolhimento de secagem do concreto. Neste estudo, os pesquisadores tiveram como resultados a redução de fissuração em 26% para os concretos com teores de fibras de aço, poliolefina e polipropileno na ordem de 0,1%, em relação aos concretos produzidos sem teores de fibras. A figura 10 apresenta as fissurações dos concretos produzidos neste estudo, (a) sem adição de fibras e (b) com adição das fibras.

Figura 10 - Imagem do concreto fissurado (a) sem adição de fibras e (b) com 0,1 % de adições de fibras de aço, poliolefina e polipropileno.



Fonte: Yousefieh et al. (2017).

Abrishambaf, Pimentel e Nunes, (2017, p. 28 a 40) investigaram a influência da orientação das fibras na ductilidade de compósitos de cimento reforçados com fibras de aço de ultra performance, com resistência de tração de 2.100 MPa. Foram produzidos concretos contendo 1,5% e 3,0% de adição de fibras, lançadas sem orientação, a 0° e 90° em relação ao eixo longitudinal das amostras. Após 3 dias de cura, os resultados mostraram que a orientação das fibras influenciou na ductilidade do composto cimentício. Com 3,0% de adição de fibras de aço, as amostras com orientações de 0°, 90° e sem orientação em relação ao eixo longitudinal da amostra, obtiveram resultados de alongamento de 0,47%, 0,13% e 0,23%, respectivamente.

As adições de fibras no concreto também podem trazer prejuízos para a trabalhabilidade para o mesmo no seu estado fresco, em função de sua área superficial fazer contato com os demais materiais constituintes durante a mistura, restringindo a mobilidade e fluidez. Tal situação pode trazer prejuízos ao processo de compactação, resistência mecânica e durabilidade do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014, p. 561).

3.7 CONCRETO REFORÇADO COM FIBRAS NATURAIS

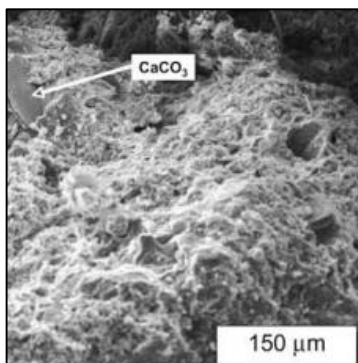
A aplicação de fibras naturais na ciência dos compósitos e na engenharia genética, pode contribuir para o desenvolvimento de materiais com propriedades obtidas com a utilização desses recursos renováveis, auxiliando na sustentabilidade global (CHEUNG, 2009, p. 655 a 663; JAWAID e KHALIL, 2011, p. 1 a 18; HOSSAIN et al., 2014, p. 78 a 90).

Razmi e Mirsayar (2017, p. 512 a 520) estudaram as influências das resistências à compressão e tração na flexão dos concretos com a adição de fibras de juta. Foram produzidos concretos sem adição de fibras e concretos com 0,1%, 0,3% e 0,5% de adição de fibras de juta. Aos 7 e 28 dias, os concretos com 0,5% de adições de fibras de juta obtiveram os melhores resultados de resistência à compressão e tração na flexão. Com esta adição, aos sete dias os valores médios de resistência à compressão e tração na flexão foram de 49,15 MPa e 6,48 MPa, respectivamente. Já aos 28 dias, este mesmo obteve valores médios de resistência à compressão e tração na flexão de 56 MPa e 7,38 MPa, respectivamente. Os pesquisadores justificam tais resultados na capacidade das fibras em restringir o crescimento e atrasar o surgimento das rachaduras, além de reduzir a concentração de tensão nas regiões reforçadas com a fibra.

A adição de fibras do bagaço ao cimento pode diminuir a condutividade térmica de 0,62 W / m.K a 0,46 W / m.K. A afirmação está baseada em resultados obtidos de uma pesquisa realizada por Onésippe et

al., (2010, p. 549 à 556), onde tais resultados foram obtidos para 3,0% de adição em peso do bagaço tratado, em relação ao composto de cimento. Foram produzidas amostras com 0,0%, 1,5% e 3,0% de adições de fibras de bagaço. Os ensaios foram realizados após 365 dias de idade. A figura 11 apresenta uma imagem de microscopia eletrônica de varredura (MEV) do composto de cimento com 3,0% de adições de fibras do bagaço.

Figura 11 - Imagem do Microscópio Eletrônico de Varredura (ampliação de 200X) do composto de cimento com 3,0% de adição de fibras do bagaço.



Fonte: Onésippe et al. (2010).

Os fragmentos de CaCO_3 identificados na figura 11 contribuem para o empacotamento com as superfícies das fibras, fazendo com que essas percam contato com a matriz cimentícia, provocando perdas de calor específico (ONÉSIPPE et al., 2010, p. 549 a 556).

Segundo pesquisa realizada por Tian e Zhang (2016, p. 237 a 250), os valores de resistência de compressão, módulo de Young, dureza e resistência à tração dos compósitos cimentícios tendem a diminuir com o aumento do teor de fibras do bagaço de cana-de-açúcar de 3% para 8% e 12%. Os pesquisadores explicam que esses resultados se devem ao aumento da porosidade da matriz cimentícia criada com o aumento do teor das fibras.

Segundo pesquisa realizada por Oliveira, Gouveia e Teixeira (2014, p. 1 a 6), concretos com a adição de 5% de fibras de cana-de-açúcar apresentaram resultados de resistência de tração na flexão superiores aos concretos de mesma composição sem adição de fibras, com adição de 2% de fibras de cana-de-açúcar, com a adição de 2% e 5% de fibras de bambu. O valor médio de resistência à tração na flexão dos concretos com adição

de 5,0% de fibras do bagaço de cana foi de 5,8 MPa, enquanto os concretos sem adição de fibras apresentou o valor médio de 1,67 MPa.

Silva (2010, p. 72 a 124) realizou uma pesquisa utilizando fibras de bagaço de cana-de-açúcar em argamassas cimentícias. Foram moldados corpos-de-prova e realizados ensaios mecânicos de compressão simples e tração na compressão diametral aos 7 e 28 dias. Os traços utilizados para moldar os corpos-de-prova foram na proporção 1: x: 3,7: 0,57, que corresponde a cimento: fibra de bagaço de cana: areia: água, sendo que o teor de fibras (x) variou de 0, 1,5% e 3%. Em relação aos ensaios de resistência à compressão simples, o corpo-de-prova curado no tanque submerso de água, com adições de 3,0% fibras tratadas, rompidas aos 28 dias apresentaram a maior resistência, com um resultado médio de 21,9 MPa. Quanto aos ensaios de tração na compressão diametral, o corpo-de-prova com 3% de adição de fibras do bagaço de cana-de-açúcar, rompido aos 28 dias, apresentou o maior resultado médio, de 3,37 MPa.

Pellegrin (2016, p. 22 a 91), em seu trabalho, produziu corpos-de-prova de pastas de cimento CP-II F 32 MPa com relação água/cimento de 0,48. Os corpos-de-prova moldados tiveram 0%, 0,25%, 0,375% e 0,50% de adições de fibras do bagaço de cana-de-açúcar. Para os ensaios de compressão simples, o corpo-de-prova sem adições de fibras rompido aos 28 dias, apresentou o maior resultado médio, de 32,57 MPa. Quanto aos ensaios de flexão, o corpo-de-prova com 0,50% de adições de fibras de bagaço da cana-de-açúcar, com comprimento de fibra de 20 mm, rompido aos 28 dias, apresentou o maior resultado, com um valor médio de 7,46 MPa. Ensaios para determinação do módulo de elasticidade dos corpos-de-prova também foram realizados, onde o corpo-de-prova moldado com 0,25% de adições de fibras do bagaço de cana-de-açúcar, com comprimento de 20 mm, apresentou o maior resultado, com um valor médio de 22,96 GPa. A figura 12 apresenta uma imagem obtida por microscópio eletrônico de varredura da estrutura interna da argamassa produzida, com a fibra do bagaço orientada paralelamente ao comprimento da amostra.

Figura 12 - Microscopia óptica do compósito reforçado com a fibra do bagaço da cana, no sentido paralelo ao comprimento da amostra.



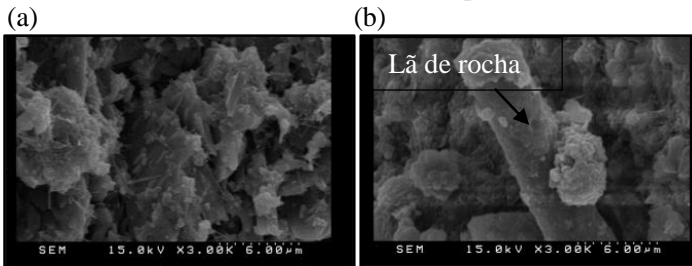
Fonte: Pellegrin (2016).

Nota-se a inexistência de espaços vazios aparentes entre a fibra e a argamassa. Percebe-se ainda, que após os processos de preparo e cura da amostra, a fibra não sofre modificações aparentes. Neste estudo, o pesquisador tratou as fibras do bagaço de cana em soluções de NaOH (PELLEGRIN, 2016, p. 75).

3.8 CONCRETO REFORÇADO COM LÃS MINERAIS

Lin et al., (2013, p. 1 a 9) investigaram a microestrutura de amostras de argamassas produzidas à base de cimento, com inclusões de lã de rocha moída. Neste estudo foi possível perceber que aos 91 dias a resistência à compressão da argamassa foi maior (38,96 MPa) nas amostras contendo 40% de teores de lã de rocha moída, em substituição do cimento. Por outro lado, as argamassas sem teores de lã de rocha chegaram a valores médios de resistência à compressão de 32,76 MPa aos 91 dias. A melhora no desempenho das argamassas com teores de 40% de lã de rocha moída na sua composição pode ser visualizada micro estruturalmente. Na figura 13(a), a adição de lã de rocha moída levou à formação de menores poros capilares, reduzindo a interconectividade destes, promovendo uma ponte contra as rachaduras e um bloqueio dos poros capilares. A imagem apresentada na figura 13(b) mostra a morfologia da superfície da lã de rocha com a reação de hidratação.

Figura 13 - Imagem das amostras das argamassas aos 91 dias (a) sem lâ de rocha e (b) com 40% de lâ de rocha na composição.



Fonte: Lin et al. (2013).

Borges (2007, p. 96 a 105) em seu trabalho estudou o comportamento mecânico dos concretos com adições de lâ de vidro moída. Além do concreto de referência, sem adições de lâ de vidro moída, foram estudados concretos com 2,5%, 5,0%, 7,5%, e 10,0% de lâ de vidro moída em sua composição, inseridas na forma de adição e substituição do cimento. Neste estudo foi observado que os concretos com adições de 10% de resíduos da lâ de vidro moída apresentaram um módulo de elasticidade de 27,5 GPa aos 28 dias. Para a mesma idade, os concretos sem lâ de vidro moída apresentaram um módulo de elasticidade médio de 22,7 GPa. Além disso, ensaios de consistência dos concretos no estado fresco também foram realizados. Os concretos produzidos com a adição de 10,0% de lâ de vidro moída apresentaram um valor de consistência de 195 mm. Os concretos sem teores de lâ de vidro moída apresentaram um valor de consistência de 35 mm.

Lu, Duan e Poon (2017, p. 34 a 44) realizaram uma pesquisa utilizando resíduos de vidro em pó na proporção de 20,0% em substituição ao cimento. Argamassas sem teores de pó de vidro também foram produzidas para efeito de comparação. Ensaio de compressão e tração na flexão foram realizados com as amostras produzidas nas idades de 7, 28 e 90 dias. O melhor resultado de resistência à compressão foi obtido com as amostras contendo 20,0% de pó de vidro apresentando valores de 65,0 MPa aos 90 dias. Quanto aos resultados de resistência de tração na flexão o melhor resultado também foi obtido com amostras contendo 20,0% de pó de vidro aos 90 dias. O valor médio obtido se aproximou de 11,0 MPa. Os pesquisadores justificam tais resultados, relacionando-os com o aumento da densidade e diminuição dos poros nas argamassas contendo teores de pó de vidro em sua composição.

4 METODOLOGIA

Conforme a tabela 5, as atividades desenvolvidas nesta pesquisa foram organizadas em quatro etapas: obtenção das matérias-primas; preparação e caracterização das matérias-primas, produção dos concretos e realização dos ensaios dos concretos.

Tabela 5 - Etapas da pesquisa e atividades a serem desenvolvidas em cada etapa.

Etapas	Atividades
Obtenção das matérias-primas	-Obtenção: cimento, areia grossa, areia fina, brita nº 0, resíduos do bagaço da cana-de-açúcar e lã de vidro;
Preparação e caracterização das matérias-primas	-Preparação dos resíduos: moagem do bagaço da cana-de-açúcar, lã de vidro e o tratamento químico do bagaço da cana-de-açúcar; -Caracterização: física (granulometria); química (Fluorescência de Raios-X (FRX)); morfológica (Microscopia eletrônica de varredura (MEV)); além da Termogravimetria (TG) e Difração de Raios-X (DRX);
Produção dos concretos	-Mistura dos experimentos: dosagem e procedimentos de misturas; -Preparo dos experimentos: moldagem das amostras e processos de cura.
Ensaio dos concretos	- Ensaio no estado fresco: consistência do concreto por abatimento com tronco de cone; - Ensaio no estado endurecido: mecânico (resistência à compressão, tração na flexão, tração por compressão diametral, módulo de elasticidade); térmico (determinação do coeficiente de expansão térmica linear); além dos ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica aparente seca; morfológico (microscopia eletrônica de varredura (MEV) e microscopia óptica).

Fonte: Do autor (2018).

4.1 OBTENÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

Os materiais utilizados na realização dos experimentos de concreto foram obtidos por meio de fornecedores locais e empresas geradoras dos resíduos do bagaço da cana-de-açúcar e lã de vidro.

O cimento utilizado foi o CP II Z – 40 MPa. Os agregados miúdos utilizados foram as areias do tipo fina e grossa. Já os agregados graúdos foram os graníticos de nº 0.

Os resíduos do bagaço de cana-de-açúcar foram coletados de uma lanchonete localizada no município de Urussanga – SC, que semanalmente gera cerca 200 kg do resíduo, originada da moagem da cana-de-açúcar para a produção do caldo de cana. Foram coletados aproximadamente 14 kg de bagaço de cana-de-açúcar. A figura 14 apresenta uma imagem do resíduo do bagaço estocado após moagem.

Figura 14 - Resíduo do bagaço da cana-de-açúcar estocado após moagem da lanchonete localizada em Urussanga de onde o resíduo foi extraído.



Fonte: Do autor (2018).

Os resíduos da lã de vidro foram coletados de uma empresa que presta serviços de manutenção de refrigeradores localizada no município de Sangão (SC). Foram coletados aproximadamente 20 kg do material. As figuras 15 (a) e (b) apresentam, respectivamente, a estrutura interna de um refrigerador sucateado de onde a lã de vidro foi retirada e a lã de vidro coletada na forma de resíduo.

Figura 15 - (a) Estrutura interna do refrigerador sucateado após a retirada da lã de vidro e (b) resíduo da lã de vidro após retirada do refrigerador sucateado.



Fonte: Do autor (2018).

4.2 PREPARAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

As atividades de preparação dos resíduos são essenciais para que se obtenha o comportamento esperado dos mesmos inseridos nos concretos. Essas atividades consistem basicamente na moagem dos resíduos do bagaço da cana-de-açúcar, da lã de vidro e no tratamento químico do bagaço de cana-de-açúcar. A moagem dos resíduos do bagaço da cana-de-açúcar foi realizada numa propriedade rural localizada no município de Tubarão (SC). Já o tratamento químico dos bagaços da cana-de-açúcar e a moagem das amostras de lã de vidro foram realizadas no Iparque – Instituto de Engenharia e Tecnologia da UNESC.

4.2.1 Moagem dos bagaços da cana-de-açúcar

Após duas horas da coleta dos bagaços da cana-de-açúcar da fonte geradora do resíduo, os mesmos foram submetidos a uma lavagem inicial com água corrente, afim de eliminar as impurezas superficiais, conforme apresentado na figura 16.

Figura 16 - Lavagem com água corrente dos resíduos dos bagaços de cana-de-açúcar.



Fonte: Do autor (2018).

A lavagem inicial do bagaço da cana-de-açúcar foi realizada em processos sucessivos de renovação da água, até o momento em que a água usada na lavagem permanecesse transparente e sem as espumas existentes do caldo da cana retido no resíduo. Após a lavagem inicial, todo o resíduo foi armazenado em local coberto, posicionado em assoalho de madeira protegidos por lona plástica preta, conforme apresentado na figura 17.

Figura 17 - Bagaço da cana-de-açúcar armazenado em local coberto após lavagem inicial.



Fonte: Do autor (2018).

O bagaço da cana-de-açúcar ficou estocado durante 15 dias, afim de garantir a sua secagem para, na sequência, promover a moagem.

Após a lavagem inicial e secagem do bagaço da cana-de-açúcar, a mesma foi submetida ao processo de moagem, afim de se obter os bagaços no formato de fibra. Para a realização deste procedimento, foi utilizado um triturador de marca Trapp, modelo TRF 400 com motor de

2,0 cv, 60 Hz e 220 Volts. Para a moagem, foi utilizada a peneira 12,0 mm. As figuras 18 (a) e (b) apresentam, respectivamente, o sistema de facas que formam o triturador e amostras dos bagaços da cana pós moagem.

Figura 18 - (a) Sistema de facas do triturador e (b) amostras dos bagaços da cana-de-açúcar pós moagem.



Fonte: Do autor (2018).

Após o processo de moagem, o resíduo do bagaço de cana foi armazenado em sacos plásticos até o momento do início do tratamento químico.

4.2.2 Tratamento químico do bagaço de cana-de-açúcar

O objetivo do tratamento químico do bagaço da cana-de-açúcar foi de evitar sua degradação com o ataque do cimento e melhorar suas propriedades como módulo de Young e módulo de flexão. Esse tratamento foi feito em duas etapas.

Na primeira etapa, foi feita a lavagem com água por 2 horas a uma temperatura de 70°C, numa proporção de 1:10 (bagaço da cana-de-açúcar: água). Após a lavagem, os resíduos do bagaço da cana-de-açúcar foram armazenados em estufa coberta, espalhadas no chão, protegidas por britas e lona plástica preta do contato com o solo, até o momento do tratamento

químico. A figura 19 apresenta o resíduo armazenado após a etapa de lavagem.

Figura 19 - Resíduos do bagaço da cana-de-açúcar moído armazenados na estufa antes do tratamento químico.



Fonte: Do autor (2018).

Na segunda etapa foi realizado o tratamento químico do bagaço de cana-de-açúcar. Seguindo os procedimentos descritos por Moubarik et al., (2013, p. 233 a 238), foram utilizados um recipiente metálico de 200 litros preenchidos com uma solução d'água contendo 15,0% de Hidróxido de Sódio (NaOH) com pureza de 99,0%, aquecidas até a temperatura de 98°C. Essa temperatura foi obtida e mantida através de um sistema de aquecimento gerado pela combustão do gás canalizado nos fundos do recipiente metálico, que estava apoiado por blocos refratários que garantiam o confinamento do fogo. Foi utilizada uma proporção de 1:10 (bagaço da cana: solução d'água com NaOH). O resíduo do bagaço da cana-de-açúcar foi colocado no recipiente com a solução e agitado manualmente com haste de madeira durante um período de 90 minutos. As figuras 20 (a) e (b) apresentam, respectivamente, o sistema de aquecimento da solução química e o resíduo durante o tratamento químico.

Figura 20 - (a) Sistema de aquecimento da solução química formada pelo recipiente metálico de 200 litros, blocos refratários e sistema de gás canalizado e (b) resíduos do bagaço da cana-de-açúcar durante o tratamento químico.



Fonte: Do autor (2018).

Após o tratamento químico, o bagaço da cana-de-açúcar foi lavado com água corrente e retirado o excesso de água manualmente. Em seguida, o resíduo foi espalhado novamente na estufa coberta para a secagem, sobre as lonas plásticas, permanecendo neste ambiente durante 7 dias. Ao final do procedimento, foi possível concluir que o bagaço da cana-de-açúcar após tratamento químico obteve uma perda de massa de 72%, já que a massa inicial da amostra tratada era de 10 kg e a amostra final após tratamento resultou em 2,8 kg.

4.2.3 Moagem da lâ de vidro

O objetivo da moagem da lâ de vidro é pulverizar a mesma, afim de que tenha condições de preencher possíveis poros existentes na mistura dos concretos, além de promover a reação química com a pasta de cimento, formando novas fases de silicato de cálcio hidratado ($\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$). Esta etapa de moagem foi realizada no laboratório LABVALORA, utilizando o moinho de bolas da marca Furlan, modelo MB6595C. O procedimento de moagem durou 4 horas. As figuras 21 (a) e (b)

apresentam, respectivamente, a lâ de vidro pós moagem dentro do moinho e a lâ de vidro moída sobre a mesa.

Figura 21 - Imagem do resíduo da lâ de vidro (a) no processo de moagem e (b) após moagem.



Fonte: Do autor (2018).

4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

Foram investigadas as características físicas, químicas e morfológicas dos materiais que constituirão os concretos desenvolvidos neste trabalho. Todos esses ensaios, com exceção da Fluorescência de Raios-X (FRX), foram realizados no Iparque – Instituto de Engenharia e Tecnologia da UNESC. A Fluorescência de Raios-X (FRX) foi realizada na empresa Colorminas Colorifício e Mineração S/A.

4.3.1 Distribuição granulométrica

O ensaio físico de distribuição granulométrica tem como objetivo obter porcentagem média retida acumulada em cada peneira do ensaio, a dimensão máxima característica e o módulo de finura dos agregados miúdos e graúdo. Essas características deverão situar entre os limites inferiores e superiores da zona ótima especificada, contribuindo para a

compactação do concreto produzido (espaços vazios preenchidos), influenciando nas propriedades do mesmo (NBR 7211, 2009, p. 4 e 5).

Os ensaios de distribuição granulométrica dos agregados miúdos e gráudo foram realizados no laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do IDT, respeitando os procedimentos padronizados pela NBR NM 248 (2003, p. 1 a 14).

As amostras utilizadas dos agregados para a realização do ensaio foram de 1.000 gramas.

Foram utilizados fundo avulso de peneira, pincel, bandejas, além do conjunto de peneiras normal e intermediária, da marca SOLOTEST. A tabela 6 apresenta as malhas das peneiras utilizadas no ensaio.

Tabela 6 - Série de peneiras normal e intermediária que será utilizada nos testes de análise granulométrica.

Série Normal	Série Intermediária
75 mm	-
-	63 mm
-	50 mm
37,5 mm	31,5 mm
--	25 mm
--	-
19 mm	12,5 mm
-	-
9,5 mm	6,3 mm
-	-
4,75 mm	-
2,36 mm	-
1,18 mm	-
0,60 mm	-
0,30 mm	-
0,15 mm	-

Fonte: NBR NM 248 (2003) (adaptado pelo autor).

Outros equipamentos também foram utilizados como uma balança de massa da marca PIZZOLO, modelo AC10K de 0,1% de resolução, com capacidade para 10.000 gramas e a estufa da marca MARCONI modelo MA035/1152 840 Watts, utilizada para a secagem dos agregados. Essa secagem foi realizada durante um período de 24 horas a uma temperatura de $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$. A figura 22 mostra os agregados submetidos na estufa para o processo de secagem.

Figura 22 - Agregados miúdos e graúdo submetidos a estufa para o processo de secagem.



Fonte: Do autor (2018).

Para a obtenção dos resultados esperados do ensaio de distribuição granulométrica foram necessários calcular a porcentagem retida (%), porcentagem acumulada (%), módulo de finura e diâmetro máximo do agregado (mm), além de determinar a massa de material retido (g) medindo a massa (g) retida em cada peneira. A porcentagem retida (%retida) foi calculada de acordo com a equação 5.

$$\%retida = \frac{m_{retida \text{ em cada peneira}}}{m_{total \text{ da amostra}}} * 100 \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

$m_{retida \text{ em cada peneira}}$ = Massa retida em cada peneira utilizada no ensaio;
 $m_{total \text{ da amostra}}$ = Massa total da amostra coletada para a realização do ensaio.

Já o módulo de finura (mf) foi calculado através da equação 6.

$$mf = \frac{\Sigma \% \text{ acumuladas das peneiras série normal}}{100} \quad \text{Equação 6}$$

Por último, o diâmetro máximo do agregado (mm) corresponde a malha da peneira da série normal ou intermediária onde o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5,0% em massa (NBR NM 248, 2003, p. 2).

Os resíduos da lã de vidro moída tiveram sua granulometria caracterizada através do método de granulometria a laser. As amostras foram submetidas a um analisador de partículas a laser via úmida, modelo CILAS 1064 Líquido, utilizando Poliacrilato de Sódio como agente dispersante, tendo água como meio líquido, numa faixa analítica de 0,04 - 500µm/100 Classes. Esse ensaio foi realizado no Laboratório de Caracterização.

4.3.2 Fluorescência de raios-X (FRX)

A análise de fluorescência de raio X por Dispersão de Comprimento de Onda (WDXRF) foi realizada com o objetivo de obter a análise química quantitativa da lã de vidro. Este ensaio foi realizado no laboratório de pesquisa e inovação tecnológica utilizando um Espectrômetro de Raios X.

4.3.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A análise via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi realizada nas amostras de lã de vidro moída e bagaço de cana-de-açúcar após tratamento químico afim de verificar suas morfologias antes de serem empregadas no concreto. O microscópio eletrônico de varredura utilizado é da marca ZEISS, modelo EVO MA10. O mesmo possui uma microsonda EDAX para análise espectrométrica de raios-X e também câmera EBSD (*Electron Backscattered Diffraction*) para difração de elétrons retro-espalhados.

As amostras de lã de vidro moída e bagaço de cana-de-açúcar não receberam nenhum preparo específico para a análise do MEV.

4.3.4 Termogravimetria (TG)

O ensaio de termogravimetria (TG) foi realizado afim de avaliar o comportamento térmico de cada amostra submetida a uma mudança controlada da temperatura. Foi realizado nas amostras de concreto, da lã de vidro moída e do bagaço de cana-de-açúcar após tratamento químico. Utilizou-se a técnica de análise térmica diferencial (DTA) para a

realização deste ensaio pelo equipamento SDT Q 600, da marca NETZSCH, modelo STA 449F3 JUPITER, localizado no laboratório de valorização de resíduos (LABVALORA). Quanto aos procedimentos, foi utilizada uma taxa de aquecimento de 10 °C/min, variando a temperatura desde a ambiente até 1.100°C, aplicando gás nitrogênio com vazão de 60 mL/min. As amostras foram moídas num tamanho passante na peneira de malha de 0,075 mm.

4.3.5 Difração de raios-X (DRX)

A análise de difração de raios-X (DRX) foi realizada em amostras da lã de vidro moída afim de verificar as fases cristalinas existentes. Foi utilizado o difratômetro de raios X da marca SHIMADZU, modelo XRD 6.000, com radiação $\text{CuK}\alpha$ de 1,5418 Å, voltagem de 30 kV e corrente elétrica de 30 mA. O filtro utilizado será de níquel, leitura entre 3° e 80° (2 θ) e velocidade de 2°/min. Esse ensaio foi realizado na Sala de Caracterização de Materiais (CECAM).

4.4 MISTURA DOS EXPERIMENTOS

As misturas dos experimentos seguiram padrões de dosagens e misturas para a obtenção dos concretos. Todas atividades utilizadas nesta etapa foram realizadas no Iparque – Parque Tecnológico da UNESC.

4.4.1 Dosagem dos concretos

As misturas dos concretos produzidos nesta pesquisa foram dosadas e intituladas conforme apresentado na tabela 7. Os títulos dos concretos foram descritos na forma de siglas, onde C_{ref} refere-se ao concreto de referência, $C_{bc3,0}$ refere-se aos concretos com adição de 3,0% de fibras do bagaço da cana-de-açúcar, $C_{lv10,0}$ refere-se aos concretos com adição de 10,0% de lã de vidro moída, $C_{bc3,0lv10,0}$ refere-se aos concretos com adições de 3,0% de fibras do bagaço da cana-de-açúcar e 10,0% de lã de vidro moída e o $C_{bc1,5lv5,0}$ refere-se aos concretos com adições de 1,5% de fibras do bagaço da cana-de-açúcar e 5,0% de lã de vidro moída.

Tabela 7 - Tipos de concreto a produzir, com seus materiais constituintes e quantidades para a produção do volume de concreto necessário para moldar a quantidade de corpos-de-prova necessárias para os ensaios mecânicos e do coeficiente de expansão térmica linear.

Dosagens dos concretos						
Tipo de concreto	Cimento CP II Z-40 MPa (kg)	Brita n° 0 (kg)	Areia grossa (kg)	Areia fina (kg)	Fibras do bagaço da cana (kg)	Lã de vidro moída (kg)
C_{ref}	24,6	75,44	41,00	27,88	-	-
$C_{bc3,0}$	24,6	75,44	41,00	27,88	0,738	-
$C_{lv10,0}$	24,6	75,44	41,00	27,88	-	2,46
$C_{bc3,0lv10,0}$	24,6	75,44	41,00	27,88	0,738	2,46
$C_{bc1,5lv5,0}$	24,6	75,44	41,00	27,88	0,369	1,23
$C_{bc1,5lv5,0}$	24,6	75,44	41,00	27,88	0,369	1,23

Fonte: Do autor (2018).

A dosagem do concreto de referência (C_{ref}) descrita na tabela 6 refere-se a uma dosagem padrão para concretos de resistência característica à compressão aos 28 dias (f_{ck28}) de 30 MPa, consistência por abatimento (*slump test*) 100 ± 20 mm, produzidos por uma empresa produtora e fornecedora de concretos que atua na região Sul Catarinense e em duas cidades do Rio Grande do Sul.

A porcentagem de adição das fibras do bagaço da cana-de-açúcar foram determinadas com base na pesquisa de Onésippe et al., (2010, p. 549 à 556), onde com a adição de 3,0% de bagaço de cana-de-açúcar tratado no composto de cimento, a condutividade térmica de composto diminuiu de 0,62 W/m.K a 0,46 W/m.K.

Para a confecção de concretos contendo lã de vidro moída, foram adicionados teores de 10,0% de lã de vidro moída na formulação do concreto, determinadas com base na pesquisa de Borges (2007, p. 96 a 105), onde com 10,0% de adição de lã de vidro foi obtido um módulo de elasticidade médio de 27,5 GPa aos 28 dias, sendo superior ao módulo de elasticidade médio do concreto de referência de seu estudo (22,7 GPa). Também foram elaborados concretos contendo a adição de fibras do bagaço da cana-de-açúcar e lã de vidro moída. Os concretos $C_{bc1,5lv5,0}$ foram elaborados para representar os pontos centrais do planejamento estatístico (duas repetições que representam dois graus de liberdade do ponto central do planejamento estatístico).

4.4.2 Mistura dos concretos

A mistura dos concretos foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC). A mistura dos insumos que constituíram os concretos foi realizada utilizando uma betoneira elétrica de 220 Volts monofásica da marca Horbach, com capacidade de 400 litros. Os materiais dosados foram pesados utilizando uma balança semi analítica da marca PIZZOLO, modelo AC10K. A sequência de adição das matérias-primas na betoneira e o tempo de mistura foi desenvolvida com base nas recomendações de Helene e Terzian (1992, p. 244). Inicialmente foi adicionada na betoneira 100% da quantidade de brita nº 0 e 50% da quantidade de água, promovendo a mistura por 1 minuto. Após 1 minuto, com a betoneira em operação, foi adicionado 50% da quantidade de areia grossa, 50% da quantidade de área fina, 100% da massa de cimento, 50% da massa restante das areias grossa e fina, 50% das quantidades restantes de água e 100% das quantidades da lã de vidro moída e bagaços de cana-de-açúcar lançados aleatoriamente quando estes fizeram parte da composição. Após a adição destes materiais, o processo final de mistura dos mesmos durou de 2 a 4 minutos.

4.5 MOLDAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA

As atividades de preparo dos experimentos envolveram a moldagem dos concretos nos moldes para a realização dos ensaios de absorção de água, de resistência à compressão, tração na flexão, tração por compressão diametral, módulo de elasticidade, determinação do coeficiente de expansão térmica linear, além das microscopias óptica, eletrônica de varredura (MEV) e ensaio de termogravimetria (TG). Os processos de cura também fizeram parte das atividades de preparo dos experimentos. Todas essas atividades foram realizadas no Iparque – Instituto de Engenharia e Tecnologia da UNESC, no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC). A tabela 8 apresenta a quantidade dos experimentos (corpos-de-prova) que foram produzidos para cada ensaio realizado em suas respectivas idades.

Tabela 8 - Quantidades de corpos-de-prova a serem produzidos para cada ensaio.

Ensaio	Idade (dias)	Quantidades de corpos-de-prova				
		C _{ref}	C _{bc3,0}	C _{lv10}	C _{bc3,0lv10}	C _{bc1,5lv5,0} (***)
Absorção de água (%), índice de vazios (%) e absorção de água (g/cm ³) (*)	56	-	-	-	-	-
Resistência à compressão (MPa)	7	5	5	5	5	10
	28	5	5	5	5	10
	56	5	5	5	5	10
Resistência à tração na flexão (MPa)	56	5	5	5	5	10
Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	56	5	5	5	5	10
Módulo de elasticidade (GPa)	56	5	5	5	5	10
Coefficiente de expansão térmica linear (mm/°C)	56	3	3	3	3	6
Microscopia óptica e TG (**)	56	-	-	-	-	-

(*) Ensaio não destrutivo, realizado com as amostras produzidas para os ensaios de tração por compressão diametral; (**) Análises realizadas com os corpos-de-prova fraturados após a realização dos ensaios mecânicos; (***) Quantidades dobradas de corpos-de-prova em função do tratamento estatístico com 2 graus de liberdade para o ponto central do planejamento estatístico.

Fonte: Do autor (2018).

4.5.1 Preparo dos corpos-de-prova para os ensaios de resistência à compressão

Os procedimentos de moldagem e cura dos corpos-de-prova de concreto para os ensaios de compressão seguiram os padrões definidos pela NBR 5738 (2015, p. 1 a 13). Foram utilizados moldes metálicos cilíndricos de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura. O adensamento ocorreu de forma manual por meio de hastes metálicas de 16 mm de diâmetro por 600 mm de comprimento. Nas primeiras 24 horas após a moldagem, os corpos-de-prova foram armazenados em locais protegidos de intempéries. Em seguida, foram armazenados em tanques submersos de água a uma temperatura de 23 ± 2 °C, durante seus correspondentes períodos de cura, que foram de 7, 28 e 56 dias. A figura 23 apresenta os corpos-de-prova cilíndricos moldados para os ensaios mecânicos de compressão e os corpos-de-prova prismáticos moldados para os ensaios de tração na flexão, além dos corpos-de-prova prismáticos moldados para o ensaio de determinação do coeficiente de expansão térmica linear.

Figura 23 - Corpos-de-prova cilíndricos recém moldados, produzidos para a realização dos ensaios de compressão.



Fonte: Do autor (2018).

4.5.2 Preparo dos corpos-de-prova dos concretos para os ensaios de resistência de tração na flexão

Os procedimentos de moldagem e cura dos corpos-de-prova de concreto para os ensaios de tração na flexão seguiram os padrões definidos pela NBR 5738 (2015, p. 1 a 13). Foram utilizados moldes de madeira de pinus, com 25 mm de espessura, formando um volume

prismático de 100 x 100 x 350 mm, adensados de forma manual por meio de hastes metálicas de 16 mm de diâmetro por 600 mm de comprimento. Nas primeiras 24 horas após a moldagem, os corpos-de-prova foram armazenados em locais protegidos de intempéries. Em seguida, foram armazenados em tanques submersos de água a uma temperatura de 23 ± 2 °C. Para este procedimento, os corpos de prova foram rompidos com 56 dias de cura.

4.5.3 Preparo dos corpos-de-prova dos concretos para os ensaios de tração por compressão diametral

Os procedimentos de moldagem, as dimensões e os formatos dos corpos-de-prova de concreto para os ensaios de tração por compressão diametral seguiram os mesmos padrões adotados para os ensaios de compressão. Este ensaio foi realizado com 56 dias de cura dos corpos-de-prova.

4.5.4 Preparo dos corpos-de-prova dos concretos para os ensaios de determinação do coeficiente de expansão térmica linear

Os procedimentos de moldagem, dimensões e formatos dos corpos-de-prova de concreto para o ensaio de determinação do coeficiente de expansão térmica linear seguiram os mesmos padrões adotados para os ensaios de tração na flexão. Os testes foram feitos com corpos-de-prova curados com no mínimo 56 dias.

4.6 ENSAIO DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

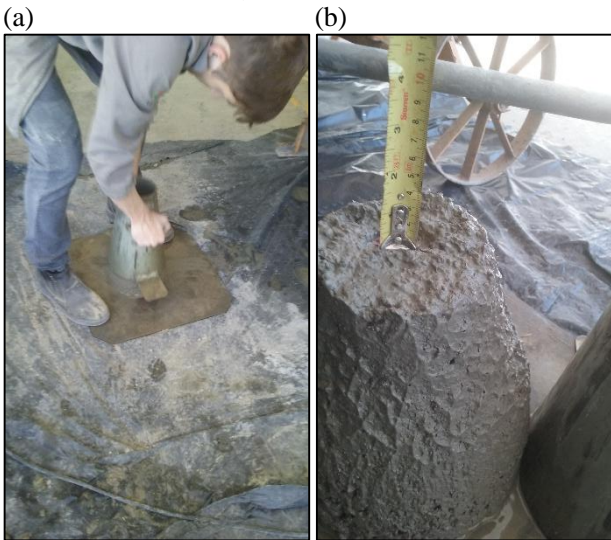
O ensaio realizado no estado fresco no concreto foi o de consistência por abatimento com tronco de cone (*slump test*). Esse ensaio foi realizado no Iparque – Instituto de Engenharia e Tecnologia da UNESC.

O ensaio de *slump test* foi realizado para determinar a consistência dos concretos no estado fresco, sendo este necessário para garantir a qualidade do lançamento e adensamento dos concretos em suas aplicações. Os procedimentos utilizados na realização deste ensaio seguem as padronizações determinadas pela NBR NM 67 (1998, p. 2 a 8).

Utilizando um molde de metal com espessura igual a 1,5 mm, no formato de tronco de cone oco com um diâmetro na base inferior de 200

mm e na sua base superior 100 mm, os concretos foram moldados em três camadas de 100 mm de altura com o adensamento manual de 25 golpes com a haste metálica de 16 mm de diâmetro e 600 mm de comprimento. Esse ensaio foi realizado sobre base firme em contato direto com uma placa base metálica quadrada. Após a moldagem dos concretos, o cone foi retirado cuidadosamente para evitar danos no monte de concreto. A altura entre o nível superior do molde e o nível superior do monte de concreto, resultou no valor de consistência. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção Civil. As figuras 24 (a) e (b) mostram, respectivamente, imagens no momento da retirada do molde e medição do valor da consistência.

Figura 24 - Ensaio do *slump test* (a) Retirada do molde durante a realização do ensaio (b) Medição da consistência do concreto.



Fonte: Do autor (2018).

4.7 ENSAIO DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

Os ensaios mecânicos realizados nos concretos no estado endurecido foram os de absorção de água, índice de vazios, massa específica aparente seca, compressão, tração na flexão, tração por compressão diametral, módulo de elasticidade, determinação do coeficiente de expansão térmica linear, além do ensaio de

termogravimetria e das visualizações com os microscópicos ópticos e eletrônicos de varredura (MEV). Todos esses ensaios foram realizados no Iparque – Instituto de Engenharia e Tecnologia da UNESC.

4.7.1 Ensaio de absorção de água

O ensaio de absorção de água foi realizado com o objetivo de determinar o teor de água absorvida por cada tipo de concreto, verificando sua permeabilidade. Os procedimentos desenvolvidos neste ensaio foram de acordo com a NBR 9778 (2009, p. 1 a 4). Nesta etapa, os testes foram realizados com corpos de provas curados com 56 dias. Para a realização deste ensaio os equipamentos utilizados foram a balança hidrostática da marca SHIMADZU, modelo UX6200H, estufa da marca QUIMIS, modelo Q31, mantendo a temperatura de 105 ± 5 °C e um tanque com condições de manter os corpos-de-prova totalmente submersos. Desta forma, pesando os corpos-de-prova dos concretos na condição saturada em água e seca em estufa, obtém-se a absorção de água através da aplicação da equação 7.

$$\text{Absorção de água} = \frac{M_{\text{sat}} - M_s}{M_s} \times 100 \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

M_{sat} = Massa do corpo-de-prova saturado;

M_s = Massa do corpo-de-prova seco em estufa.

Estes ensaios foram realizados nos laboratórios de Materiais de Construção Civil (LMCC) e de Mecânica dos Solos e Asfalto (LMSA). A figura 25 mostra um corpo-de-prova sendo pesado para a determinação da absorção de água.

Figura 25 - Corpo-de-prova pesado para o cálculo da determinação da absorção de água.



Fonte: Do autor (2018).

4.7.2 Ensaio de índice de vazios

Os ensaios de índice de vazios foram realizados nos concretos afim de determinar as diferentes quantidade de poros existentes nos diferentes tipos de concretos. Os procedimentos desenvolvidos neste ensaio foram de acordo com a NBR 9778 (2009, p. 1 a 4), utilizando corpos-de-prova com 56 dias de cura. Além de utilizar os mesmos equipamentos e procedimentos utilizados nos ensaios de absorção de água, nos ensaios de índice de vazios foi utilizado também o Banho Maria da marca Nova Ética, modelo DUBNOFF, para promover a saturação dos corpos-de-prova em água, em condição de ebulição durante um período de 5 horas. A figura 26 apresenta os corpos-de-prova submetidos no banho Maria.

Figura 26 - Corpos-de-prova submetidos em banho Maria para saturação dos corpos-de-prova.



Fonte: Do autor (2018).

Os valores do índice de vazios (I_a) dos corpos-de-prova dos concretos foram determinados através da equação 8.

$$I_a = \frac{M_{\text{sat}} - M_s}{M_{\text{sat}} - M_i} \times 100 \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

M_{sat} = Massa do corpo-de-prova saturado;

M_s = Massa do corpo-de-prova seco em estufa;

M_i = Massa do corpo-de-prova saturado, imerso em água.

Estes ensaios foram realizados nos laboratórios de Materiais de Construção Civil (LMCC) e de Mecânica dos Solos e Asfalto (LMSA).

4.7.3 Ensaio de massa específica aparente seca

Os ensaios para a determinação da massa específica aparente seca dos concretos foram realizados afim de determinar as possíveis diferenças de massas entre os tipos de concretos estudados. Os procedimentos desenvolvidos neste ensaio foram de acordo com a NBR 9778 (2009, p. 1 a 4), utilizando corpos-de-prova com 56 dias de cura. Foram utilizados os mesmos equipamentos e procedimentos utilizados nos ensaios de absorção de água e índice de vazios. Os valores da massa específica aparente seca ($M_{\text{esp.seca}}$) dos concretos foram determinados através da equação 9.

$$M_{\text{esp.seca}} = \frac{M_s}{M_{\text{sat}} - M_i} \quad \text{Equação 9}$$

Estes ensaios foram realizados nos laboratórios de Materiais de Construção Civil (LMCC) e de Mecânica dos Solos e Asfalto (LMSA).

4.7.4 Ensaio de compressão

Os ensaios de compressão dos concretos tiveram como objetivo determinar a resistência à compressão dos concretos. Estes ensaios foram realizados de acordo com as determinações da NBR 5739 (2007, p. 1 a 9).

Foi utilizado para este ensaio a prensa da marca EMIC modelo PS 200I. Aplicando sobre os corpos-de-prova cargas progressivas a uma

velocidade constante de carregamento de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s. Os corpos-de-prova eram rompidos por compressão, obtendo-se a força máxima aplicada. A partir dos valores de força máxima e do diâmetro dos corpos-de-prova, as resistências à compressão (f_c) foram determinadas com base na equação 10.

$$f_c = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot D^2} \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

f_c = resistência à compressão, em megapascal (MPa);

F = força máxima alcançada, em Newtons (N);

D = diâmetro do corpo-de-prova, em milímetros (mm).

Estes ensaios foram realizados nos laboratórios de Materiais de Construção Civil (LMCC). A figura 27 mostra um corpo-de-prova na prensa durante o ensaio de compressão.

Figura 27 - Corpo-de-prova de concreto inserido na prensa, durante a realização do ensaio de compressão.



Fonte: Do autor (2018).

4.7.5 Ensaio de tração na flexão

Os ensaios de tração na flexão tiveram como objetivo determinar as resistências de tração dos concretos, diante de esforços de flexão. Estes ensaios foram realizados de acordo com as determinações da NBR 12142 (2010, p. 1 a 5).

O equipamento utilizado para a realização destes ensaios foi a prensa EMIC DL 10000, respeitando uma velocidade constante de carregamento de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s, dotada de um dispositivo de flexão que garanta a aplicação da força perpendicular às faces superior e inferior do corpo-de-prova. A figura 28 apresenta a imagem de um corpo-de-prova prismático inserido na prensa durante a realização do ensaio de tração na flexão.

Figura 28 - Corpo-de-prova prismático inserido na prensa durante a realização do ensaio de tração na flexão.



Fonte: Do autor (2018).

A força foi aplicada de forma contínua e sem choques, aumentando a tensão sobre o corpo-de-prova numa velocidade entre 0,9 MPa/min a 1,2 MPa/min até a ruptura. Após o rompimento, mediu-se o corpo-de-prova em sua seção de ruptura, determinando a largura e as alturas médias, com precisão de 1 mm. Com base nessas medidas e com a força máxima alcançada registrada na máquina do ensaio, determinou-se a resistência à tração na flexão através da aplicação da equação 11.

$$f_{ct,f} = \frac{F \cdot l}{b \cdot d^2}$$

Equação 11

Onde:

$f_{ct,f}$ = resistência à tração na flexão, expressa em megapascal (MPa);

F = força máxima registrada na máquina de ensaio, expressa em Newtons (N);

l = dimensão do vão entre apoios, expressa em milímetros (mm);

b = largura média do corpo-de-prova, expressa em milímetros (mm);

d = altura média do corpo-de-prova, expressa em milímetros (mm).

Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos.

4.7.6 Ensaio de tração por compressão diametral

Os ensaios de tração por compressão diametral tiveram como objetivo determinar a resistência de tração do concreto por esforços compressivos, paralelos à área de seção transversal do corpo-de-prova. Este ensaio foi realizado de acordo com as determinações da NBR 7222 (2011, p. 1 a 5).

O equipamento utilizado para a realização deste ensaio foi a prensa EMIC PS 200I, respeitando uma velocidade constante de carregamento de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s. O ensaio é similar ao de compressão, modificando apenas a posição do corpo-de-prova. A figura 29 apresenta o corpo-de-prova posicionado na prensa para a realização do ensaio.

Figura 29 - Posição do corpo-de-prova para a realização do ensaio de tração por compressão diametral.



Fonte: Do autor (2018).

Com a ruptura dos corpos-de-prova, foram obtidas as cargas em Newtons (N). Com estes resultados, obteve-se a resistência de tração por compressão diametral ($f_{ct,sp}$) em MPa, com a aplicação da equação 12.

$$f_{ct,sp} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot d \cdot l} \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

F = Força máxima obtida no ensaio, expresso em Newtons (N);

d = Diâmetro do corpo-de-prova, expresso em milímetros (mm);

l = Comprimento do corpo-de-prova, expresso em milímetros (mm).

Estes ensaios foram realizados nos laboratórios de Materiais de Construção Civil (LMCC).

4.7.7 Ensaio do módulo de elasticidade

O ensaio do módulo de elasticidade tem como objetivo determinar a quantidade máxima de tensão axial que poderá ser aplicado no concreto, fazendo o mesmo deformar elasticamente. Nesta pesquisa, os ensaios

foram realizados de acordo com as determinações da NBR 8522 (2008, p. 1 a 16), utilizando corpos-de-prova com 56 dias de cura.

Os equipamentos utilizados neste ensaio foram a prensa EMIC PS 200CS, respeitando uma velocidade constante de carregamento de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s, além de um extensômetro (medidor de deformação mecânica) da marca EMIC, modelo EE08, fixado por meio de pinos na superfície do corpo-de-prova. Obtidos os valores de tensão e variação de deslocamento (deformação), o resultado do módulo de elasticidade (E_{ci}), foi obtido através da equação 13.

$$E_{ci} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} * 10^{-3} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} * 10^{-3} \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

σ_b = Tensão maior em MPa ($\sigma_c = 0,3 * f_c$);

ε_b = Deformação específica média na maior tensão;

ε_a = Deformação específica média dos corpos-de-prova sob a tensão básica (0,5 MPa).

Estes ensaios foram realizados nos laboratórios de Materiais de Construção Civil (LMCC). A figura 30 apresenta a imagem de um corpo-de-prova inserido na prensa durante a realização do ensaio.

Figura 30 - Corpo-de-prova de concreto inserido na prensa durante a realização do ensaio do módulo de elasticidade.



Fonte: Do autor (2018).

4.7.8 Ensaio para a determinação do coeficiente de dilatação térmica linear

O objetivo do ensaio para a determinação do coeficiente de expansão térmica linear do concreto é determinar o quociente da variação de deformação do material pela variação de temperatura no qual o mesmo foi submetido. Todos os concretos desenvolvidos foram submetidos a este ensaio com base nas prescrições da NBR 12815 (2012, p. 1 a 3) e no planejamento experimental utilizado na pesquisa de Aydin (2018, p. 1 a 8).

Para a realização do ensaio foram utilizados uma estufa da marca QUIMIS, modelo Q31, o refrigerador de marca fullgauge, modelo MT-512R, um multímetro da marca Minipa, modelo ET-1110 DMM, furadeira da marca Bosch, modelo GSB 13, além de um relógio comparador digital da marca Mitutoyo, modelo ABSOLUTE 1D-C112Gxb, com graduação de 0,001mm.

Inicialmente foram realizadas furações no centro do comprimento dos corpos-de-prova utilizando uma broca de 8,0 mm de diâmetro, penetrando um terço de sua espessura para na sequência instalar o multímetro. Na sequência, os corpos-de-prova foram colocados na estufa a uma temperatura de $50 \pm 2^\circ\text{C}$, durante um período de 24 horas, afim de promover a expansão. Após 24 horas, cada corpo-de-prova foi retirado da estufa e posicionado sobre uma mesa rígida de mármore, a um ambiente de laboratório com temperatura de 20°C . Sobre o corpo-de-prova, o relógio comparador foi posicionado e o termopar conectado com fios condutores na furação realizada no centro do seu comprimento, afim de controlar a queda de temperatura interna do material. A medida que a temperatura do corpo-de-prova diminuía, o mesmo se contraía. Tais contrações foram medidas com o relógio comparador. Essas contrações foram medidas até o momento que a temperatura interna do corpo-de-prova chegou a 24°C . Tais contrações medidas representaram as expansões geradas na estufa na temperatura de 50°C . A figura 31 apresenta um corpo-de-prova durante o processo de resfriamento e medição de tais contrações.

Figura 31 - Corpo-de-prova no processo de resfriamento em ambiente de laboratório sob controle da queda de temperatura, medindo tais contrações após retirada da estufa a 50°C.



Fonte: Do autor (2018).

Após a retirada dos corpos-de-prova da estufa e medição das contrações, os mesmos foram colocados no refrigerador a uma temperatura de $4\pm 2^{\circ}\text{C}$ por um período de 24 horas. Em seguida, os corpos-de-prova foram retirados do refrigerador e iniciado o processo de leitura da expansão. A variação da temperatura foi controlado pelo multímetro e a dilatação foi mensurada com o relógio comparador. Tais expansões medidas representam as contrações geradas no corpo-de-prova durante as 24 horas no refrigerador a uma temperatura de $4\pm 2^{\circ}\text{C}$. A figura 32 mostra um o aparato instrumental utilizado na determinação do coeficiente de dilatação linear.

Figura 32 - Corpo-de-prova durante o processo de ganho de temperatura após a retirada do refrigerador, com o multímetro instalado controlando temperatura e o relógio comparador mensurando as expansões.



Fonte: Do autor (2018).

Com o resultado das leituras efetuadas das expansões, contrações e temperatura, foram obtidos os valores do coeficiente de dilatação térmica linear dos concretos através da aplicação da equação 14.

$$\alpha = \frac{D_q - D_f}{T_q - T_f} \quad \text{Equação 14}$$

Onde:

α = coeficiente de dilatação térmica linear do concreto, expressa em milímetros por milímetros por grau Celsius ($\text{mm}/^\circ\text{C}$);

D_q = deformação obtida a partir da leitura na estufa a $50 \pm 2^\circ\text{C}$, expressa em milímetros;

D_f = deformação obtida a partir da leitura no refrigerador a $4 \pm 2^\circ\text{C}$, expressa em milímetros;

T_q = temperatura interna registrada no corpo-de-prova no momento da retirada da estufa a $50 \pm 2^\circ\text{C}$, expressa em graus Celsius ($^\circ\text{C}$);

T_f = temperatura interna registrada no corpo-de-prova no momento da retirada do refrigerador a $4 \pm 2^\circ\text{C}$, expressa em graus Celsius ($^\circ\text{C}$).

Estes ensaios foram realizados nos laboratórios de Materiais de Construção Civil (LMCC).

4.7.9 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A análise via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi realizada em todas as amostras de concretos desenvolvidos nesta pesquisa afim de avaliar as possíveis modificações morfológicas na microestrutura. O microscópio eletrônico de varredura utilizado foi o mesmo equipamento utilizado nas caracterizações morfológicas dos materiais que constituíram os concretos (item 4.3.5).

As amostras de concreto foram embutidas numa camada de resina de baixa viscosidade, sendo em seguida lixadas com lixas P500 e P 600.

4.7.10 Microscopia óptica

A microscopia óptica foi utilizada com o objetivo visualizar os poros existentes entre os constituintes do concreto. Por isso, essa visualização foi realizada em amostras de todos os tipos de concreto desenvolvidos nesse estudo.

O microscópio óptico utilizado é da marca OLYMPUS, modelo BX41M – LED.

4.8 TRATAMENTO ESTATÍSTICO

Após a obtenção dos resultados experimentais, foram avaliadas as significâncias estatísticas das variáveis independentes adição das fibras do bagaço da cana-de-açúcar e lã de vidro moída nos resultados dos concretos. O planejamento experimental utilizado foi o fatorial 2^2 com um ponto central. Os métodos estatísticos utilizados foram ANOVA, Pareto e Means Plot. Foram considerados significantes as combinações dos resultados de consistência (*Slump Test*), resistências mecânicas e o coeficiente de expansão térmica linear com as adições que tiveram o valor P-valor $\leq 0,1$, que corresponde a confiabilidade igual ou acima de 90%. Tal variação da confiabilidade se explica pela imprecisão dos métodos de

ensaio. Essas análises estatísticas foram realizadas utilizando o software Statistica 7.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

5.1.1 Caracterização da lã de vidro

5.1.1.1 Análise química

Os resultados obtidos da análise química por fluorescência de raios-X realizada nas amostras de lã de vidro moída mostram que 60,06% da quantidade da composição de Dióxido de Silício (SiO_2). A tabela 9 apresenta os compostos e suas respectivas quantidades identificadas na análise química.

Tabela 9 - Análise química da lã de vidro moída.

COMPOSTOS	QUANTIDADE
SiO_2	60,06%
Al_2O_3	3,82%
Fe_2O_3	0,91%
CaO	6,55%
K_2O	1,58%
MgO	4,58%
Na_2O	15,65%
P_2O_5	0,11%
TiO_2	0,48%
P.F	6,04%

Fonte: Do autor (2018).

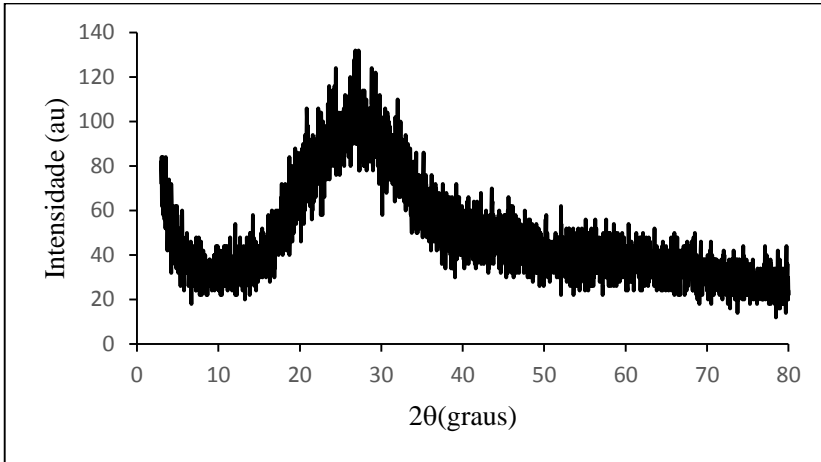
A quantidade do composto de Dióxido de Silício (SiO_2) apresentada na tabela 9 supera os valores obtidos da composição química das amostras de lã de vidro (43,70%) utilizadas na pesquisa de Silva (2016, p. 49), onde os resíduos de lã de vidro utilizados em argamassas substituindo o cimento atingiram o índice de atividade pozolânica acima de 75%, comprovando sua capacidade de uso em compósitos cimentícios.

5.1.1.2 Difração de raios X

O resultado obtido da difração de raios-X realizada com a amostra de lã de vidro moída mostra sua natureza amorfa. A figura 33 apresenta a

representação gráfica da difração de raios-X da amostra da lã de vidro moída.

Figura 33 - Representação gráfica da difração de raios-X da lã de vidro moída.



Fonte: Do autor (2018).

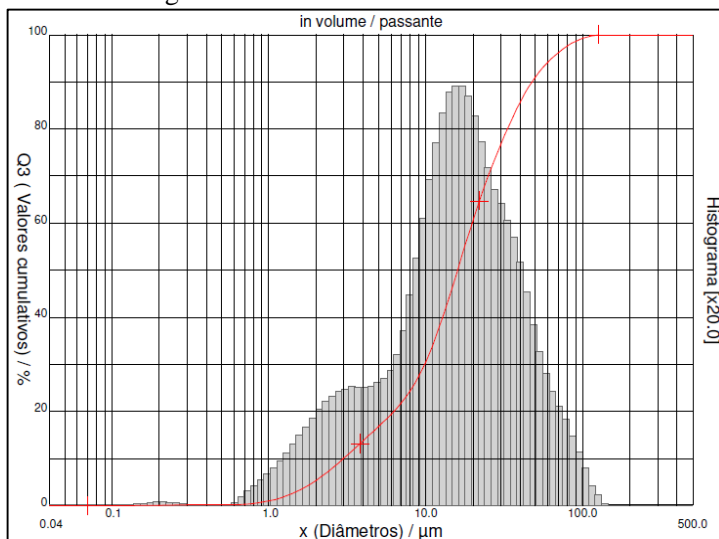
Analisando a figura 33, percebe-se a inexistência de picos, indicando que a lã de vidro é um material amorfo.

A natureza amorfa da lã de vidro moída se torna essencial para que a mesma possa reagir com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), formando novas fases de silicato de cálcio hidratado ($\text{CaO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$), o que pode aumentar a resistência mecânica da pasta de cimento hidratada assim como diminuir o coeficiente de dilatação térmica linear (SHUI et al., 2010, p. 1761 a 1767; ABD. EL. ALEEM; HEIKAL e MORSI, 2014, p. 151 a 160).

5.1.1.3 Análise granulométrica

Os resultados obtidos do ensaio de granulometria a laser realizado nas amostras de lã de vidro moída mostram que 90% das partículas apresentaram diâmetro inferior a 47,65 μm , 50% inferior a 15,96 μm e 10% inferior a 2,98 μm . A figura 34 apresenta a curva granulométrica da lã de vidro moída.

Figura 34 - Curva granulométrica da lâ de vidro moída.



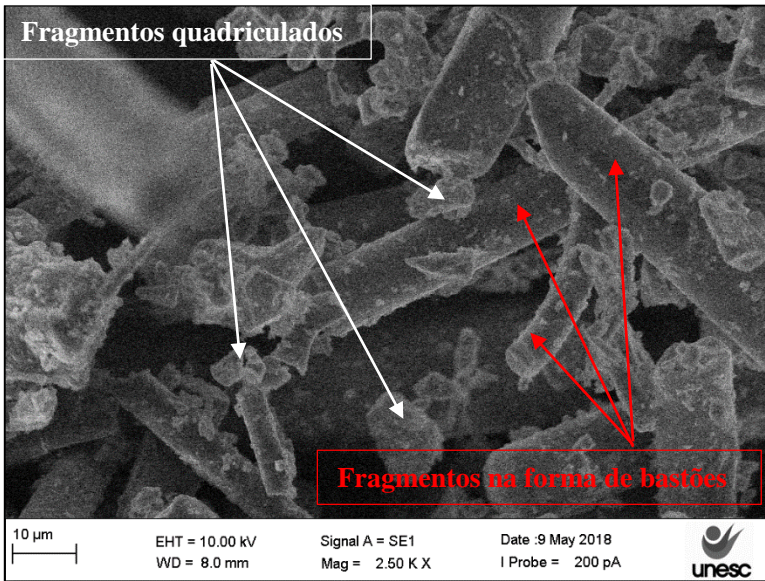
Fonte: Do autor (2018).

Diante desse resultado, pode-se esperar que a lâ de vidro moída ocupe espaços vazios das misturas de concreto, contribuindo para a redução de porosidade. Essa última afirmação coincide com os resultados obtidos na pesquisa realizada por Shui et al. (2010, p. 1761 a 1767) onde os concretos com 15,0% de fumo de sílica apresentaram um menor resultado de porosidade (16,86%), quando comparado com os concretos sem adição de fumo de sílica (20,57%).

5.1.1.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) lâ de vidro

O resultado obtido da microscopia eletrônica de varredura (MEV) realizada na amostra de lâ de vidro moída é apresentada na figura 35.

Figura 35 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da lã de vidro moída.



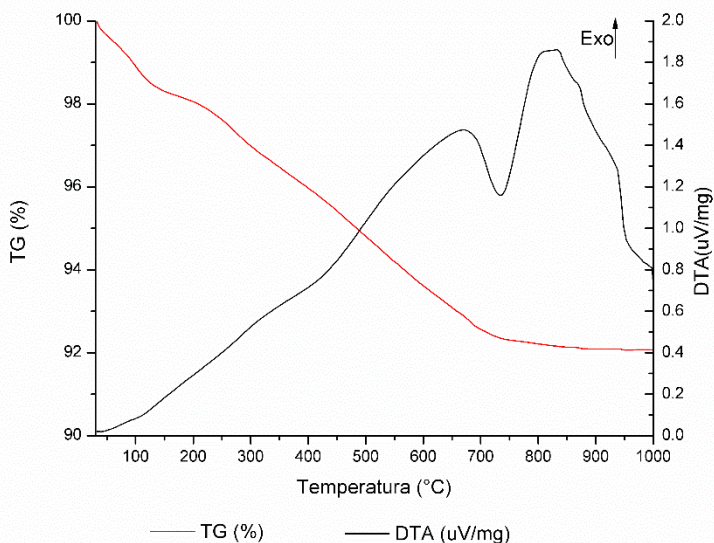
Fonte: Do autor (2018)

Analisando a figura 35 percebe-se a variação no tamanho de partículas da lã de vidro moída, que vão desde fragmentos de formatos quadriculados próximos de 5 e 10 µm até fragmentos na forma de bastões superiores a 20 µm.

5.1.1.5 Termogravimetria (TG) Lã de vidro moída

O resultado da termogravimetria (TG) com a amostra de lã de vidro moída apresenta a perda de massa do material com a variação de temperatura. A figura 36 apresenta o resultado da análise termogravimétrica do bagaço da cana-de-açúcar.

Figura 36 - Termogravimetria (TG) da lâ de vidro moída.



Fonte: Do autor (2018).

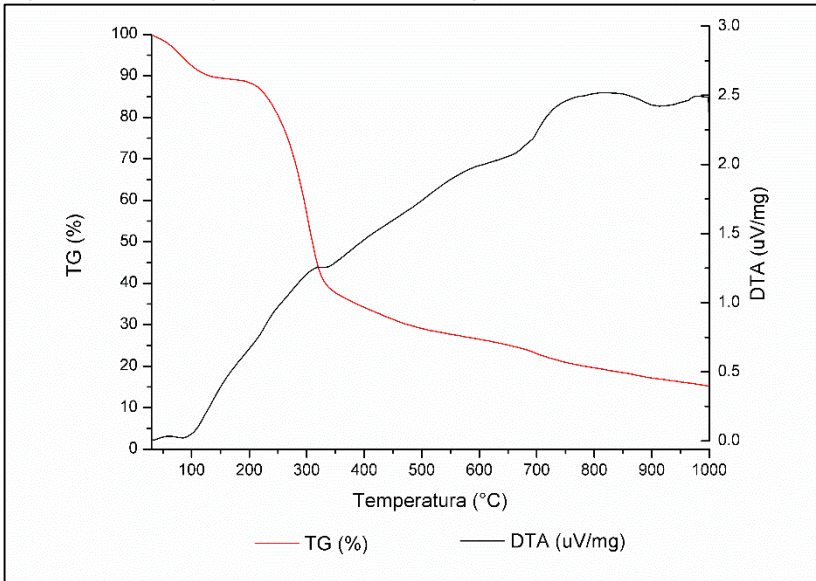
Analisando a figura 36 percebe-se que a amostra da lâ de vidro, submetida a uma temperatura de até 1.000°C durante o ensaio, sofreu uma perda de massa de aproximadamente 8,0%. Tal resultado é semelhante aos resultados obtidos por Lin et al. (2013, p. 5) onde argamassas de cimento com adições de lâs de rocha moída, submetidas a ensaios de termogravimetria, obtiveram perdas de massa de até 15,0%.

5.1.2 Caracterização do Bagaço da cana-de-açúcar

5.1.2.1 Termogravimetria (TG) do Bagaço da cana-de-açúcar

O resultado da termogravimetria (TG) com a amostra do bagaço da cana-de-açúcar apresenta a perda de massa do material com a variação de temperatura. A figura 37 apresenta o resultado da análise termogravimétrica do bagaço da cana-de-açúcar.

Figura 37 - Termogravimetria (TG) do bagaço da cana-de-açúcar.



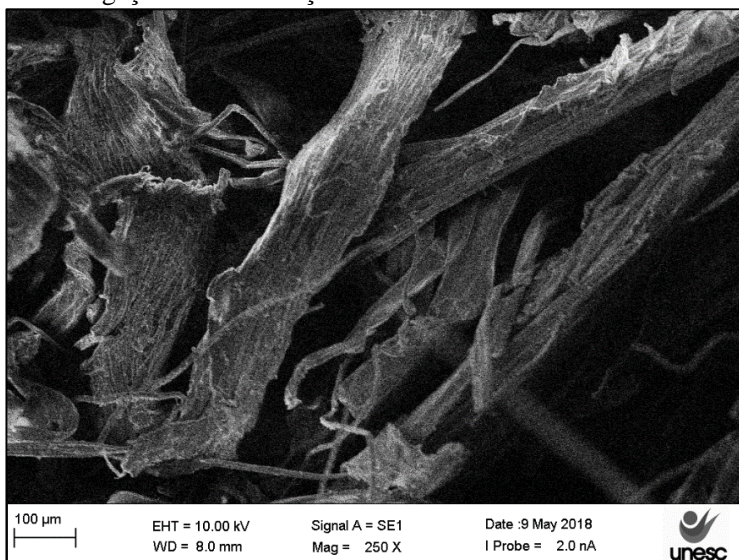
Fonte: Do autor (2018).

Analisando a figura 37 percebe-se que a perda de massa do bagaço da cana-de açúcar ocorreu em dois estágios. O primeiro foi até a temperatura de 150°C com uma perda de massa próxima a 10%. Essa perda de água pode ser justificada pela evaporação inicial da água existente no material. O segundo estágio ocorreu entre 160 a 350°C com uma perda de massa de aproximadamente 51,9%. Esse resultado pode ser justificado pela decomposição da celulose existente no bagaço da cana-de-açúcar. Se o mesmo não tivesse recebido tratamento químico para a remoção da lignina, essa perda de massa poderia ocorrer entre as temperaturas de 350,6°C a 376°C. Essa necessidade do aumento de temperatura para promover a perda de massa pode ser justificado pela necessidade da quebra das ligações entre as unidades estruturais da lignina, provocando reações de descarbonilação e descarboxilação (GURGEL, 2007, p. 100; PELLEGRIN, 2016, p. 60).

5.1.2.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) das fibras do bagaço da cana-de-açúcar

O resultado obtido da microscopia eletrônica de varredura (MEV) realizada na amostra de fibras do bagaço da cana-de-açúcar é apresentada na figura 38.

Figura 38 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da amostra de fibras do bagaço da cana-de-açúcar.



Fonte: Do autor (2018).

Analisando a figura 38 percebe-se o formato do bagaço da cana-de-açúcar na forma de fibras superiores a 200 µm.

5.1.3 Caracterização dos agregados

5.1.3.1 Análise granulométrica dos agregados miúdos

Os resultados obtidos dos ensaios de distribuição granulométrica realizados nos agregados miúdos (areia fina e areia grossa) mostram a variação no tamanho das partículas. A tabela 10 apresenta os resultados da granulometria da areia média.

Tabela 10 - Granulometria da areia média.

Peneira (mm)	Material Retido (g)	% Retida	% Acumulada
9,5	0	0	0
4,8	13,6	1,36	1,36
2,4	162,5	16,25	17,61
1,2	344,0	34,4	52,01
0,6	273,8	27,38	79,39
0,3	165,0	16,5	95,89
0,15	33,8	3,38	99,27
Fundo	7,3	0,73	100
TOTAL	1000,00	-	100
Dimensão Máxima(mm): 4,8		Módulo de Finura: 3,45	

Fonte: Do autor (2018).

Analisando a tabela 10 percebe-se que a dimensão máxima da areia média foi de 4,8 mm. As partículas que constituíram esta areia apresentaram diâmetros menores que 9,5 mm, sendo que 98,64% das partículas estão abaixo de 4,8 mm. Esse material também foi caracterizado pelo módulo de finura, que apresentou um valor de 3,45. Além disso, 34,4% da amostra ficou retida na peneira de 1,2 mm. A tabela 11 apresenta os resultados da granulometria da areia fina.

Tabela 11 - Granulometria da areia fina.

Peneira (mm)	Material Retido (g)	% Retida	% Acumulada
9,5	0	0	0
4,8	0,3	0,03	0,03
2,4	6,7	0,67	0,70
1,2	12,4	1,24	1,94
0,6	10,1	1,01	2,95
0,3	809,3	80,93	83,88
0,15	152,6	15,26	99,14
Fundo	8,6	0,86	100
TOTAL	1000,00	-	100
Dimensão Máxima(mm): 0,6		Módulo de Finura: 1,88	

Fonte: Do autor (2018).

Analisando a tabela 11 percebe-se que a dimensão máxima da areia fina foi de 0,6 mm. As partículas que constituíram esta areia apresentaram diâmetros menores que 9,5 mm, sendo que 99,97% das partículas estão abaixo de 4,8 mm. Esse material também foi caracterizado pelo módulo de finura, que apresentou um valor de 1,88. Além disso, 80,93% da amostra do ensaio ficou retida na peneira de 0,3 mm. Esses resultados mostram que a utilização das areias finas misturadas com as areias médias possibilitaram as mesmas a ocupação de espaços vazios na mistura em função da menor dimensão da areia fina. Tal ocupação, segundo as conclusões de Gleize et al. (2008, p.10 a 14) contribuem para aumentar a resistência mecânica dos concretos através da redução de vazios de ar.

5.1.3.2 Análise granulométrica do agregado graúdo

Os resultados obtidos do ensaio de distribuição granulométrica realizado da brita nº 0 mostram também uma variação no tamanho das partículas. A tabela 12 apresenta os resultados da granulometria da brita nº 0.

Tabela 12 - Granulometria da brita nº 0.

Peneira (mm)	Material Retido (g)	% Retida	% Acumulada
19	0	0	0
9,5	22,8	2,28	2,28
4,8	871,4	87,14	89,42
2,4	101,6	10,16	99,58
1,2	4,20	0,42	100,0
Fundo	0,0	0,0	100,0
TOTAL	1000,00	-	100,0
Dimensão Máxima(mm): 9,5		Módulo de Finura: 2,91	

Fonte: Do autor (2018).

Analisando a tabela 12 percebe-se que a dimensão máxima da brita nº 0 foi de 9,5 mm. As partículas que constituíram esta brita apresentaram diâmetros menores que 19,0 mm, sendo que 97,72% das partículas estão abaixo de 9,5 mm. Esse material também foi caracterizado pelo módulo de finura, que apresentou um valor de 2,91. Além disso, 87,14% da amostra do ensaio ficou retida na peneira de 4,8 mm. Esses resultados

mostram que o incremento da brita nº 0 com os agregados miúdos tende a promover uma compactação devido a ocupação dos agregados miúdos nos espaços vazios existentes entre as partículas do agregado graúdo, contribuindo para o aumento da resistência mecânica dos concretos. Além disso, a existência da brita nº 0 nas misturas de concreto se torna indispensável para que se obtenha os concretos, segundo descrição da NBR 12655 (2015, p. 3). Para Passuelo et al. (2011, p. 617 e 618) o agregado graúdo juntamente com a pasta de cimento hidratado, constituem a região microestrutural de menor possibilidade de formação de fissuras, contribuindo para o aumento de resistência mecânica.

5.2 ENSAIOS DOS CONCRETOS NO ESTADO FRESCO

5.2.1 Ensaio de consistência (*Slump test*)

A tabela 13 apresenta os resultados de consistência dos concretos produzidos.

Tabela 13 - Resultados dos ensaios de consistência dos concretos (slump test).

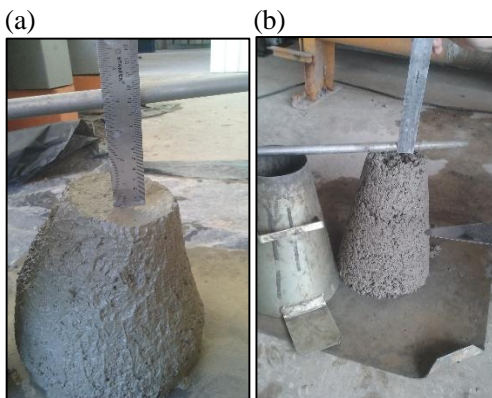
Tipo de concreto	Consistência (mm)
C_{ref}	97,0
$C_{lv10,0}$	96,0
$C_{bc3,0}$	10,0
$C_{bc3,0lv10,0}$	10,0
$C_{bc1,5lv5,0}$	30,0
$C_{bc1,5lv5,0}$	30,0

Fonte: Do autor (2018).

Percebe-se que os concretos C_{ref} e $C_{lv10,0}$ apresentaram, respectivamente, resultados de consistência de 97 e 96 mm. A perda de consistência de 1,03% do concreto $C_{lv10,0}$ em relação ao concreto C_{ref} pode ser justificada pela adição de um material fino, de tamanho inferior aos agregados miúdos, contribuindo para o aumento da área superficial. Os concretos $C_{bc3,0}$ e $C_{bc3,0lv10,0}$ apresentaram valores de consistência iguais a 10,0 mm. Para Mehta e Monteiro (2014, p. 561), as adições de fibras no concreto podem trazer prejuízos de consistência, em função da sua área superficial fazer contato com os demais materiais constituintes durante a

mistura, restringindo a mobilidade e fluidez. Essa restrição de mobilidade pode ser notada nas figuras 39 (a) e (b).

Figura 39 - Ensaio de consistência (a) do concreto C_{ref} e (b) do concreto $C_{bc3,0}$.



Fonte: Do autor (2018).

Analisando a figura 39 (b) percebe-se uma maior restrição de mobilidade do concreto $C_{bc3,0}$, quando comparado com o concreto C_{ref} (figura 39 (a)), em função do contato das fibras do bagaço da cana-de-açúcar com os demais materiais constituintes do concreto. Os dois tipos de concreto $C_{bc1,5lv5,0}$ apresentaram um aumento para 30,0 mm de consistência, quando comparados com os concreto $C_{bc3,0}$ e $C_{bc3,0lv10,0}$. Isso se justifica pela redução de 3,0% para 1,5% da quantidade de fibras do bagaço da cana-de-açúcar adicionadas na mistura.

5.2.1.1 Análise estatística dos resultados de consistência (*Slump test*)

Os resultados obtidos do tratamento estatístico ANOVA para os resultados de abatimento com tronco de cone são apresentados na tabela 14.

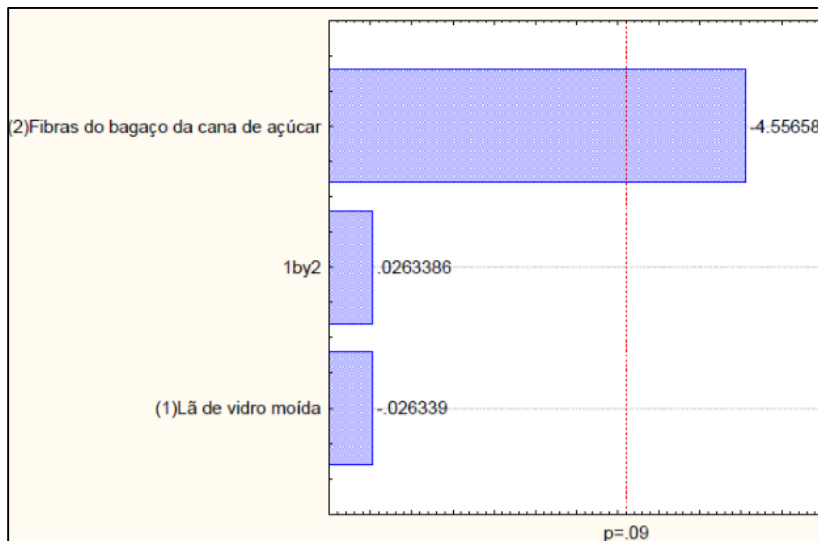
Tabela 14 - Resultados do método ANOVA para o abatimento com tronco de cone.

Fator	SS	df	MS	F	p
(1) Lã de vidro moída	0,250	1	0,250	0,00069	0,981379
(2) Fibras do bagaço da cana-de-açúcar	7.482,250	1	7.482,250	20,76240	0,044942
1 de 2	0,250	1	0,250	0,00069	0,981379
Erro	720,750	2	360,375		
Total SS	8.203,500	5			
R-quadrado = 0,91214					

Fonte: Do autor (2018).

Analisando a tabela 14 percebe-se que somente o valor p do fator Fibras do bagaço da cana-de-açúcar apresenta um valor inferior a 0,09 (0,044942). Nota-se também que esse fator apresentou o maior valor F (20,76240), permitindo concluir que tal fator apresenta significância estatística. Já os fatores Lã de vidro moída e 1 by 2 (Lã de vidro moída com fibras do bagaço da cana-de-açúcar) apresentaram valores superiores a 0,09, permitindo concluir de que tais resultados não são significantes estatisticamente. A figura 40 apresenta o gráfico de Pareto dos três fatores buscando atingir os 91% de confiabilidade.

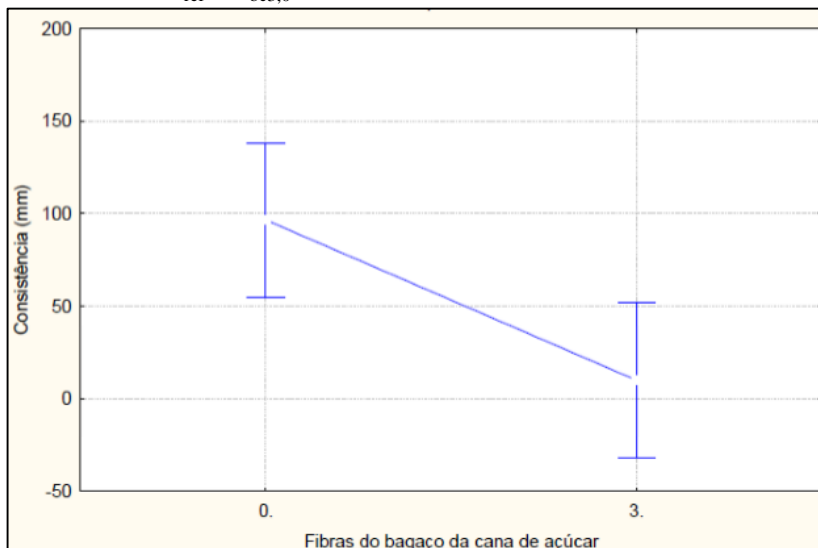
Figura 40 - Gráfico de Pareto dos fatores Lã de vidro moída, Fibras do bagaço da cana-de-açúcar e 1 by 2 (Lã de vidro moída com fibras do bagaço da cana-de-açúcar) para a consistência por abatimento com tronco de cone.



Fonte: Do autor (2018).

Analisando a figura 40 percebe-se novamente que somente o fator Fibras do bagaço da cana-de-açúcar atinge o nível de 91% de confiabilidade. A figura 41 apresenta o gráfico *Means Plot* que representa a relação entre os resultados de consistência por abatimento com tronco de cone dos concretos sem fibras (C_{ref}) e com 3,0% de fibras do bagaço da cana-de-açúcar ($C_{bc3,0}$).

Figura 41 - Gráfico da consistência por abatimento com tronco de cone dos concretos C_{ref} e $C_{bc3,0}$.



Fonte: Do autor (2018).

Percebe-se a diminuição dos valores de consistência por abatimento com tronco de cone do concreto $C_{bc3,0}$ em relação ao concreto C_{ref} , de forma que os valores limites referentes ao desvio padrão de ambos não se sobrepõem, confirmando novamente a significância estatística dos resultados para 91% de confiabilidade.

5.3 ENSAIOS DOS CONCRETOS NO ESTADO ENDURECIDO

5.3.1 Absorção de água, índice de vazios e massa específica aparente seca dos concretos

A tabela 15 apresenta os resultados de absorção d'água, índice de vazios e massa específica aparente seca dos concretos.

Tabela 15 - Absorção de água, índice de vazios e massa específica aparente seca dos concretos após os 56 dias.

Tipo de concreto	Especificação	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica aparente seca (g/cm³)
C _{ref}	Média	6,01	13,04	2,21
	Desvio padrão	0,207	0,407	0,0092
C _{lv10,0}	Média	4,15	9,38	2,26
	Desvio padrão	0,200	0,427	0,0060
C _{bc3,0}	Média	9,73	19,63	2,02
	Desvio padrão	0,424	0,471	0,042
C _{bc3,0lv10,0}	Média	9,57	19,43	2,03
	Desvio padrão	0,587	0,917	0,030
C _{bc1,5lv5,0}	Média	6,01	12,99	2,16
	Desvio padrão	0,191	0,378	0,0067
C _{bc1,5lv5,0}	Média	6,32	13,51	2,14
	Desvio padrão	0,788	1,479	0,033

Fonte: Do autor (2018).

Percebe-se que o concreto C_{lv10,0} apresentou o menor dos valores médios de absorção de água (4,15%) e índice de vazios (9,38%). Isso pode ser explicado devido à inclusão da lã de vidro moída, uma vez que este material apresentou uma granulometria mais fina do que os agregados miúdos e graúdo. Assim, a lã de vidro ocupa espaços vazios da mistura, que por consequência leva a diminuição de vazios do concreto e um aumento da massa específica aparente seca (2,26 g/cm³). Os concretos C_{bc3,0} e C_{bc3,0lv10,0} tiveram um aumento nos valores de absorção de água (C_{bc3,0} = 9,73% e C_{bc3,0lv10,0} = 9,57%) e índice de vazios (C_{bc3,0} = 19,63% e C_{bc3,0lv10,0} = 19,43%) quando comparados com os concretos C_{ref} e C_{lv10,0}. Isso pode ser justificado pelos prejuízos obtidos nos processos de compactação dos concretos C_{bc3,0} e C_{bc3,0lv10,0} em função de sua consistência, o que favorece o surgimento de espaços vazios (MEHTA; MONTEIRO, 2014, p. 561). Como consequência dos maiores valores de índice de vazios, os concretos C_{bc3,0} e C_{bc3,0lv10,0} obtiveram os menores resultados de massa específica aparente seca (C_{bc3,0} = 2,02 g/cm³ e C_{bc3,0lv10,0} = 2,03 g/cm³). Por fim, os concretos C_{bc1,5lv5,0} tiveram uma redução nos valores de absorção de água (6,01% e 6,32%) e de índice de vazios (12,99% e 13,51%), além de um aumento nos valores de massa

específica aparente seca ($2,16 \text{ g/cm}^3$ e $2,14 \text{ g/cm}^3$), quando comparados com os concretos $C_{bc3,0}$ e $C_{bc3,0lv10,0}$, uma vez que a menor quantidade de fibras do bagaço da cana-de-açúcar diminuiu os prejuízos nos processos de compactação.

5.3.1.1 Análise estatística dos resultados de absorção de água

Os resultados obtidos do tratamento estatístico ANOVA para os resultados da absorção de água após os 56 dias são apresentados na tabela 16.

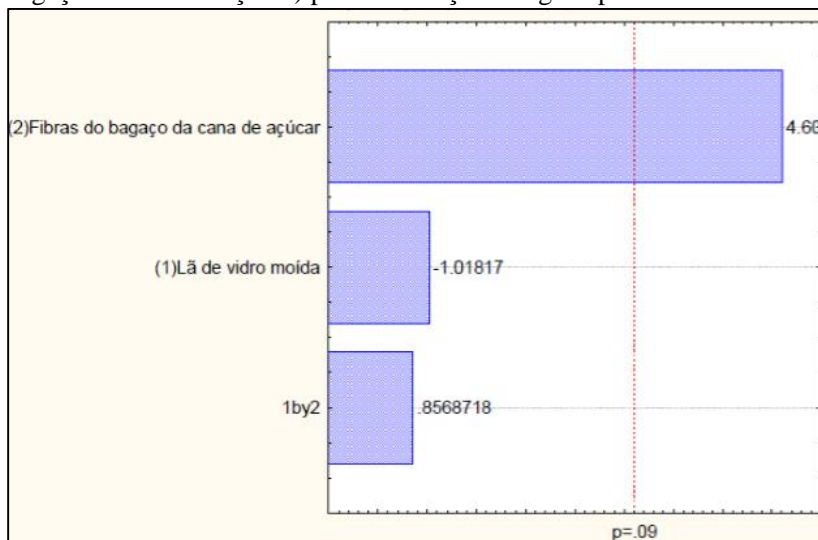
Tabela 16 - Resultados do método ANOVA para a absorção de água após os 56 dias.

Fator	SS	df	MS	F	p
(1) Lã de vidro moída	1,02010	1	1,02010	1,03666	0,415721
(2) Fibras do bagaço da cana-de-açúcar	20,88490	1	20,88490	21,22395	0,044028
1 de 2	0,72250	1	0,72250	0,73423	0,481799
Erro	1,96805	2	0,98403		
Total SS	24,59555	5			
R-quadrado = 0,91998					

Fonte: Do autor (2018).

Analisando a tabela 16 percebe-se que somente o valor p do fator Fibras do bagaço da cana-de-açúcar apresenta um valor inferior a 0,09 (0,044028). Percebe-se também que esse fator apresentou o maior valor F (21,22395), possibilitando tal fator apresentar uma significância estatística. Já os fatores Lã de vidro moída e 1 by 2 (Lã de vidro moída com fibras do bagaço da cana-de-açúcar) apresentaram valores superiores a 0,09, permitindo concluir de que tais resultados não são significantes estatisticamente. A figura 42 apresenta o gráfico de Pareto dos três fatores buscando atingir os 91% de confiabilidade.

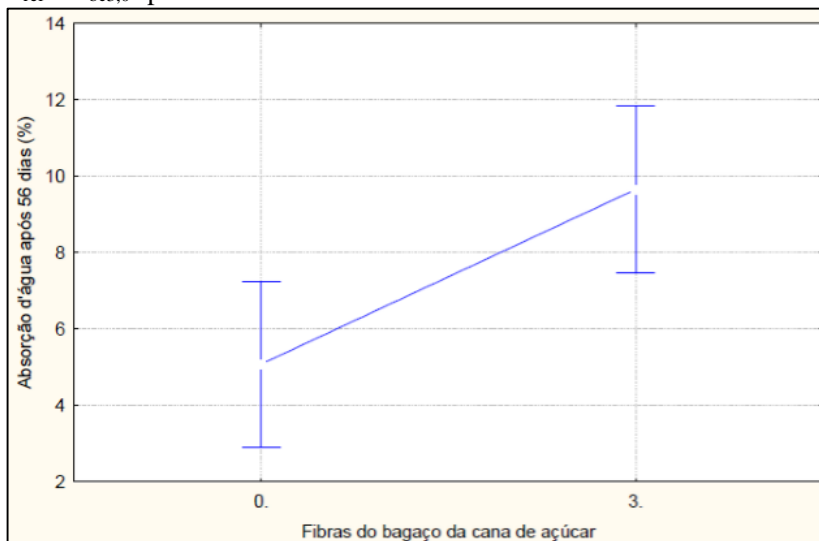
Figura 42 - Gráfico de Pareto dos fatores Lã de vidro moída, Fibras do bagaço da cana-de-açúcar e 1 by 2 (Lã de vidro moída com fibras do bagaço da cana-de-açúcar) para a absorção de água após os 56 dias.



Fonte: Do autor (2018).

Analisando a figura 42 percebe-se novamente que somente o fator Fibras do bagaço da cana-de-açúcar atinge o nível de 91% de confiabilidade. A figura 43 apresenta o gráfico *Means Plot* que representa a relação entre as médias dos resultados de absorção de água após os 56 dias dos concretos sem fibras (C_{ref}) e com 3,0% de fibras do bagaço da cana-de-açúcar ($C_{bc3,0}$).

Figura 43 - Gráfico de valores médios de absorção de água dos concretos C_{ref} e $C_{bc3,0}$ após os 56 dias.



Fonte: Do autor (2018).

Analisando a figura 43 percebe-se o aumento dos valores médios de absorção de água após os 56 dias dos concreto $C_{bc3,0}$ em relação ao concreto C_{ref} , de forma que os valores limites referentes ao desvio padrão de ambos não se sobrepõem, confirmando novamente a significância estatística dos resultados para 91% de confiabilidade.

5.3.1.2 Análise estatística dos resultados dos índices de vazios

Os resultados obtidos do tratamento estatístico ANOVA para os resultados de índice de vazios após os 56 dias são apresentados na tabela 17.

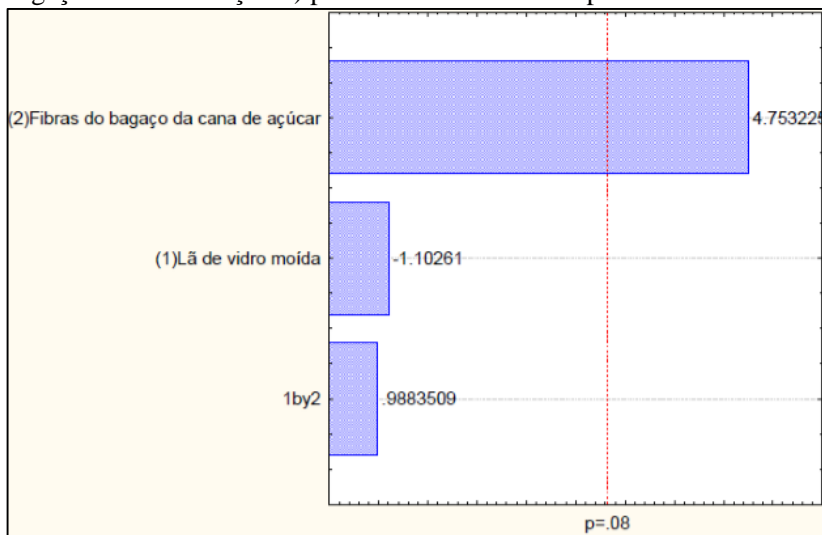
Tabela 17 - Resultados do método ANOVA para o índice de vazios após os 56 dias.

Fator	SS	df	MS	F	p
(1) Lã de vidro moída	3,72490	1	3,72490	1,21575	0,385133
(2) Fibras do bagaço da cana-de-açúcar	69,22240	1	69,22240	22,59315	0,041524
1 de 2	2,99290	1	2,99290	0,97684	0,427160
Erro	6,12773	2	3,06387		
Total SS	82,06793	5			
R-quadrado = 0,92533					

Fonte: Do autor (2018).

Analisando a tabela 17 percebe-se que somente o valor p do fator Fibras do bagaço da cana-de-açúcar apresenta um valor inferior a 0,08 (0,041524). Percebe-se também que esse fator apresentou o maior valor F (22,59315), possibilitando tal fator apresentar uma significância estatística. Já os fatores Lã de vidro moída e 1 by 2 (Lã de vidro moída com fibras do bagaço da cana-de-açúcar) apresentaram valores superiores a 0,08, permitindo concluir de que tais resultados não são significantes estatisticamente. A figura 44 apresenta o gráfico de Pareto dos três fatores buscando atingir os 92% de confiabilidade.

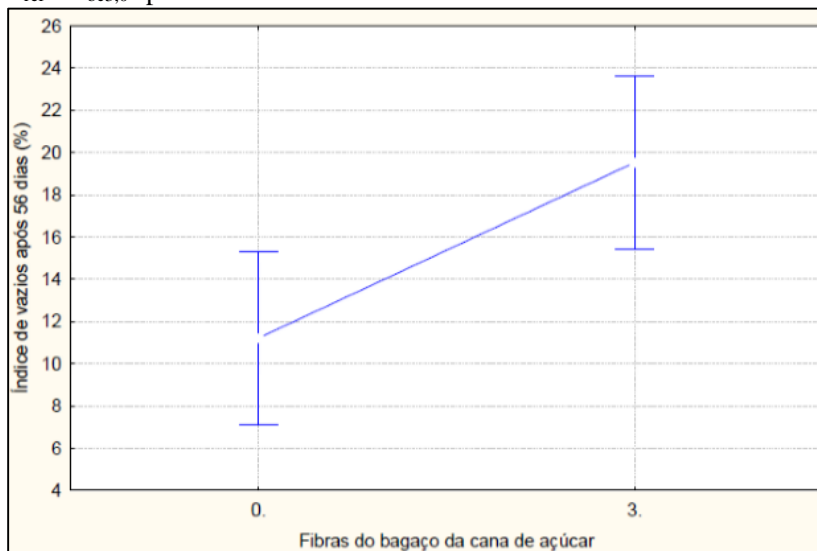
Figura 44 - Gráfico de Pareto dos fatores Lã de vidro moída, Fibras do bagaço da cana-de-açúcar e 1 by 2 (Lã de vidro moída com fibras do bagaço da cana-de-açúcar) para o índice de vazios após os 56 dias.



Fonte: Do autor (2018).

Analisando a figura 44 percebe-se novamente que somente o fator Fibras do bagaço da cana-de-açúcar atinge o nível de 92% de confiabilidade. A figura 45 apresenta o gráfico *Means Plot* que representa a relação entre as médias dos resultados de índice de vazios após os 56 dias dos concretos sem fibras (C_{ref}) e com 3,0% de fibras do bagaço da cana-de-açúcar ($C_{bc3,0}$).

Figura 45 - Gráfico de valores médios de índice de vazios dos concretos C_{ref} e $C_{bc3,0}$ após os 56 dias.



Fonte: Do autor (2018).

Analisando a figura 45 percebe-se o aumento dos valores médios de índice de vazios após os 56 dias dos concreto $C_{bc3,0}$ em relação ao concreto C_{ref} , de forma que os valores limites referentes ao desvio padrão de ambos não se sobrepõem, confirmando novamente a significância estatística dos resultados para 92% de confiabilidade.

5.3.1.3 Análise estatística dos resultados da massa específica aparente seca

Os resultados obtidos do tratamento estatístico ANOVA para os resultados de massa específica aparente seca após os 56 dias são apresentados na tabela 18.

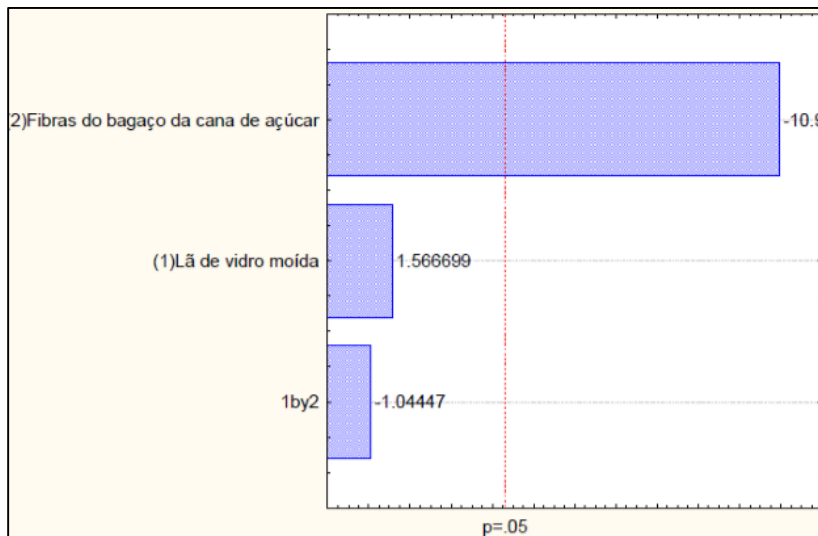
Tabela 18 - Resultados do método ANOVA para a massa específica aparente seca após os 56 dias.

Fator	SS	df	MS	F	p
(1) Lã de vidro moída	0,000900	1	0,000900	2,4545	0,257693
(2) Fibras do bagaço da cana-de-açúcar	0,044100	1	0,044100	120,2727	0,008212
1 de 2	0,000400	1	0,000400	1,0909	0,405911
Erro	0,000733	2	0,000367		
Total SS	0,046133	5			
R-quadrado = 0,9841					

Fonte: Do autor (2018).

Analisando a tabela 18 percebe-se que somente o valor p do fator Fibras do bagaço da cana-de-açúcar apresenta um valor inferior a 0,05 (0,008212). Percebe-se também que esse fator apresentou o maior valor F (120,2727), possibilitando tal fator apresentar uma significância estatística. Já os fatores Lã de vidro moída e 1 by 2 (Lã de vidro moída com fibras do bagaço da cana-de-açúcar) apresentaram valores superiores a 0,05, permitindo concluir de que tais resultados não são significantes estatisticamente. A figura 46 apresenta o gráfico de Pareto dos três fatores buscando atingir os 95% de confiabilidade.

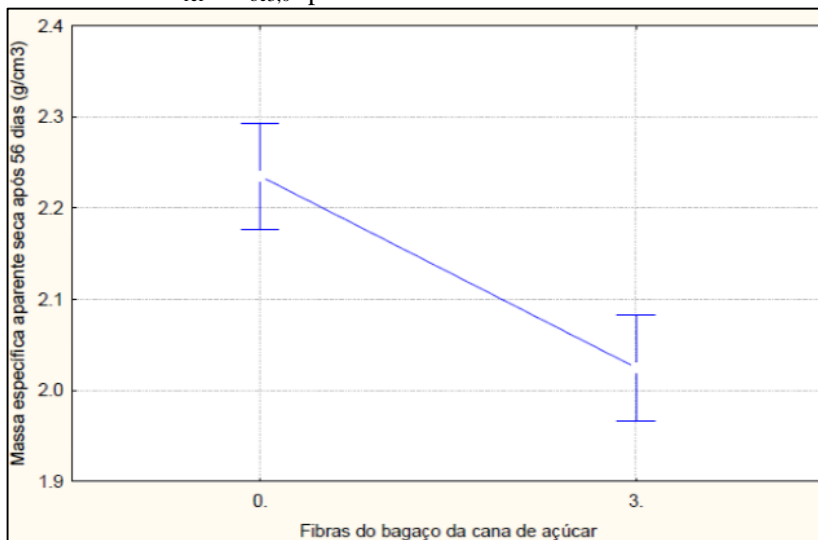
Figura 46 - Gráfico de Pareto dos fatores Lã de vidro moída, Fibras do bagaço da cana-de-açúcar e 1 by 2 (Lã de vidro moída com fibras do bagaço da cana-de-açúcar) para a massa específica aparente seca após os 56 dias.



Fonte: Do autor (2018).

Analisando a figura 46 percebe-se novamente que somente o fator Fibras do bagaço da cana-de-açúcar atinge o nível de 95% de confiabilidade. A figura 47 apresenta o gráfico *Means Plot* que representa a relação entre as médias dos resultados de massa específica aparente seca após os 56 dias dos concretos sem fibras (C_{ref}) e com 3,0% de fibras do bagaço da cana-de-açúcar ($C_{bc3,0}$).

Figura 47 - Gráfico de valores médios da massa específica aparente seca dos concretos C_{ref} e $C_{bc3,0}$ após os 56 dias.



Fonte: Do autor (2018).

Analisando a figura 47 percebe-se a redução dos valores médios de massa específica aparente seca após os 56 dias dos concreto $C_{bc3,0}$ em relação ao concreto C_{ref} , de forma que os valores limites referentes ao desvio padrão de ambos não se sobrepõem, confirmando novamente a significância estatística dos resultados para 95% de confiabilidade.

5.3.2 Resistência a compressão dos concretos

Os resultados obtidos dos ensaios de resistência à compressão nos concretos são apresentados na tabela 19.

Tabela 19 - Resistência à compressão dos concretos nos períodos de 7, 28 e 56 dias.

Tipo de concreto	Especificação	Idade dos experimentos		
		7 dias	28 dias	56 dias
C_{ref}	Média	23,34 MPa	30,00 MPa	33,16 MPa
	Desvio padrão	2,47 MPa	2,23 MPa	4,38 MPa
$C_{lv10,0}$	Média	25,76 MPa	34,22 MPa	36,04 MPa
	Desvio padrão	0,89MPa	2,18 MPa	7,34 MPa
$C_{bc3,0}$	Média	10,22 MPa	10,28 MPa	11,2 MPa
	Desvio padrão	1,58 MPa	2,79 MPa	3,09 MPa
$C_{bc3,0lv10,0}$	Média	8,06 MPa	13,64 MPa	11,9 MPa
	Desvio padrão	2,34 MPa	2,63 MPa	1,76 MPa
$C_{bc1,5lv5,0}$	Média	20,44 MPa	25,32 MPa	28,58 MPa
	Desvio padrão	1,12 MPa	2,13 MPa	2,74 MPa
$C_{bc1,5lv5,0}$	Média	17,88 MPa	23,26 MPa	27,7 MPa
	Desvio padrão	7,32 MPa	5,25 MPa	3,16 MPa

Fonte: Do autor (2018).

Analisando a tabela 19 notou-se que em todos os concretos com exceção dos concretos $C_{bc3,0lv10,0}$, tiveram maiores resultados de resistência à compressão aos 56 dias de idade. Isso se deve a evolução das reações de hidratação da pasta de cimento com o passar do tempo. O concreto $C_{bc3,0lv10,0}$ teve aos 56 dias uma resistência à compressão (11,9 MPa) inferior aos valores de resistência à compressão aos 28 dias (13,64 MPa). Isso pode ser explicado pelas imperfeições ocorridas durante os processos de compactação do concreto devido as adições de 3,0% de fibras do bagaço da cana-de-açúcar e 10,0% de lã de vidro moída. Para todas as idades, os concretos $C_{lv10,0}$ apresentaram os maiores resultados de resistência à compressão (7 dias = 25,76 MPa, 28 dias = 34,22 MPa e 56 dias = 36,04 MPa). Esses resultados se explicam pelo fato de que os concretos $C_{lv10,0}$ foram os que apresentaram os menores valores de índice de vazios (9,38%) e absorção de água (4,15%). Os concretos $C_{bc3,0}$ e $C_{bc3,0lv10,0}$ apresentaram reduções nos resultados de resistência à

compressão quando comparados com os concretos C_{ref} , em função dos maiores valores de absorção de água ($C_{bc3,0} = 9,73\%$ e $C_{bc3,0lv10,0} = 9,57\%$) e índice de vazios ($C_{bc3,0} = 19,63\%$ e $C_{bc3,0lv10,0} = 19,43\%$). Por fim, os concretos $C_{bc1,5lv5,0}$ apresentaram melhoras nos resultados de resistência à compressão quando comparados com os concretos $C_{bc3,0}$ e $C_{bc3,0lv10,0}$, em função das menores quantidades de fibras do bagaço da cana-de-açúcar existentes nas adições, diminuindo os prejuízos durante a compactação dos concretos e, conseqüentemente, nos valores de absorção de água e índice de vazios.

O teor das fibras em um compósito cimentício tende a aumentar a porosidade da matriz cimentícia, aumentando a absorção de água, enfraquecendo o material (TIAN e ZHANG, 2016, p. 237 a 250; PIASTA e ZARZYCKI, 2017, p. 402).

5.3.2.1 Análise estatística dos resultados da resistência a compressão aos 7 dias

Os resultados obtidos do tratamento estatístico ANOVA para os resultados de resistência à compressão aos 7 dias são apresentados na tabela 20.

Tabela 20 - Resultados do método ANOVA para a resistência a compressão aos 7 dias.

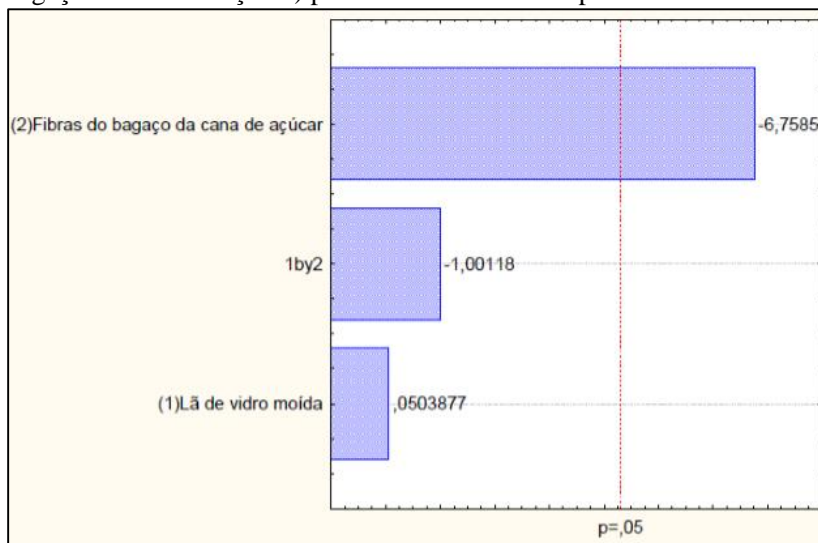
Fator	SS	df	MS	F	p
(1) Lã de vidro moída	0,0132	1	0,0132	0,00254	0,964393
(2) Fibras do bagaço da cana-de-açúcar	237,9306	1	237,9306	45,67767	0,021199
1 de 2	5,2212	1	5,2212	1,00237	0,422195
Erro	10,4178	2	5,2089		
Total SS	253,5829	5			
R-quadrado = 0,95892					

Fonte: Do autor (2018).

Analisando a tabela 20 percebe-se que somente o valor p do fator Fibras do bagaço da cana-de-açúcar apresenta um valor inferior a 0,05 (0,021199). Percebe-se também que esse fator apresentou o maior valor

F (45,67767), permitindo concluir que tal fator apresenta significância estatística. Já os fatores Lã de vidro moída e 1 by 2 (Lã de vidro moída com fibras do bagaço da cana-de-açúcar) apresentaram valores superiores a 0,05, permitindo concluir de que tais resultados não são significantes estatisticamente. A figura 48 apresenta o gráfico de Pareto dos três fatores buscando atingir os 95% de confiabilidade.

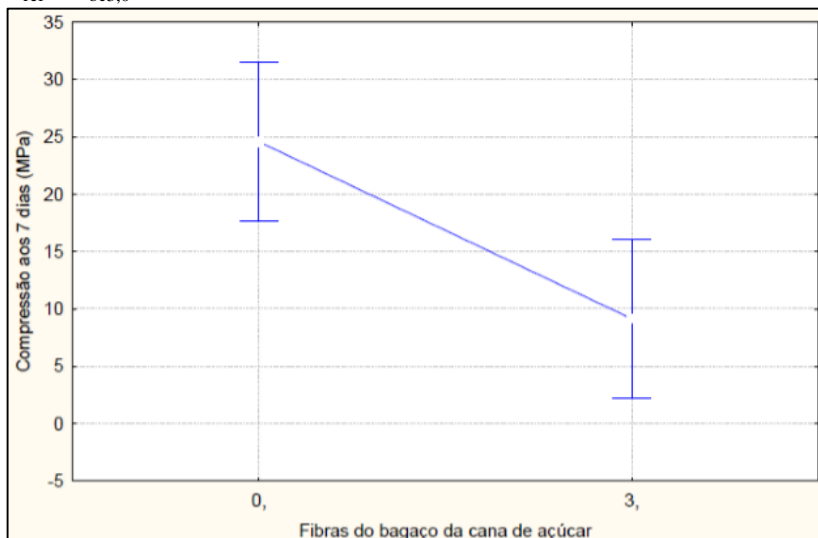
Figura 48 - Gráfico de Pareto dos fatores Lã de vidro moída, Fibras do bagaço da cana-de-açúcar e 1 by 2 (Lã de vidro moída com fibras do bagaço da cana-de-açúcar) para a resistência à compressão aos 7 dias.



Fonte: Do autor (2018).

Analisando a figura 48 percebe-se novamente que somente o fator Fibras do bagaço da cana-de-açúcar atinge o nível de 95% de confiabilidade. A figura 49 apresenta o gráfico *Means Plot* que representa a relação entre as médias dos resultados de compressão aos 7 dias dos concretos sem fibras (C_{ref}) e com 3,0% de fibras do bagaço da cana-de-açúcar ($C_{bc3,0}$).

Figura 49 - Gráfico de resistências médias à compressão dos concretos C_{ref} e $C_{bc3,0}$ aos 7 dias.



Fonte: Do autor (2018).

Analisando a figura 49 percebe-se a diminuição dos valores médios de resistência à compressão aos 7 dias dos concreto $C_{bc3,0}$ em relação ao concreto C_{ref} , de forma que os valores limites referentes ao desvio padrão de ambos não se sobrepõem, confirmando novamente a significância estatística dos resultados para 95% de confiabilidade.

5.3.2.2 Análise estatística dos resultados da resistência a compressão aos 28 dias

Os resultados obtidos do tratamento estatístico ANOVA para os resultados de resistência à compressão aos 28 dias são apresentados na tabela 21.

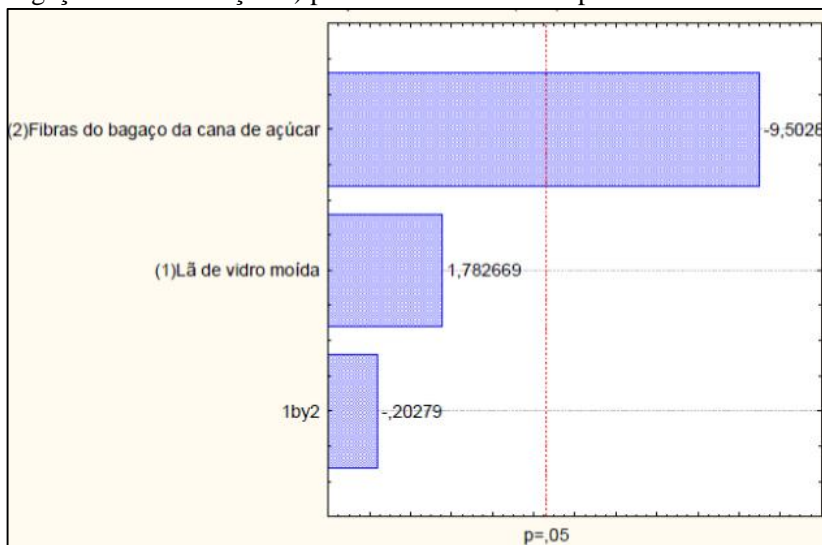
Tabela 21 - Resultados do método ANOVA para a resistência a compressão aos 28 dias.

Fator	SS	df	MS	F	p
(1) Lã de vidro moída	14,2884	1	14,2884	3,17791	0,216582
(2) Fibras do bagaço da cana-de-açúcar	406,0225	1	406,0225	90,30415	0,010893
1 de 2	0,1849	1	0,1849	0,04112	0,858057
Erro	8,9923	2	4,4962		
Total SS	429,4881	5			
R-quadrado = 0,97906					

Fonte: Do autor (2018).

Analisando a tabela 21 percebe-se que somente o valor p do fator Fibras do bagaço da cana-de-açúcar apresenta um valor inferior a 0,05 (0,010893). Percebe-se também que esse fator apresentou o maior valor F (90,30415), permitindo concluir que tal fator apresenta significância estatística. Já os fatores Lã de vidro moída e 1 by 2 (Lã de vidro moída com fibras do bagaço da cana-de-açúcar) apresentaram valores superiores a 0,05, permitindo concluir de que tais resultados não são significantes estatisticamente. A figura 50 apresenta o gráfico de Pareto dos três fatores buscando atingir os 95% de confiabilidade.

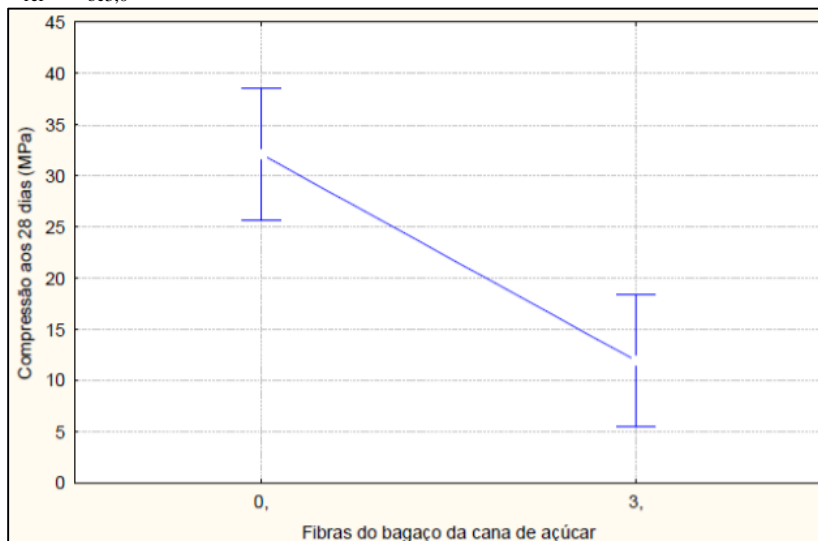
Figura 50 - Gráfico de Pareto dos fatores Lã de vidro moída, Fibras do bagaço da cana-de-açúcar e 1 by 2 (Lã de vidro moída com fibras do bagaço da cana-de-açúcar) para a resistência à compressão aos 28 dias.



Fonte: Do autor (2018).

Analisando a figura 50 percebe-se novamente que somente o fator Fibras do bagaço da cana-de-açúcar atinge o nível de 95% de confiabilidade. A figura 51 apresenta o gráfico *Means Plot* que representa a relação entre as médias dos resultados de compressão aos 28 dias dos concretos sem fibras (C_{ref}) e com 3,0% de fibras do bagaço da cana-de-açúcar ($C_{bc3,0}$).

Figura 51 - Gráfico de resistências médias à compressão dos concretos C_{ref} e $C_{bc3,0}$ aos 28 dias.



Fonte: Do autor (2018).

Analisando a figura 51 percebe-se a diminuição dos valores médios de resistência à compressão aos 28 dias dos concreto $C_{bc3,0}$ em relação ao concreto C_{ref} , de forma que os valores limites referentes ao desvio padrão de ambos não se sobrepõem, confirmando novamente a significância estatística dos resultados para 95% de confiabilidade.

5.3.2.3 Análise estatística dos resultados da resistência a compressão aos 56 dias

Os resultados obtidos do tratamento estatístico ANOVA para os resultados de resistência à compressão aos 56 dias são apresentados na tabela 22.

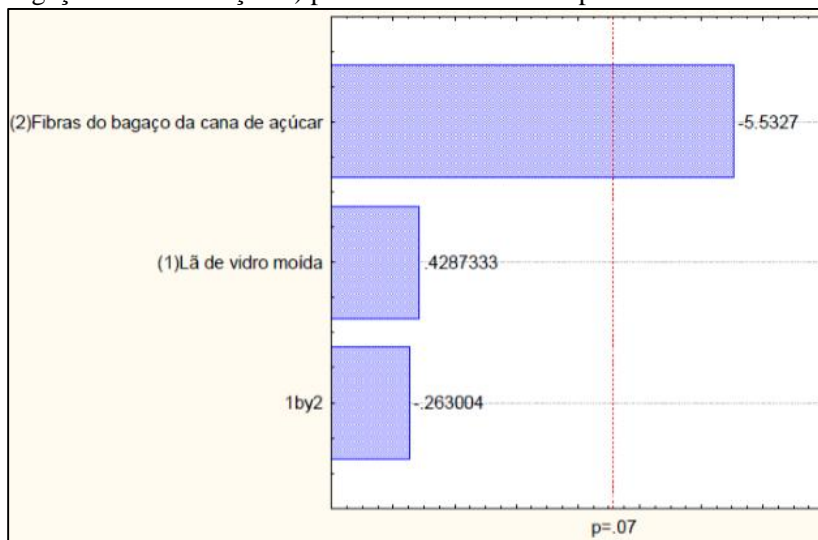
Tabela 22 - Resultados do método ANOVA para a resistência a compressão aos 56 dias.

Fator	SS	df	MS	F	p
(1) Lã de vidro moída	3,1862	1	3,1862	0,18381	0,709879
(2) Fibras do bagaço da cana-de-açúcar	530,6112	1	530,6112	30,61078	0,031150
1 de 2	1,1990	1	1,1990	0,06917	0,817163
Erro	34,6683	2	17,3341		
Total SS	569,6647	5			
R-quadrado = 0,93914					

Fonte: Do autor (2018).

Analisando a tabela 22 percebe-se que somente o valor p do fator Fibras do bagaço da cana-de-açúcar apresenta um valor inferior a 0,07 (0,031150). Percebe-se também que esse fator apresentou o maior valor F (30,61078), permitindo concluir que tal fator apresenta significância estatística. Já os fatores Lã de vidro moída e 1 by 2 (Lã de vidro moída com fibras do bagaço da cana-de-açúcar) apresentaram valores superiores a 0,07, permitindo concluir de que tais resultados não são significantes estatisticamente. A figura 52 apresenta o gráfico de Pareto dos três fatores buscando atingir os 93% de confiabilidade.

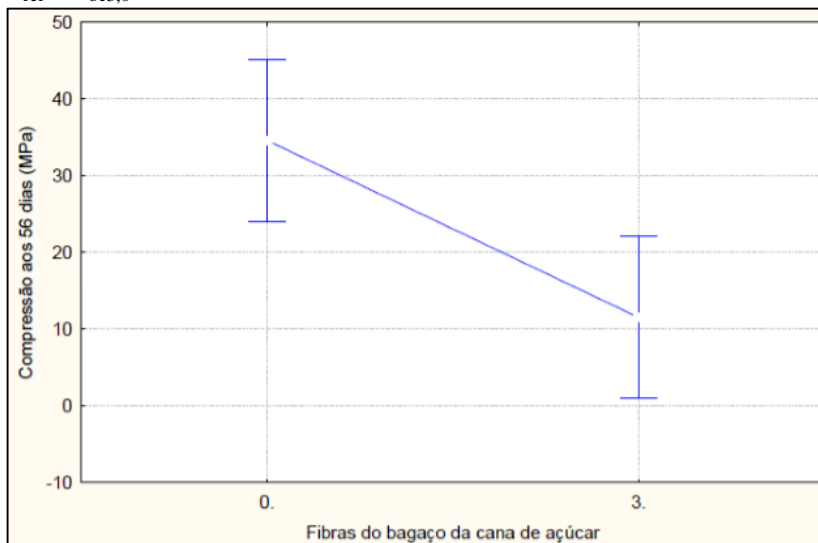
Figura 52 - Gráfico de Pareto dos fatores Lã de vidro moída, Fibras do bagaço da cana-de-açúcar e 1 by 2 (Lã de vidro moída com fibras do bagaço da cana-de-açúcar) para a resistência à compressão aos 56 dias.



Fonte: Do autor (2018).

Analisando a figura 52 percebe-se novamente que somente o fator Fibras do bagaço da cana-de-açúcar atinge o nível de 93% de confiabilidade. A figura 53 apresenta o gráfico *Means Plot* que representa a relação entre as médias dos resultados de compressão aos 56 dias dos concretos sem fibras (C_{ref}) e com 3,0% de fibras do bagaço da cana-de-açúcar ($C_{bc3,0}$).

Figura 53 - Gráfico de resistências médias à compressão dos concretos C_{ref} e $C_{bc3,0}$ aos 56 dias.



Fonte: Do autor (2018).

Analisando a figura 53 percebe-se a diminuição dos valores médios de resistência à compressão aos 56 dias dos concreto $C_{bc3,0}$ em relação ao concreto C_{ref} , de forma que os valores limites referentes ao desvio padrão de ambos não se sobrepõem, confirmando novamente a significância estatística dos resultados para 93% de confiabilidade.

5.3.3 Resistência de tração: por compressão diametral e por esforços de flexão

Os resultados obtidos dos ensaios de tração por compressão diametral e tração na flexão realizados nos concretos são apresentados na tabela 23.

Tabela 23 - Resistência de tração por compressão diametral e tração na flexão dos concretos aos 56 dias.

Tipo de concreto	Especificação	Tração por compressão diametral	Tração na flexão
C_{ref}	Média	15,62 MPa	5,70 MPa
	Desvio padrão	2,03 MPa	0,33 MPa
$C_{lv10,0}$	Média	16,44 MPa	6,65 MPa
	Desvio padrão	1,37 MPa	0,22 MPa
$C_{bc3,0}$	Média	10,5 MPa	4,30 MPa
	Desvio padrão	1,06 MPa	0,64 MPa
$C_{bc3,0lv10,0}$	Média	10,44 MPa	5,25 MPa
	Desvio padrão	1,94 MPa	0,15 MPa
$C_{bc1,5lv5,0}$	Média	14,7 MPa	6,02 MPa
	Desvio padrão	1,82 MPa	0,11 MPa
$C_{bc1,5lv5,0}$	Média	15,98 MPa	5,82 MPa
	Desvio padrão	1,28 MPa	0,32 MPa

Fonte: Do autor (2018).

Analisando a tabela 23 percebe-se que os concretos $C_{lv10,0}$ apresentaram os maiores valores de tração por compressão diametral (16,44 MPa) e tração na flexão (6,65 MPa). Seguindo as descrições de Passuelo et al. (2011, p. 1761 a 1767) onde as propagações de tensões na microestrutura do concreto ocorrem de forma mais intensa na zona de transição da interface entre o agregado graúdo e a pasta de cimento hidratado, se deduz que a menor absorção de água (4,15%) e índice de vazios (9,38%) dos concretos $C_{lv10,0}$ contribuíram para a maior resistência na interface entre o agregado graúdo e a pasta de cimento hidratada. Já os concretos $C_{bc3,0}$ e $C_{bc3,0lv10,0}$ apresentaram os menores valores de resistência de tração por compressão diametral ($C_{bc3,0} = 10,5$ MPa e $C_{bc3,0lv10,0} = 10,44$ MPa) e resistência de tração na flexão ($C_{bc3,0} = 4,30$ MPa e $C_{bc3,0lv10,0} = 5,25$ MPa) em função devido ao aumento da porosidade provocado pela adição das fibras. Os concretos $C_{bc1,5lv5,0}$ apresentaram valores de tração por compressão diametral (15,98 MPa) e tração na flexão (6,02 MPa) superiores aos valores dos concretos C_{ref} (tração por compressão diametral = 15,62 MPa e tração na flexão = 5,7 MPa). Além desses dois últimos tipos de concretos apresentarem valores de absorção de água ($C_{ref} = 6,01\%$ e $C_{bc1,5lv5,0} = 6,01\%$) e índice de vazios ($C_{ref} = 13,04\%$ e $C_{bc1,5lv5,0} = 12,99\%$) próximos, os concretos com 1,5%

de adições de fibras do bagaço da cana-de-açúcar podem ter contribuído para tais evoluções.

Zhan e Meschke (2013, p. 10 a 14) descrevem que as fibras no concreto podem aumentar a capacidade do mesmo em resistir a fendas de tração. As fibras adicionadas numa matriz de concreto, como as do bagaço da cana-de-açúcar, podem servir de ponte de transferência de tensões pelas fissuras, concentrando-as nas suas extremidades (PASSUELO et al., 2011, p. 1332; OLIVEIRA; GOUVEIA; TEIXEIRA, 2014, p. 1 a 6).

5.3.3.1 Análise estatística dos resultados da resistência a tração por compressão diametral

Os resultados obtidos do tratamento estatístico ANOVA para os resultados de resistência de tração por compressão diametral aos 56 dias são apresentados na tabela 24.

Tabela 24 - Resultados do método ANOVA para a resistência de tração por compressão diametral aos 56 dias.

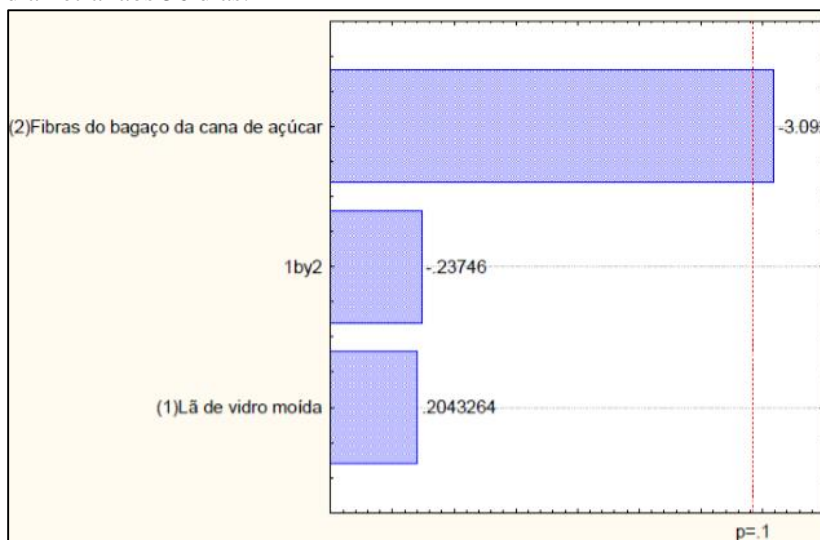
Fator	SS	df	MS	F	p
(1) Lã de vidro moída	0,13690	1	0,13690	0,041749	0,857004
(2) Fibras do bagaço da cana-de-açúcar	31,3600	1	31,360000	9,563600	0,090581
1 de 2	0,18490	1	0,18490	0,056387	0,834408
Erro	6,55820	2	3,27910		
Total SS	38,2400	5			
R-quadrado = 0,8285					

Fonte: Do autor (2018).

Analisando a tabela 24 percebe-se que somente o valor p do fator Fibras do bagaço da cana-de-açúcar apresenta um valor inferior a 0,10 (0,090581). Percebe-se também que esse fator apresentou o maior valor F (9,563600), possibilitando tal fator apresentar uma significância estatística. Porém, o valor de R-sqr (0,8285) é inferior a 0,90, o que pode servir de indícios que que tal significância pode não ocorrer. Já os fatores Lã de vidro moída e 1 by 2 (Lã de vidro moída com fibras do bagaço da

cana-de-açúcar) apresentaram valores superiores a 0,10, permitindo concluir de que tais resultados não são significantes estatisticamente. A figura 54 apresenta o gráfico de Pareto dos três fatores buscando atingir os 90% de confiabilidade.

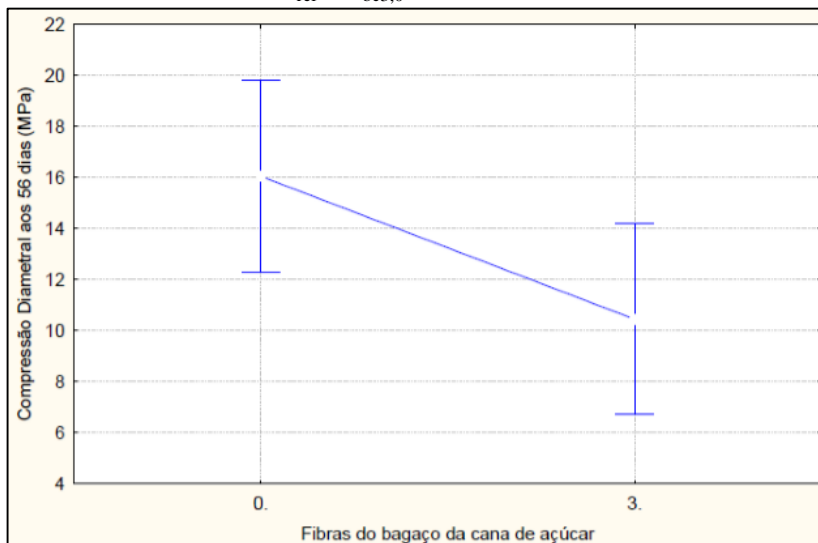
Figura 54 - Gráfico de Pareto dos fatores Lã de vidro moída, Fibras do bagaço da cana-de-açúcar e 1 by 2 (Lã de vidro moída com fibras do bagaço da cana-de-açúcar) para a resistência de tração por compressão diametral aos 56 dias.



Fonte: Do autor (2018).

Analisando a figura 54 percebe-se novamente que somente o fator Fibras do bagaço da cana-de-açúcar atinge o nível de 90% de confiabilidade. A figura 55 apresenta o gráfico *Means Plot* que representa a relação entre as médias dos resultados de tração por compressão diametral aos 56 dias dos concretos sem fibras (C_{ref}) e com 3,0% de fibras do bagaço da cana-de-açúcar ($C_{bc3,0}$).

Figura 55 - Gráfico de resistências médias de tração por compressão diametral dos concretos C_{ref} e $C_{bc3,0}$ aos 56 dias.



Fonte: Do autor (2018).

Analisando a figura 55 percebe-se a diminuição dos valores médios de resistência de tração por compressão diametral aos 56 dias dos concreto $C_{bc3,0}$ em relação ao concreto C_{ref} , ocorrendo uma sobreposição dos valores limites referentes ao desvio padrão para limites de confiabilidade de 90%, possibilitando concluir problemas com a significância estatística dos resultados de tração por compressão diametral aos 56 dias com o fator Fibras do bagaço da cana-de-açúcar.

5.3.3.2 Análise estatística dos resultados da resistência a tração na flexão

Os resultados obtidos do tratamento estatístico ANOVA para os resultados de resistência de tração na flexão aos 56 dias são apresentados na tabela 25.

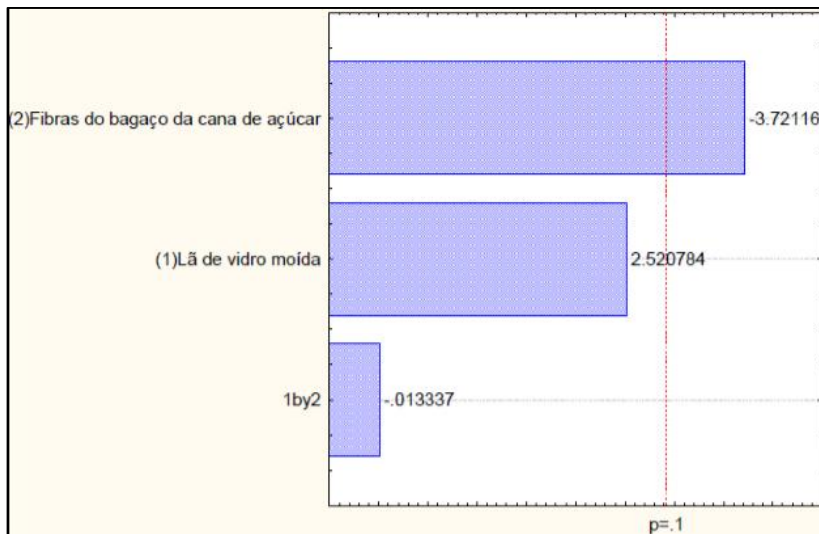
Tabela 25 - Resultados do método ANOVA para a resistência de tração na flexão aos 56 dias.

Fator	SS	df	MS	F	p
(1) Lã de vidro moída	0,893025	1	0,893025	6,35435	0,127874
(2) Fibras do bagaço da cana-de-açúcar	1,946025	1	1,946025	13,84702	0,065231
1 de 2	0,000025	1	0,000025	0,00018	0,990569
Erro	0,281075	2	0,140537		
Total SS	3,120150	5			
R-quadrado = 0,90992					

Fonte: Do autor (2018).

Analisando a tabela 25 percebe-se que somente o valor p do fator Fibras do bagaço da cana-de-açúcar apresenta um valor inferior a 0,10 (0,065231). Percebe-se também que esse fator apresentou o maior valor F (13,84702), possibilitando tal fator apresentar uma significância estatística. Já os fatores Lã de vidro moída e 1 by 2 (Lã de vidro moída com fibras do bagaço da cana-de-açúcar) apresentaram valores superiores a 0,10, permitindo concluir de que tais resultados não são significantes estatisticamente. A figura 56 apresenta o gráfico de Pareto dos três fatores buscando atingir os 90% de confiabilidade.

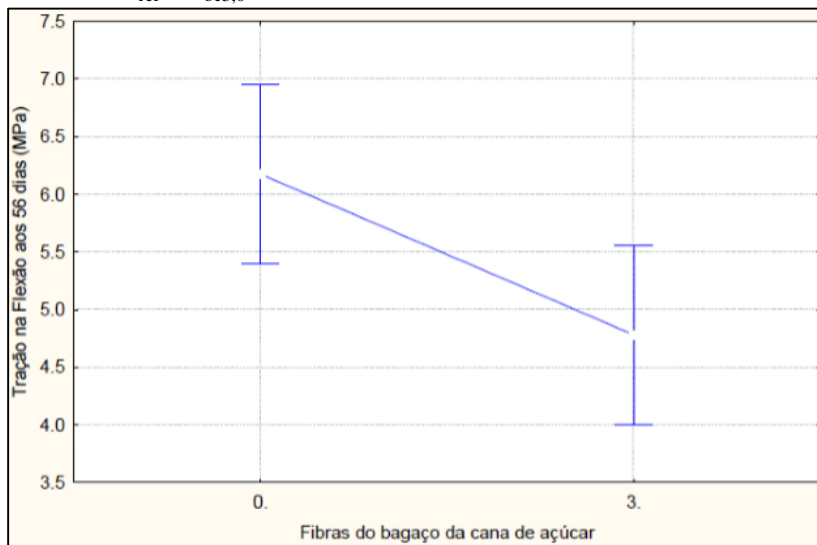
Figura 56 - Gráfico de Pareto dos fatores Lã de vidro moída, Fibras do bagaço da cana-de-açúcar e 1 by 2 (Lã de vidro moída com fibras do bagaço da cana-de-açúcar) para a resistência de tração na flexão aos 56 dias.



Fonte: Do autor (2018).

Analisando a figura 56 percebe-se novamente que somente o fator Fibras do bagaço da cana-de-açúcar atinge o nível de 90% de confiabilidade. A figura 57 apresenta o gráfico *Means Plot* que representa a relação entre as médias dos resultados de tração na flexão aos 56 dias dos concretos sem fibras (C_{ref}) e com 3,0% de fibras do bagaço da cana-de-açúcar ($C_{bc3,0}$).

Figura 57 - Gráfico de resistências médias de tração na flexão dos concretos C_{ref} e $C_{bc3,0}$ aos 56 dias.



Fonte: Do autor (2018).

Analisando a figura 57 percebe-se a diminuição dos valores médios de resistência de tração na flexão aos 56 dias dos concreto $C_{bc3,0}$ em relação ao concreto C_{ref} , ocorrendo uma sobreposição dos valores limites referentes ao desvio padrão para limites de confiabilidade de 90%, possibilitando concluir problemas com a significância estatística dos resultados de tração na flexão aos 56 dias com o fator Fibras do bagaço da cana-de-açúcar.

5.3.4 Módulo de elasticidade

Os resultados obtidos dos ensaios de módulo de elasticidade realizados nos concretos são apresentados na tabela 26.

Tabela 26 - Módulo de elasticidade dos concretos aos 56 dias.

Tipo de concreto	Especificação	Módulo de Elasticidade
C_{ref}	Média	33,56 GPa
	Desvio padrão	0,43 GPa
$C_{lv10,0}$	Média	35,98 GPa
	Desvio padrão	0,98 GPa
$C_{bc3,0}$	Média	22,57 GPa
	Desvio padrão	3,00 GPa
$C_{bc3,0lv10,0}$	Média	17,57 GPa
	Desvio padrão	2,01 GPa
$C_{bc1,5lv5,0}$	Média	29,544 GPa
	Desvio padrão	1,20 GPa
$C_{bc1,5lv5,0}$	Média	31,36 GPa
	Desvio padrão	0,68 GPa

Fonte: Do autor (2018).

Analisando a tabela 26 percebe-se que o maior resultado do módulo de elasticidade também foi obtido com os concretos $C_{lv10,0}$ (35,98 GPa). Esse concreto apresentou também a maior massa específica aparente seca ($2,26 \text{ g/cm}^3$) quando comparada com os demais concretos produzidos, o que contribui para o aumento do módulo de elasticidade, tornando-o mais rígido.

A NBR 6118 (2014, p. 24) apresenta expressões para o cálculo do módulo de elasticidade que tendem a aumentar com o aumento da resistência à compressão do concreto. Borges (2007, p. 96 a 105) relacionou os maiores valores de módulo de elasticidade com os maiores resultados de massa específica aparente seca. No seu estudo, os concretos com 10,0% de adição de lã de vidro pulverizada, apresentaram valores de módulo de elasticidade e massa específica aparente seca iguais a 27,5 GPa e $2,304 \text{ kg/dm}^3$ respectivamente. Já os concretos sem adição de lã de vidro pulverizada apresentaram valores de módulo de elasticidade e massa específica aparente seca iguais a 22,7 GPa e $2,281 \text{ kg/dm}^3$ respectivamente. Os concretos $C_{bc3,0}$ e $C_{bc3,0lv10,0}$ apresentaram reduções nos seus valores de módulo de elasticidade ($C_{bc3,0} = 22,57 \text{ GPa}$ e $C_{bc3,0lv10,0} = 17,57 \text{ GPa}$) em função das diminuições nos valores de massa específica aparente seca ($C_{bc3,0} = 2,02 \text{ GPa}$ e $C_{bc3,0lv10,0} = 2,03 \text{ GPa}$). Por

fim, os concretos $C_{bc1,5lv5,0}$ tiveram aumento dos seus valores de módulo de elasticidade (29,54 GPa e 31,36 GPa) quando comparados com os concretos $C_{bc3,0}$ e $C_{bc3,0lv10,0}$. Isso se deve pelos maiores valores de massa específica aparente seca (2,14 g/cm³ e 2,16 g/cm³).

5.3.4.1 Análise estatística dos resultados do módulo de elasticidade

Os resultados obtidos do tratamento estatístico ANOVA para os resultados do módulo de elasticidade aos 56 dias são apresentados na tabela 27.

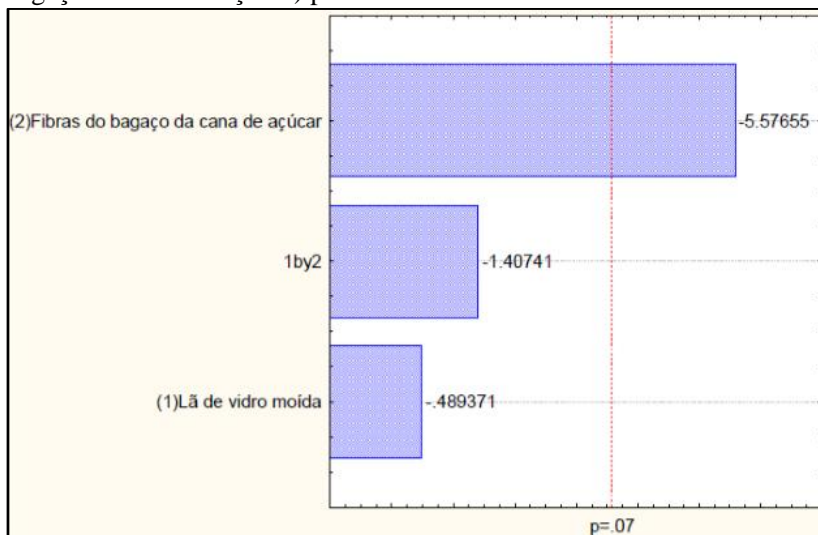
Tabela 27 - Resultados do método ANOVA para o módulo de elasticidade aos 56 dias.

Fator	SS	df	MS	F	p
(1) Lã de vidro moída	1,6641	1	1,6641	0,23948	0,672988
(2) Fibras do bagaço da cana-de-açúcar	216,0900	1	216,0900	31,09790	0,030684
1 de 2	13,7641	1	13,7641	1,98082	0,294599
Erro	13,8974	2	6,9487		
Total SS	245,4156	5			
R-quadrado = 0,94337					

Fonte: Do autor (2018).

Analisando a tabela 27 percebe-se que somente o valor p do fator Fibras do bagaço da cana-de-açúcar apresenta um valor inferior a 0,07 (0,030684). Percebe-se também que esse fator apresentou o maior valor F (31,09790), possibilitando tal fator apresentar uma significância estatística. Já os fatores Lã de vidro moída e 1 by 2 (Lã de vidro moída com fibras do bagaço da cana-de-açúcar) apresentaram valores superiores a 0,07, permitindo concluir de que tais resultados não são significantes estatisticamente. A figura 58 apresenta o gráfico de Pareto dos três fatores buscando atingir os 93% de confiabilidade.

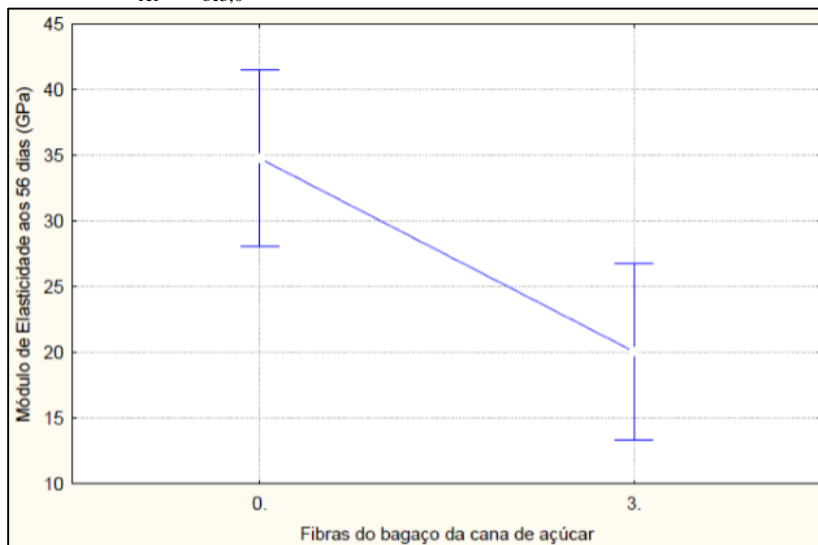
Figura 58 - Gráfico de Pareto dos fatores Lã de vidro moída, Fibras do bagaço da cana-de-açúcar e 1 by 2 (Lã de vidro moída com fibras do bagaço da cana-de-açúcar) para o módulo de elasticidade aos 56 dias.



Fonte: Do autor (2018).

Analisando a figura 58 percebe-se novamente que somente o fator Fibras do bagaço da cana-de-açúcar atinge o nível de 93% de confiabilidade. A figura 59 apresenta o gráfico *Means Plot* que representa a relação entre as médias dos resultados do módulo de elasticidade aos 56 dias dos concretos sem fibras (C_{ref}) e com 3,0% de fibras do bagaço da cana-de-açúcar ($C_{bc3,0}$).

Figura 59 - Gráfico de valores médios do módulo de elasticidade dos concretos C_{ref} e $C_{bc3,0}$ aos 56 dias.



Fonte: Do autor (2018).

Analisando a figura 59 percebe-se a diminuição dos valores médios do módulo de elasticidade aos 56 dias dos concreto $C_{bc3,0}$ em relação ao concreto C_{ref} , de forma que os valores limites referentes ao desvio padrão de ambos não se sobrepõem, confirmando novamente a significância estatística dos resultados para 93% de confiabilidade.

5.3.5 Coeficiente de dilatação térmica linear

Os resultados obtidos do coeficiente de dilatação térmica linear dos concretos produzidos neste trabalho são apresentadas na tabela 28.

Tabela 28 - Coeficiente de dilatação térmica linear dos concretos após 56 dias.

Tipo de concreto	Especificação	Coeficiente de dilatação térmica linear
C_{ref}	Média	0,004014 mm/°C
	Desvio padrão	0,0004544 mm/°C
$C_{lv10,0}$	Média	0,004452 mm/°C
	Desvio padrão	0,0005320 mm/°C
$C_{bc3,0}$	Média	0,003846 mm/°C
	Desvio padrão	0,0002078 mm/°C
$C_{bc3,0lv10,0}$	Média	0,003499 mm/°C
	Desvio padrão	0,0008389 mm/°C
$C_{bc1,5lv5,0}$	Média	0,003759 mm/°C
	Desvio padrão	0,0003738 mm/°C
$C_{bc1,5lv5,0}$	Média	0,003714 mm/°C
	Desvio padrão	0,0003816 mm/°C

Fonte: Do autor (2018).

Analisando a tabela 28 percebe-se que o concreto $C_{bc3,0lv10,0}$ apresentou o menor resultado do coeficiente de dilatação térmica linear (0,003499 mm/°C). Esse resultado está relacionado ao fato de que o concreto $C_{bc3,0lv10,0}$ junto com o concreto $C_{bc3,0}$ apresenta um maior valor de índice de vazios (19,43%) dentre os concretos estudados. Os demais concretos do adições de fibras do bagaço da cana-de-açúcar $C_{bc3,0}$ e $C_{bc1,5lv5,0}$ tiveram seus resultados de coeficiente de dilatação térmica linear respectivamente iguais a 0,003846 mm/°C, 0,003759 mm/°C e 0,003714 mm/°C, sendo também inferiores aos valores correspondentes dos concretos C_{ref} (0,004014 mm/°C) e $C_{lv10,0}$ (0,004452 mm/°C). Esses últimos resultados também podem ser explicados pelo índice de vazios já que os concretos $C_{bc3,0}$ e $C_{bc1,5lv5,0}$ apresentaram valores de índices de vazios iguais, respectivamente, a 19,63% e 13,51%, sendo superiores aos valores obtidos dos concretos C_{ref} (13,04%) e $C_{lv10,0}$ (9,38%).

Nestes espaços vazios, ocorre a acomodação da expansão térmica linear interna do material, reduzindo o coeficiente de expansão térmica linear do material (Abd. El. Aleem, Heikal e Morsi, (2014, p. 158).

5.3.5.1 Análise estatística dos resultados do coeficiente de dilatação térmica linear

Os resultados obtidos do tratamento estatístico ANOVA para os resultados do coeficiente de dilatação térmica linear após os 56 dias são apresentados na tabela 29.

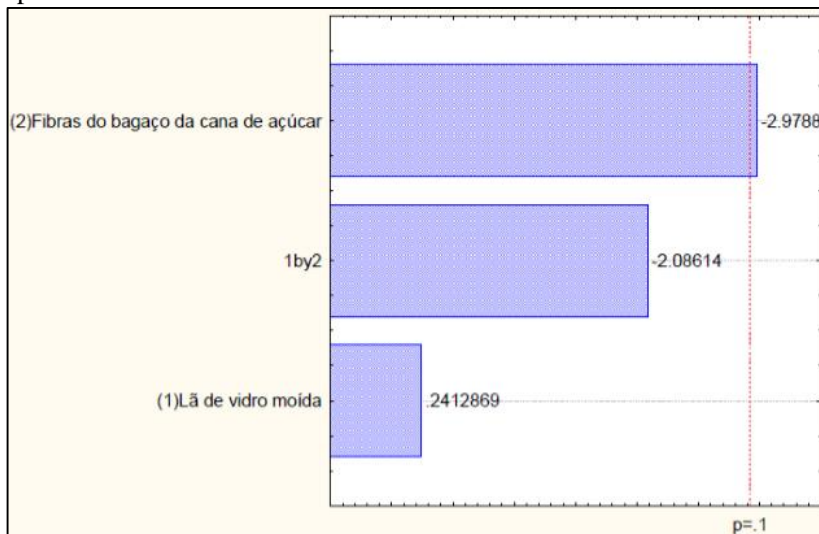
Tabela 29 - Resultados do método ANOVA para o coeficiente de dilatação térmica linear após os 56 dias.

Fator	SS	df	MS	F	p
(1) Lã de vidro moída	0,000000	1	0,000000	0,058219	0,831815
(2) Fibras do bagaço da cana-de-açúcar	0,000000	1	0,000000	8,873535	0,096636
1 de 2	0,000000	1	0,000000	4,351969	0,172270
Erro	0,000000	2	0,000000		
Total SS	0,000001	5			
R-quadrado = 0,86914					

Fonte: Do autor (2018).

Analisando a tabela 29 percebe-se que somente o valor p do fator Fibras do bagaço da cana-de-açúcar apresenta um valor inferior a 0,10 (0,096636). Percebe-se também que esse fator apresentou o maior valor F (8,873535), possibilitando tal fator apresentar uma significância estatística. Porém, o valor de R-sqr (0,86914) é inferior a 0,90, o que pode servir de indícios que tal significância pode não ocorrer. Já os fatores Lã de vidro moída e 1 by 2 (Lã de vidro moída com fibras do bagaço da cana-de-açúcar) apresentaram valores superiores a 0,10, permitindo concluir de que tais resultados não são significantes estatisticamente. A figura 60 apresenta o gráfico de Pareto dos três fatores buscando atingir os 90% de confiabilidade.

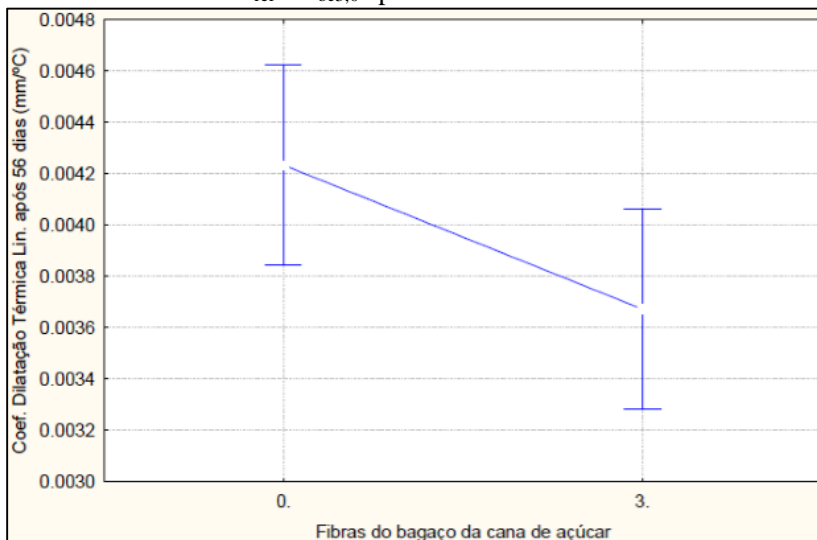
Figura 60 - Gráfico de Pareto dos fatores Lã de vidro moída, Fibras do bagaço da cana-de-açúcar e 1 by 2 (Lã de vidro moída com fibras do bagaço da cana-de-açúcar) para o coeficiente de dilatação térmica linear após os 56 dias.



Fonte: Do autor (2018).

Analisando a figura 60 percebe-se novamente que somente o fator Fibras do bagaço da cana-de-açúcar atinge o nível de 90% de confiabilidade. A figura 61 apresenta o gráfico *Means Plot* que representa a relação entre as médias dos resultados do coeficiente de dilatação térmica após os 56 dias dos concretos sem fibras (C_{ref}) e com 3,0% de fibras do bagaço da cana-de-açúcar ($C_{bc3,0}$).

Figura 61 - Gráfico de valores médios do coeficiente de dilatação térmica linear dos concretos C_{ref} e $C_{bc3,0}$ após os 56 dias.



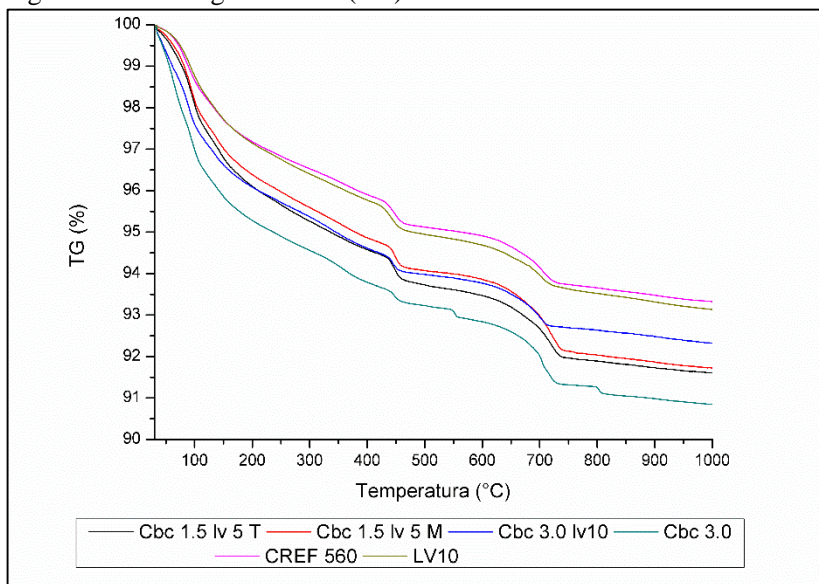
Fonte: Do autor (2018).

Analisando a figura 61 percebe-se a diminuição dos valores médios do coeficiente de dilatação térmica linear após os 56 dias dos concreto $C_{bc3,0}$ em relação ao concreto C_{ref} , ocorrendo uma sobreposição dos valores limites referentes ao desvio padrão para limites de confiabilidade de 90%, possibilitando concluir problemas com a significância estatística dos resultados do coeficiente de dilatação térmica linear após os 56 dias com o fator Fibras do bagaço da cana-de-açúcar.

5.4 TERMOGRAVIMETRIA DOS CONCRETOS

Os resultados obtidos dos ensaios de termogravimetria realizados nas amostras de concreto são apresentados na figura 62.

Figura 62 - Termogravimetria (TG) das amostras de concreto.



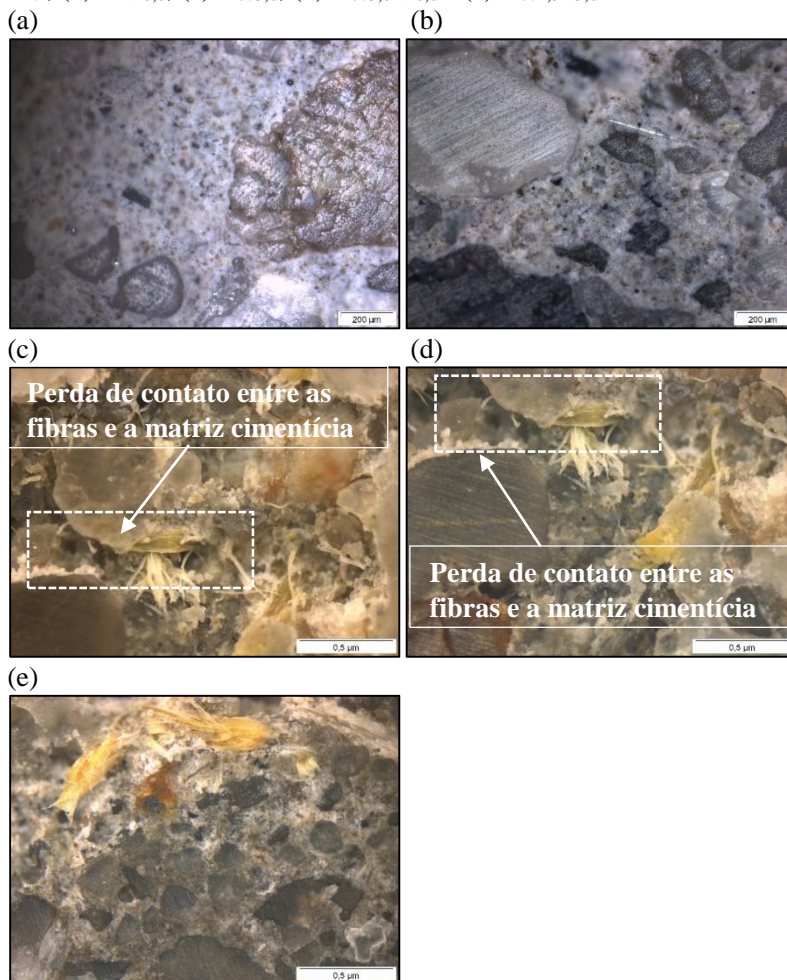
Fonte: Do autor (2018).

Analisando a figura 62 percebe-se que os concretos com adições de fibras ($C_{bc3,0}$, $C_{bc3,0lv10,0}$ e $C_{bc1,5lv5,0}$) tiveram maiores valores de perda de massa com a variação de temperatura. Isso pode ser explicado em função da decomposição da celulose existente no bagaço da cana-de-açúcar. Analisando as perdas de massa dos concretos C_{ref} e $C_{lv10,0}$ percebe-se semelhanças entre os resultados, principalmente entre as temperaturas de 400°C a 520°C. Silva, Roman e Gleize (2002, p. 1385) e Shui et al. (2010, p. 1766) afirmam que entre essas faixas de temperatura ocorrem as perdas de massa com a desidratação do hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), possibilitando a determinação do conteúdo deste. Como os resultados apresentaram semelhanças entre essas perdas de massa, afirma-se que o conteúdo de hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) com a adição de lã de vidro moída não foi alterada, o que não beneficia a redução do coeficiente de expansão térmica linear.

5.5 MICROSCOPIA ÓPTICA DOS CONCRETOS

Os resultados obtidos da microscopia óptica realizada em amostras dos concretos C_{ref} , $C_{lv10,0}$, $C_{bc3,0}$, $C_{bc3,0lv10,0}$ e $C_{bc1,5lv5,0}$ são apresentados nas figuras 63 de (a) a (e).

Figura 63 - Imagens da microscopia óptica realizada nos concretos (a) C_{ref} , (b) $C_{lv10,0}$, (c) $C_{bc3,0}$, (d) $C_{bc3,0lv10,0}$ e (e) $C_{bc1,5lv5,0}$.



Fonte: Do autor (2018).

As figuras 63(a) (C_{ref}) e 63(b) ($C_{lv10,0}$) apresentam semelhanças na microestrutura dos concretos em termos de porosidade. As figuras 63(c) e 63(d) apresentam sinais de porosidade existentes na interface entre as fibras do bagaço da cana-de-açúcar com os constituintes do concreto, perdendo contato com a matriz cimentícia. Essas imagens coincidem com as descrições de Onésippe et al. (2010, p. 549 a 556) e Tian e Zhang (2016, p. 237 a 250) onde os autores citam que a adição das fibras causam aumento da porosidade da matriz cimentícia, fazendo com que essas percam contato entre si, provocando perdas de calor específico que podem diminuir os valores de resistência à compressão, módulo de Young e resistência a tração. Tal situação contribui também para a diminuição dos valores do coeficiente de expansão térmica linear dos concretos. A figura 63(e) apresenta imagem do concreto $C_{bc1,5lv5,0}$ que pelo fato de ter em sua constituição teores 1,5% de adição das fibras do bagaço da cana-de-açúcar, apresenta menores sinais de porosidade quando comparados com os concretos $C_{bc3,0}$ e $C_{bc3,0lv10,0}$.

6 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos desta pesquisa, conclui-se que:

- A presença somente da lã de vidro nos concretos contribuiu para a redução da porosidade destes, devido à sua granulometria ser inferior ao apresentado pelo agregado miúdo, o que promoveu o preenchimento de espaços vazios. Essa redução de porosidade contribuiu para o aumento da impermeabilidade dos concretos;
- A redução da porosidade obtida nos concretos com a adição exclusiva da lã de vidro contribuiu também para o aumento dos valores médios de resistência mecânica. Já os concretos com a adição das fibras do bagaço da cana-de-açúcar tiveram uma redução na resistência mecânica ocasionado pelo aumento da porosidade;
- O aumento da porosidade nos concretos com a adição de fibras do bagaço da cana-de-açúcar ocorreu em função dos prejuízos gerados durante os processos de compactação. Tais prejuízos ocorreram em função da restrição da mobilidade gerada, reduzindo também sua consistência;
- As fibras do bagaço da cana-de-açúcar não promoveram a ponte de transferência de tensões internas dos concretos, impossibilitando o aumento dos valores de resistência à tração na flexão e tração por compressão diametral;
- O aumento dos poros dos concretos contribuíram para a melhor expansão térmica interna dos seus constituintes, fazendo com que os concretos com a adição das fibras do bagaço da cana-de-açúcar reduzissem seus valores médios do coeficiente de expansão térmica linear. Por outro lado, a redução da porosidade promovida pela presença da lã de vidro, promoveu o aumento do coeficiente de expansão dos concretos.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir das conclusões obtidas desta pesquisa, sugere-se os seguintes trabalhos futuros:

- Avaliar a adição das fibras do bagaço da cana-de-açúcar em misturas de concreto contendo aditivos plastificantes em sua constituição, que contribuam para ganhos de consistência e compactação;
- Estudar o comportamento de concretos com fibras naturais híbridas (combinação de duas ou mais fibras naturais com outras metodologias de moagem) com comprimentos variados;
- Estudar o comportamento de concretos com fibras naturais, utilizando brita nº1 em sua composição.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABD.EL.ALEEM, S; HEIKAL, Mohamed; MORSI, W. M.. Hydration Characteristic, Thermal Expansion and Microstructure of Cement Containing Nano-Silica. **Construction and Building Materials**, Egypt, v. 59, p. 151-160, 15 mar. 2014;

ABRISHAMBAF, Amin; PIMENTEL, Mário; NUNES, Sandra. Influence of Fibre Orientation on the Tensile Behaviour of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Cementitious Composites. **Cement and Concrete Research**, Portugal, v. 97, p. 28-40, 23 mar. 2017;

AHMED, Akil et al.. Evaluating the Co-Relationship between Concrete Flexural Tensile Strength and Compressive Strength Mohd . **Journal Structural Engineering**, Saudi Arabia, v. 5, n. 2, p. 118, 2014;

ALVES, Joner Oliveira. **Processo de reciclagem da escória de aciaria e do resíduo de corte do granito visando a produção de lâ mineral**. 2008. 116 f. Dissertação (Mestrado de Engenharia dos Materiais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008;

ASKELAND, Donald R.; FULAY, P. Pradeep; WRIGHT, Wendelin J. **The science and Engineering of Materials**. 6ª edição. Stamford: CENGAGE Learning, 2010;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo, 2015. 92 p.;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento - Procedimentos. Rio de Janeiro, 2015. 23 p.;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009. 11 p.;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004**: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004. 77 p.;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015. 9 p.;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12815**: Concreto endurecido – Determinação do coeficiente de dilatação térmica linear – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012. 3 p.;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998. 8 p.;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009. 4 p.;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007. 9 p.;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12142**: Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010. 5 p.;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2011. 5 p.;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008. 16 p.;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12816**: Concreto endurecido – Determinação da capacidade de

deformação de concreto submetido à tração na flexão – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012. 5 p.;

AYDIN, Ferhat. Experimental investigation of thermal expansion and concrete strength effects on FRP bars behavior embedded in concrete. **Construction and Building Materials**, Turkey, v. 163, p. 1-8, 11 dec. 2017;

BATOG, M.; GIERGICZNY, Z.. Influence of mass concrete constituents on its properties. **Construction and Building Materials**, Poland, v. 146, p. 221-230, 10 apr. 2017;

BATTAGIN, Inês Laranjeira da Silva. **Módulo de elasticidade do concreto: Como analisar e especificar**. 2007. Disponível em: <<http://docplayer.com.br/4845411-Modulo-de-elasticidade-do-concreto-como-analisar-e-especificar-eng-a-ines-laranjeira-da-silva-battagin-superintendente-do-abnt-cb-18.html>>. Acesso em: 17 jun. 2017;

BILBA, K.; ARSÈNE, M.; OUENSANGA, A.. Sugar cane bagasse fibre reinforced cement composites. Part I. Influence of the botanical components of bagasse on the setting of bagasse/cement composite. **Cement and Concrete Composites**, France, v. 25, nº 1, p. 91–96, 18 mai. 2003;

BOFANG, Z.. **Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete**. 1. Ed. Waltham: ELSEVIER, 2014;

BORGES, Paulo Roberto. **Utilização de resíduo de lã de vidro em fabricação de concreto**. 2007. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia dos Materiais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007;

CALLISTER JUNIOR, William D.; RETHWISCH, David G.. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015;

CERPOLO. **Reciclagem de lã de vidro**. 2014. Disponível em: <<http://cerpolo.com.br/blog/reciclagem-la-vidro/>>. Acesso em: 06 fev. 2014;

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar**. Brasília, 2013;

CHENG, A.; WEI-TING, L.; HUANG, R. Application of rock wool waste in cement-based composites. **Materials and Design**, Taiwan, v. 32, p. 636-642, 12 ago. 2011;

CHEUNG, Hoi-yan et al.. Natural fibre-reinforced composites for bioengineering and environmental engineering applications. **Composites: Part B**, China, v. 40, p. 655-663, 21 abr. 2009;

EL-TAYEB, N. Abrasive wear performance of untreated SCF reinforced polymer composite. **Journal of Materials Processing Technology**. Malaysia, v. 206, p. 305-314, 9 dez. 2008;

FERREIRA, Sávio de Siqueira. **Estudo do transcriptoma de genótipos ancestrais de cana-de-açúcar com enfoque em genes do metabolismo de parede celular**. 2013. 277 f. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas (bioquímica)) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013;

FIGUEIREDO, A. D.; CECCATO, M. R.; TORNERI, P. Influência do comprimento da fibra no desempenho do concreto reforçado com fibras de aço. 39º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 39, 1997, São Paulo. **Anais do 39º Congresso Brasileiro do concreto**. São Paulo: IBRACON, 1997, p. 347-356;

FRANÇA, Alessandra A. V. et al. Patologia das construções: uma especialidade na engenharia civil. **Téchne: A Revista do Engenheiro Civil**, São Paulo, n. 174, p.72-77, set. 2011;

GARCÍA-ALONSO, et al.. Corrosion behaviour of new stainless steels reinforcing bars embedded in concrete. **Cement and Concrete Research**, Spain, v. 37, p.1463–1471, 4 jun. 2007;

GLEIZE, P. et al. Efeitos do ar incorporado nas propriedades do estado endurecido em argamassas de cimento e areia. 51º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, Curitiba. **Anais do 51º Congresso Brasileiro do Concreto**. Curitiba: IBRACON, 2009. p. 10-14;

GOUVEIA, Nelson. Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão

social. **Ciência e Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 17, n. 6, p. 1503-1510, jun. 2012;

GURGEL, Leandro Vinicius Alves . **Mercurização e modificação química de celulose e bagaço de cana-de-açúcar com anidrido succínico e trietilenotetramina: Preparação de novo materiais quelantes para a adsorção de Pb (II), Cd (II), Cr (VI) e Cu (II)**. 2007. 203 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Ouro Preto. 2007.

HELENE, Paulo; TERZIAN, Paulo. **Manual de Dosagem e Controle de Concreto**. 1ª ed. São Paulo: Pini, 1992;

HOSSAIN, Mohammad K. et al.. Comparative mechanical and thermal study of chemically treated and untreated single sugarcane fiber bundle. **Industrial Crops and Products**, United States, v. 58, p. 78-90, 6 abr. 2014;

HUANG, Z. et al.. Effect of mechanical activation pretreatment on the properties of sugarcane bagasse/poly(vinyl chloride) composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, China, v. 43, p. 114 – 120, 28 set. 2012;

ISOVER. **Destino de resíduos de lã de vidro** - Saint-Gobain Vidros S.A., Divisão Isover. 2007. Disponível em: <http://www.isover.com.br/isover/sigi_residuos.htm > Acessado em 15 mar 2017;

JAWAID, M.; KHALIL, HPSA. Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review. **Carbohydrate Polymers**, Malaysia, v. 86, p. 1-18, 28 abr. 2011;

LEE, Jong-Han; BAIKSOON, Cho; CHOI, Eunsoo. Flexural Capacity of Fiber Reinforced Concrete with a Consideration of Concrete Strength and Fiber Content. **Construction and Building Materials**, Seoul, Republic of Korea, v. 138, p. 222-231, 25 jan. (2017);

LEVY NETO, Flaminio; PARDINI, Luiz Claudio. **COMPÓSITOS ESTRUTURAIS: CIÊNCIA E TECNOLOGIA**. 1ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2006;

- LIN, Wei-Ting et al.. Improved Microstructure of Cement-Based Composites through the Addition of Rock Wool Particles. **Materials Characterization**, Taiwan, v. 84, p. 1-9, 17 jun. 2013;
- LOH, Y. R. et al. Review Sugarcane Bagasse - The Future Composite Material: A Literature Review. **Resources, Conservation and Recycling, Malaysia**, v. 75, p. 14-22, 6 mar. 2013;
- LU, Ian-xin; DUAN, Zhen-hua; POON, Chi Sun. Combined Use of Waste Glass Powder and Cullet in Architectural Mortar. **Cement and Concrete Composites**, Hong Kong, v. 82, p. 34-44, 26 mai. 2017;
- LUOTO, K. et al. Dissolution of short and long rockwool and glasswool fibers by macrophages in flowthrough cell culture. **Environmental Research Section**, Finland, v. 78, p. 25-37, 7 jul. 1998;
- MARCELLI, Mauricio. **Sinistros na Construção Civil: causas e soluções para danos e prejuízos em obras**. 1ª edição. São Paulo: Pini, 2007;
- MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de; HELENE, Paulo. Durabilidade e proteção do concreto armado. **Téchne: A Revista do Engenheiro Civil**, São Paulo, n. 151, p.50-54, out. 2009;
- MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M.. **Concreto - Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2014;
- MERAH, A.; KROBBA, B. Effect of the carbonatation and the type of cement (CEM I, CEM II) on the ductility and the compressive strength of concrete. **Construction and Building Materials**, Argélia, v. 148, p. 874–886, 9 mai. 2017;
- MENDES, FM; et al.. Topochemical characterization of sugar cane pretreated with alkaline sulfite. **Industrial Crops and Products**, Brasil, v. 69, p. 60-67, 31 jan. 2015;
- MOUBARIK, A.; GRIMI, N.; BOUSSETTA, N. Structural and thermal characterization of Moroccan sugar cane bagasse cellulose fibers and their applications as a reinforcing agent in low density polyethylene. **Composites: Part B**, Morocco, v. 52, p. 233-238, 19 abr. 2013;

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA. **Cana-de-açúcar**. 2017. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-de-acucar>>. Acesso em: 01 fev. 2017;

NEVILLE, Adam M. **PROPRIEDADES DO CONCRETO**. 5. ed. São Paulo: Pini, 2016. 888 p.;

NOVACANA. **Como é feito o processamento da cana-de-açúcar nas usinas**. Disponível em: <<https://www.novacana.com/usina/como-e-feito-processamento-cana-de-acucar/>>. Acesso em: 12 jun. 2017;

OLIVEIRA, Carlos Augusto de Souza; GOUVEIA, Leonardo Lúcio de Araújo; TEIXEIRA, Ricardo Luiz Perez. Concreto estrutural com adição de fibras vegetais. **Construindo**, Belo Horizonte, v. 6, n. 2, p.14-19, dez. 2014;

ONÉSIPPE, C.; et al.. Sugar cane bagasse fibres reinforced cement composites: Thermal considerations. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, Colombia, v. 41, nº 4, p. 549-556, 6 jan. 2010;

PASSUELO, Alexandra et al. **CONCRETO: CIÊNCIA E TECNOLOGIA**. 1. ed. São Paulo: Geraldo C. Isaia, 2011;

PASSUELO, Alexandra et al. **CONCRETO - Ensino, Pesquisas e Realizações**. 2. ed. São Paulo: Geraldo C. Isaia, 2005;

PELLEGRIN, Marcelo Zaniboni de. **DESENVOLVIMENTO DE UM COMPÓSITO ARGAMASSA/CELULOSE DA CANA-DE-AÇUCAR**. 2016. 91 f. Dissertação (Mestrado de Ciências e Engenharia de Materiais) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2016;

PELISSER, Fernando et al. Effect of the Addition of Synthetic Fibers to Concrete Thin Slabs on Plastic Shrinkage Cracking. **Construction and Building Materials**, Brasil, v. 24, p. 2171-2176, 8 mai. 2010;

PIASTA, W.; ZARZYCKI, B. The effect of cement paste volume and w/c ratio on shrinkage strain, water absorption and compressive

strength of high performance concrete. **Construction and Building Materials**, Poland, v. 140, p. 395–402, 9 fev. 2017;

PORTAL METÁLICA. **Isolamento térmico e acústico**: Lã de vidro. 2006. Disponível em <http://www.metalica.com.br/pg_dinamica/bin/pg_dinamica.php?id_pag=544>. Acesso em: 10 de fev. de 2017;

POSSAN, Edna; DEMOLINER, Carlos Alberto. DESEMPENHO, DURABILIDADE E VIDA ÚTIL DAS EDIFICAÇÕES: ABORDAGEM GERAL. **Técnico-científica**, Curitiba, n. 1, p.1-18, 2013;

QUININO, Uziel Cavalcanti de Medeiros. **Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adições híbridas de fibras**. 2015. 243 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015;

RAMEZANIANPOUR, A.; MALHOTRA, V. Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or sílica fume. **Cement and Concrete Research**, v. 17, n. 2, p. 125-133, 1995;

RAZMI, A.; MIRSAYAR, M.M.. On the mixed I/II fracture properties of jute fiber-reinforced concrete. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 512-520, 2017;

SHACKELFORD, James F.. **CIÊNCIA DOS MATERIAIS**. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008;

SHEN, D. et al.. Tensile creep and cracking resistance of concrete with different water- to-cement ratios at early age. **Construction and Building Materials**, China, v. 146, 410–418, 8 abr. 2017;

SHUI, Zhong-he et al. Effects of Mineral Admixtures on the Thermal Expansion Properties of Hardened Cement Paste. **Construction and Building Materials**, China, v. 24.9, p. 1761-1767, 5 mar. 2010;

SILVA, Antônio Jorge Parga da. **Aplicação de partículas longas e orientadas de bagaço de cana-de-açúcar na produção de painel particulado similar de OSB**. 2006. 167 f. Tese (Doutorado em Ciência

e Engenharia de Materiais) - Universidade de São Carlos, São Carlos, 2006;

SILVA, Janaina Fernandes e. **PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE ARGAMASSA REFORÇADA COM FIBRAS DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR (FBC)**. 2010. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010;

SOUZA, Vicente Custódio Moreira de; RIPPER, Thomaz. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. 1ª edição. São Paulo: Pini, 2009;

SUADES-GONZÁLEZ, E. et al.. Air pollution and neuropsychological development: a review of the latest evidence. **Endocrinology**, Spain, v. 156, p. 3473-3482, 10 out. 2015;

THOMAZ, Ércio. **Trincas em edifícios: causas, prevenção e recuperação**. 2ª edição. São Paulo: Pini, 2014;

TIAN, H.; ZHANG, Y. X. The influence of bagasse fibre and fly ash on the long-term properties of green cementitious composites. **Construction and Building Materials**, Australia, v. 111, p. 237-250, 23 fev. 2016;

TRDIC, F. et al. Monitoring Mineral Wool Production Using Real-Time Machine Vision. **Real-Time Imaging, Academic Press**, United States, v. 5, p. 125-140, 1999;

WIRAWAN, R. et al.. Properties of sugarcane bagasse/poly(vinyl chloride) composites after various treatments. **Journal of Composite Materials**, Turkey, v. 45, p. 1667-1674, 27 jan. 2011;

XU, Y. et al.. Creep behaviour of bagasse fibre reinforced polymer composites. **Bioresource technology**, United States, v. 101, nº 9, p. 3280-3286, 12 jan. 2010;

YOUSEFIEH, Negin et al. Influence of Fibers on Drying Shrinkage in Restrained Concrete. **Construction and Building Materials**, United States, v. 148, p. 833-845, 8 mai. 2017;

ZENG, Qiang et al.. Effect of Porosity on Thermal Expansion Coefficient of Cement Pastes and Mortars. **Construction and Building Materials**, France, v. 28, p. 468-475, 15 nov. 2012;

ZHAN, Y.; MESCHKE, G.. A multiscale oriented concept for the analyses of steel fiber reinforced concrete materials and structures. **8° International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures**. Toledo-Spain, p. 10–14, mar. 2013.