



UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS  
CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**ANÁLISE DA INTERFACE ENTRE ARGAMASSAS DE  
CONCRETO COM ADIÇÃO DE FINO BASÁLTICO E  
CINZA DA CASCA DE ARROZ POR MEIO DE  
NANOINDENTAÇÃO**

**DANIEL GUSTAVO BRUSIUS WILBERT**

São Leopoldo, Junho de 2015.



DANIEL GUSTAVO BRUSIUS WILBERT

**ANÁLISE DA INTERFACE ENTRE ARGAMASSAS DE  
CONCRETO COM ADIÇÃO DE FINO BASÁLTICO E CINZA  
DA CASCA DE ARROZ POR MEIO DE NANOINDENTAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

**Orientador:** Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak

**Co-Orientador:** Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Marlova Piva Kulakowski

**Banca examinadora:** Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Ana Paula Kirchheim

Prof. Dr. Roberto Hübler

Prof. Dr. Mauricio Mancio

São Leopoldo, Junho de 2015.

W664a Wilbert, Daniel Gustavo Brusius.  
Análise da interface entre argamassas de concreto com  
adição de fino basáltico e cinza da casca de arroz por meio de  
nanoindentação / Daniel Gustavo Brusius Wilbert. – 2015.  
158 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio  
dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil,  
2015.  
“Orientador: Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak.”  
“Coorientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Marlova Piva Kulakowski.”

1. Argamassa de concreto. 2. Fino basáltico. 3. Cinza da  
casca de arroz. I. Kazmierczak, Claudio de Souza. II.  
Kulakowski, Marlova Piva. III. Título.

CDU 691.53

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(Bibliotecária: Raquel Herbcz França – CRB 10/1795)

**DANIEL GUSTAVO BRUSIUS WILBERT**

**"ANÁLISE DA INTERFACE ENTRE ARGAMASSAS DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE FINO BASÁLTICO E CINZA DE CASCA DE ARROZ POR MEIO DE NANOINDENTAÇÃO"**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração: Gerenciamento de Resíduos, da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

Aprovada em 22 de julho de 2015



Prof. Dr. Claudio de Souza Kazmierczak  
Orientador – UNISINOS



Prof.ª Dr.ª Luciana Paulo Gomes  
Coordenadora do PPGEC-UNISINOS

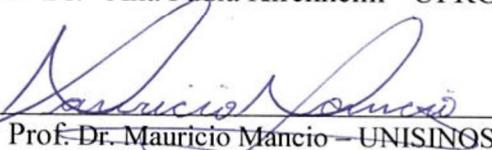


Prof. Dr. Marlova Piva Kulakowski  
Coorientadora - UNISINOS

BANCA EXAMINADORA



Prof.ª Dr.ª Ana Paula Kirchheim - UFRGS



Prof. Dr. Mauricio Mancio – UNISINOS



Prof. Dr. Roberto Hubler – PUC-RS



À Amanda



## **AGRADECIMENTOS**

Inicialmente ao meu orientador Claudio Kazmierczak, pela confiança depositada, antes mesmo de entrar no programa, auxílio e exemplo, não apenas de professor, mas de pessoa também.

Aos órgãos de fomento à pesquisa, CAPES, FAPERGS e CNPQ, pela concessão da bolsa de estudos e pelo financiamento da pesquisa.

À minha co-orientadora Marlova Kulakowski, também pela confiança, sugestões e ajuda durante todo o trabalho.

À Amanda. Por tudo, sócia na vida pessoal e profissional.

Aos meus pais Cezar e Wanderlise, pelo incentivo e apoio, em todos os sentidos.

À minha irmã, Berta, pela ótima companhia e momentos de diversão e apoio.

Aos meus sogros Luiz e Rejane.

Ao laboratório de materiais de construção civil, na presença de todos, especialmente dos amigos Mauricio e Rodrigo, pela disposição no auxílio das tarefas, sugestões e experiências compartilhadas.

Ao laboratório da caracterização e valorização de materiais pelas análises físicas e químicas.

Ao ITT FÓSSIL pelo auxílio nas microscopias.

Ao ITT FUSE, Eduardo Rodrigues, Eduardo Reis, Leandro Gianlupi e Edilar, pela ajuda e disponibilidade nas microtomografias, microscopias e preparação das amostras.

Ao Laboratório de Metalografia, Jackson e Eder, pelas dicas na preparação de amostras e auxílio nas medidas de microdureza Vickers.

Ao GEPSI da PUCRS, especialmente pelo prof. Dr. Roberto Hübler e do laboratorista Dr. André, que viabilizaram a execução da pesquisa.

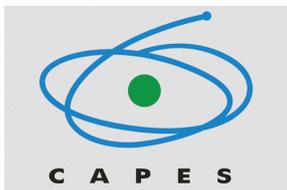
Aos professores do PPGEC: Mauricio Mancio, Marco González, Andrea Kern, Feliciane Brehm, Luciana Gomes, Luís Miranda e Carlos Moraes, pelo conhecimento passado, amizade e disponibilidade no auxílio da pesquisa.

A todos os colegas do PPGEC, especialmente Carlos Eduardo Braun, Maurício Schafer, Jeferson Alcantara João Rafael e Vinicius Ortolan.

Aos bolsistas Douglas e Guilherme, pela ajuda nos ensaios finais.

À secretaria do PPGEC, na presença da Simone Trisch, sempre solícita e atenciosa.

## FONTES DE FINANCIAMENTO DA PESQUISA



Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal  
de Nível Superior – CAPES



Conselho Nacional de Desenvolvimento  
Científico e Tecnológico – CNPq



Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado  
do Rio Grande do Sul – FAPERGS



# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>23</b>
1.1	JUSTIFICATIVA	25
1.2	OBJETIVOS	27
1.2.1	Objetivo geral	27
1.2.2	Objetivos específicos	28
1.3	ESTRUTURA DA PESQUISA	28
1.4	DELIMITAÇÕES DO TRABALHO	29
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>30</b>
2.1	UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETOS	30
2.1.1	O Agregado Reciclado de Concreto (ARC)	30
2.1.2	Concretos com ARC	35
2.2	UTILIZAÇÃO DE ADIÇÕES EM CONCRETOS	40
2.2.1	Utilização de microfinos inertes	41
2.2.2	Utilização de Cinza de Casca de Arroz	44
2.3	ZONA DE TRANSIÇÃO EM CONCRETOS	47
2.3.1	Zona de transição em concretos com ARC	49
2.3.2	Análise da zona de transição	50
2.4	TÉCNICA DE NANOINDENTAÇÃO	53
2.4.1	Utilização da Nanoindentação em Materiais Cimentícios	56
<b>3</b>	<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL</b>	<b>63</b>
3.1	PLANEJAMENTO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL	63
3.1.1	Variáveis de Resposta	64
3.1.2	Variáveis de Controle	64
3.2	MATERIAIS	65
3.2.1	Cimento e Adições	65
3.2.2	Agregado Miúdo Natural	70
3.2.3	Agregado Graúdo Natural	71
3.2.4	Água	72
3.2.5	Aditivo Superplastificante	72
3.3	ANÁLISE DAS ARGAMASSAS	72
3.3.1	Produção dos Corpos de Prova	72
3.3.2	Cura dos Corpos de Prova	74
3.3.3	Propriedades Avaliadas	74
3.4	ANÁLISE DA INTERFACE	78
3.4.1	Produção dos Corpos de Prova	78
3.4.2	Preparação das Amostras	81
3.4.3	Análise do Módulo de Elasticidade pela Técnica de Nanoindentação	84
3.4.4	Métodos de Análise da interface	87
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>	<b>91</b>
4.1	PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS	91
4.1.1	Massa Específica	91
4.1.2	Módulo de Elasticidade Dinâmico	92
4.1.3	Resistência à Compressão	94
4.1.4	Resistência à Tração Por Compressão Diametral	96
4.1.5	Absorção por Capilaridade	97
4.1.6	Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM)	102
4.1.7	Consideração sobre as propriedades das argamassas	104
4.2	MÓDULO DE ELASTICIDADE NA INTERFACE	105
4.2.1	Resultados do Método 1: Comparação entre os módulos de elasticidade nas argamassas novas com os diferentes tipos de adição	105
4.2.2	Resultados do Método 2: Média aritmética geral das interfaces nas argamassas	107
4.2.3	Resultados do Método 3: Análise por faixas de variação do módulo de elasticidade nas argamassas	111

4.2.4	<i>Consideração sobre o Módulo de Elasticidade nas Interfaces</i> .....	120
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>121</b>
5.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	121
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	123
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>125</b>
	<b>APÊNDICE A</b> .....	<b>142</b>
	<b>APÊNDICE B</b> .....	<b>143</b>
	<b>APÊNDICE C</b> .....	<b>152</b>
	<b>APÊNDICE D</b> .....	<b>159</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Trabalhos realizados com ARC pelo GMAT.....	27
Tabela 2 - Teores de argamassa aderida em diferentes ARC.....	32
Tabela 3 - Massa específica e unitária de diferentes ARC.....	33
Tabela 4 - Absorção de diferentes ARC.....	35
Tabela 5 - Resistência à compressão com o uso de ARC.....	37
Tabela 6 - Absorção de concretos com ARC.....	39
Tabela 7 - Geração de microfinos.....	42
Tabela 8 - Resultados de módulo de elasticidade obtidos com nanoindentação em compostos do cimento hidratado.....	57
Tabela 9 - Resultado de nanoindentações nos compostos do clínquer.....	57
Tabela 10 - Massa específica do cimento e adições.....	65
Tabela 11 - Características físicas do cimento.....	66
Tabela 12 - Características químicas do cimento e da CCA.....	67
Tabela 13 - Fluorescência de raios X qualitativa do FB.....	68
Tabela 14 - Distribuição granulométrica acumulada do cimento e adições.....	69
Tabela 15 - Propriedades do AMN.....	71
Tabela 16 - Propriedades do aditivo.....	72
Tabela 17 - Consumo unitário de materiais.....	73
Tabela 18 - Módulo de elasticidade dos grãos de areia medidos pela nanoindentação.....	87
Tabela 19 - ANOVA massa específica FB.....	92
Tabela 20 - ANOVA massa específica CCA.....	92
Tabela 21 - ANOVA Módulo de Elasticidade Dinâmico FB.....	93
Tabela 22 - ANOVA módulo de elasticidade dinâmico CCA.....	94
Tabela 23 - ANOVA resistência à compressão FB.....	95
Tabela 24 - ANOVA resistência à compressão CCA.....	96
Tabela 25 - ANOVA resistência à tração FB.....	97
Tabela 26 - ANOVA resistência à tração CCA.....	97
Tabela 27 - ANOVA taxa de absorção para as argamassas com FB.....	99
Tabela 28 - ANOVA taxa de absorção para as argamassas com CCA.....	100
Tabela 29 - Resumo dos resultados de absorção de água por capilaridade.....	101
Tabela 30 - ANOVA argamassas novas com FB - Valores inferiores a 45 GPa.....	106
Tabela 31 - ANOVA argamassas novas com CCA - Valores inferiores a 45 GPa.....	107
Tabela 32 - Resultados das médias aritméticas gerais.....	108
Tabela 33 - ANOVA interfaces 75 µm argamassas com FB - Metodologia 2.....	109
Tabela 34 - ANOVA interfaces 75 µm argamassas com CCA - Metodologia 2.....	109
Tabela 35 - ANOVA interfaces 200 µm argamassas com FB - Metodologia 2.....	109
Tabela 36 - ANOVA interfaces 200 µm argamassas com CCA - Metodologia 2.....	110
Tabela 37 - Quantitativo de medidas em cada faixa de valores.....	112
Tabela 38 - Valores de módulo de elasticidade situados entre 15 e 35 GPa.....	113
Tabela 39 - ANOVA interfaces 75 µm argamassas com FB - Valores entre 15 e 35 GPa.....	114
Tabela 40 - ANOVA interfaces 75 µm argamassas com CCA - Valores entre 15 e 35 GPa.....	114
Tabela 41 - ANOVA interfaces 200 µm argamassas com FB - Valores entre 15 e 35 GPa.....	114
Tabela 42 - ANOVA interfaces 200 µm argamassas com CCA - Valores entre 15 e 35 GPa.....	114
Tabela 43 - Resultados dos valores situados abaixo de 15 GPa.....	116
Tabela 44 - ANOVA interfaces 75 µm argamassas com FB - Valores abaixo de 15 GPa.....	118
Tabela 45 - ANOVA interfaces 75 µm argamassas com CCA - Valores abaixo de 15 GPa.....	118

Tabela 46 - ANOVA interfaces 200 µm argamassas com FB - Valores abaixo de 15 GPa.. 118  
Tabela 47 - ANOVA interfaces 200 µm argamassas com CCA - Valores abaixo de 15 GPa.  
..... 118

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Argamassa aderida. ....	30
Figura 2 - Zona de transição do concreto. ....	48
Figura 3 - Zona de transição em concretos com ARC.....	49
Figura 4 - Representação esquemática do procedimento adotado pelos autores.....	51
Figura 5 - Amostra produzida pelos autores.....	52
Figura 6 - MEV realizado pelos autores. ....	53
Figura 7 - Formato e marca de penetração dos penetradores Vickers e Berkovich. ....	55
Figura 8 - Ciclo de carregamento da nanoindentação. ....	55
Figura 9 - Amostras iniciais produzidas. ....	58
Figura 10 - Amostra e resultados do teste por nanoindentação.....	59
Figura 11 - Resultados obtidos para a relação a/c. ....	60
Figura 12 - Resultados obtidos pelos autores. ....	61
Figura 13 - Fluxograma de atividades do programa experimental.....	63
Figura 14 - Difração de raios X FB e CCA. ....	68
Figura 15 - Distribuição granulométrica do cimento e adições.....	69
Figura 16 - Microscopias cimento e adições. ....	70
Figura 17 - Distribuição granulométrica do AMN. ....	71
Figura 18 - Porosimetria por Intrusão de Mercúrio do basalto.....	72
Figura 19 - Cura inicial dos corpos de prova. ....	74
Figura 20 - Esquema do procedimento adaptado do RILEM TC 116 PCD.....	77
Figura 21 - Ensaio de absorção de água por capilaridade. ....	77
Figura 22 - Fluxograma de atividades para análise da interface. ....	78
Figura 23 - Corpos de prova para análise da interface. ....	79
Figura 24 - ARC-M antes (Figura superior) e após o corte (Figura inferior).....	80
Figura 25 - CARC-M antes (à esquerda) e após a desforma (à direita). ....	81
Figura 26 - Posição da amostra para o corte.....	82
Figura 27 - Etapas utilizadas no corte para obtenção da amostra.....	83
Figura 28 - Amostra polida.....	84
Figura 29 - Equipamento de nanoindentação. ....	84
Figura 30 - Microscopia ótica para definição da região analisada. antes (a) e após (b) a escolha da região. ....	85
Figura 31 - Localização das medidas realizadas. ....	86
Figura 32 - Região de análise Método 1.....	87
Figura 33 - Extensões de leitura. ....	89
Figura 34 - Massa específica com FB. ....	91
Figura 35 - Massa específica argamassas com CCA.....	91
Figura 36 - Módulo de elasticidade dinâmico FB. ....	93
Figura 37 - Módulo de elasticidade dinâmico CCA.....	93
Figura 38 - Resistência à compressão FB.....	94
Figura 39 - Resistência à compressão CCA. ....	95
Figura 40 - Resistência à tração FB.....	96
Figura 41 - Resistência à tração CCA. ....	96
Figura 42 - Absorção das argamassas com FB.....	98
Figura 43 - Absorção das argamassas com CCA. ....	98
Figura 44 - Taxa de absorção capilar das argamassas com FB. ....	99
Figura 45 - Taxa de absorção capilar das argamassas com CCA.....	99
Figura 46 - Absorção total das argamassas com FB.....	100

Figura 47 - Absorção total das argamassas com CCA.....	101
Figura 48 – Volume total de intrusão de mercúrio nas argamassas com FB.....	102
Figura 49 - Distribuição do volume de mercúrio intrudido nas argamassas com FB.....	102
Figura 50 - Volume total de intrusão de mercúrio nas argamassas com CCA. ....	103
Figura 51 - Distribuição do volume de mercúrio intrudido nas argamassas com CCA.....	103
Figura 52 - Média aritmética do módulo de elasticidade na região das argamassas novas com FB.....	105
Figura 53 - Média aritmética na região das argamassas novas com CCA.....	106
Figura 54 - Média aritmética na região das argamassas novas – Valores abaixo de 45 GPa.	107
Figura 55 - Resultados das médias aritméticas gerais.....	108
Figura 56 - Variação das médias aritméticas gerais por extensão da região de análise para os traços com FB. ....	110
Figura 57 - Variação das médias aritméticas gerais por extensão da região de análise para os traços com CCA. ....	111
Figura 58 - Resultados dos valores situados entre 15 e 35 GPa. ....	113
Figura 59 - Variação das médias e percentual para os traços com FB dos valores entre 15 e 35 GPa.....	115
Figura 60 - Variação das médias e percentual para os traços com CCA dos valores entre 15 e 35 GPa.....	115
Figura 61 - Resultados dos valores situados abaixo de 15 GPa.....	117
Figura 62 - Variação das médias e percentual para os traços com FB dos valores abaixo de 15 GPa.....	119
Figura 63 - Variação das médias e percentual para os traços com CCA dos valores abaixo de 15 GPa.....	119

## LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas  
AGN – Agregado Graúdo Natural  
AGRC – Agregados Graúdos Reciclados de Concreto  
AMRC – Agregado Miúdo Reciclado de Concreto ()  
AN – Agregado Natural  
ANOVA – Análise de Variância  
ARC – Agregados Reciclados de Concreto  
ARC-M – Agregado de Reciclado de Concreto – Modificado  
CARC-M – Concreto com Agregado Reciclado de Concreto – Modificado  
CCA – Cinza da Casca de Arroz  
C-S-H – Silicato de Cálcio Hidratado  
EDS – Espectroscopia de Energia Dispersiva (Energy Dispersive Spectroscopy)  
ED-XRF – Fluorescência de raios X por dispersão de energia  
FB – Finos Basáltico  
GEPSI – Grupo de Estudo de Propriedades de Superfícies e Interfaces  
GMAT – Grupo de Pesquisa em Materiais de Construção e Reciclagem  
HIT – Testes Instrumentados de Dureza (Hardness Instrumental Tests)  
ITT Fuse – Instituto Tecnológico em Ensaios e Segurança Funcional  
LCVMat – Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais  
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura  
MME – Ministério de Minas e Energia  
PIM – Porosimetria Por Intrusão de Mercúrio  
PPGEC – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
PUNDIT – Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicator Tester  
RCD – Resíduos de Construção e Demolição  
RFC – Rock-Filled Concrete  
RSU – Resíduos Sólidos Urbanos  
TecnoPUCRS – Parque Científico e Tecnológico da PUCRS  
UEPG – *Union Européenne des Producteurs de Granulats*  
UNISINOS – Universidade do Vale do Rio dos Sinos  
ZT – Zona de Transição



## LISTA DE SÍMBOLOS

Ø – Diâmetro

µm – Micrometro

a/c – Água/Cimento

°C – Graus Celsius

cm – Centímetro

cm<sup>2</sup> - centímetro quadrado

cm<sup>3</sup> - centímetro cúbico

g – Grama

GPa – GigaPascal

h – hora

kg – quilograma

kN – QuiloNewton

m<sup>3</sup> - metro cúbico

mm – Milímetro

mN – miliNewton

MPa – MegaPascal

s – Segundo



## RESUMO

Wilbert, D. G. B. **Análise da interface entre argamassas de concreto com adição de fino basáltico e cinza da casca de arroz por meio de nanoindentação**. São Leopoldo, 2015. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo. 2015.

O setor da construção civil é responsável por um grande impacto ambiental, destacando-se dois principais fatores, a quantidade de matéria-prima consumida e de resíduos gerados. Estes resíduos, em grande parte apresentam um grande potencial de reciclagem. Dentre estes resíduos, os de concreto apresentam um excelente potencial de utilização. Inúmeras pesquisas já comprovaram a viabilidade de utilização do Agregado Reciclado de Concreto (ARC). Porém, a menor qualidade do ARC em comparação aos agregados naturais, resultada em queda no desempenho destes concretos, principalmente nas propriedades de durabilidade. Como consequência ocorre um enfraquecimento da zona de transição entre a argamassa velha e a nova. Em função desta queda de desempenho ao se utilizar ARC, a presente pesquisa teve por objetivo a análise desta zona de transição, através do estudo da interface entre duas argamassas de concreto por meio da técnica de nanoindentação. Para esta análise foram moldados agregados reciclados de concretos modificados, todos no traço referência (sem adição), e posteriormente aplicada uma nova camada de argamassas com diferentes traços. Os traços variaram entre dois tipos de adição (Finos Basálticos – FB e Cinza da Casca de Arroz – CCA), em diferentes teores de adição ao cimento, 0, 5, 10 e 15% para os finos e 0, 5, 7,5 e 10% para a CCA. Após cura de 63 dias, as amostras foram preparadas para a realização dos ensaios. Para a análise das medidas de nanoindentação na interface, foram propostos três métodos de análise. As propriedades macroestruturais foram avaliadas aos 28 dias, como módulo de elasticidade dinâmico, resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e absorção de água por capilaridade. Os resultados demonstraram a melhora das propriedades macroestruturais das argamassas com 15% de FB e CCA em relação à referência. Foram identificadas alterações na região de interface entre as argamassas no traço com 15% de finos de basalto e em todos os traços com CCA, que apresentaram os melhores resultados. A comparação entre a região mais próxima à zona de transição resultou, para todos os traços, em valores semelhantes aos obtidos em regiões de pastas mais distantes à zona de transição, demonstrando que o uso de uma argamassa antiga na condição seca (simulando um agregado reciclado seco) melhorou as condições da zona de transição com a argamassa nova.

Palavras-chave: Argamassa de concreto; fino basáltico; cinza da casca de arroz; interface; zona de transição.



## ABSTRACT

WILBERT, D. G. B. **Analysis of concrete mortars with basaltic filler and rice husk ash interfaces by nanoindentation.** São Leopoldo, 2015. 158 p. Dissertation (Master Degree in Civil Engineering) – Postgraduate Civil Engineering Program, Unisinos, São Leopoldo.

Construction is responsible for a large environmental impact, highlighting two main factors: consume of raw materials and generation of waste materials. By other hand, construction and demolition waste has a good potential of recycling. Many studies have demonstrated the viability of using recycled concrete coarse aggregate (RCA) in new concrete. However, due to the RCA's properties, most results point to a lower durability of the concrete. It is also consensus that the main reasons for the lower quality of the new concrete are the mortar layer adhered to the natural aggregate and the weakening in the new Interfacial Transition Zone (ITZ) between the old and the new mortar. This study analyze the new interfacial transition zone in these concretes through nanoindentation. There were produced recycled concrete aggregates without addition of filler, and over these aggregates there were produced a new mortar layer with different mix compositions. There were used basaltic filler and rice husk ash-RHA in different levels of addition: 0, 5, 10 and 15% for the filler, and 0, 5, 7,5 and 10% for the ash. Their interfaces were evaluated using different methodologies. Modulus of elasticity, compressive strength, tensile strength and capillarity were determined. The use of fines improved the mortar properties in relation to the reference, especially those with 15% filler and the samples with RHA. The region near to the ITZ shows similar elastic moduli values to those obtained in the paste, in all mortars, proving that using dry recycled aggregates the new mortar loose water to the aggregates and increase their mechanical properties.

Key-words: Concrete mortar; basaltic filler; rice husk ash; interface; interfacial transition zone.



# 1 INTRODUÇÃO

A construção civil é reconhecidamente um dos principais responsáveis pelo desenvolvimento de uma sociedade. Possui como uma de suas principais características a utilização de uma grande quantidade de recursos naturais. Com a necessidade de um modelo de consumo voltado à preservação do meio ambiente, vem se buscando técnicas que visam o menor consumo de recursos naturais, especialmente os recursos não renováveis, com a produção de bens materiais com um menor impacto ambiental.

Comprovando este grande consumo de matérias-primas, neste caso de agregados naturais, o Sumário Mineral Brasileiro 2013 aponta o consumo de brita e cascalho na construção, em 287 Mton no ano de 2012, e o de areia em 369 Mton. Já o Plano Nacional de Mineração 2030 estima em 727 Mton o consumo de agregados para o ano de 2015. (KULAIIF, 2013; MIGLIORINI, 2013; Ministério de Minas e Energia – MME, 2011). Dados da Associação Europeia de Agregados (*Union Européenne des Producteurs de Granulats – UEPG*) demonstram que a produção de agregados na Europa gira em torno de três bilhões de ton/ano, o que representa uma demanda anualmente de 5,5 ton/hab.ano. Sendo que cerca de 91% destes agregados são de recursos naturais, enquanto apenas 5% correspondem a agregados reciclados. (UEPG, 2012). A própria associação ainda quantifica a produção mundial de agregados em cerca de 30 bilhões ton/ano, com a China liderando a produção, com cerca de 33%, seguida pela Índia e pelo restante da Ásia, com respectivamente 17 e 13% da produção mundial.

A construção civil também é caracterizada pela grande quantidade de resíduos gerados no setor. Várias são as formas de geração, que em função de uma falta de qualidade dos bens e serviços acarreta em perdas no processo construtivo, contribuindo de maneira significativa na geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), além das perdas que ficam incorporadas à edificação, que podem levar ao mau funcionamento da mesma, acarretando em manifestações patológicas com consequente necessidade de reparo, consumindo matéria-prima e novamente gerando resíduos. (LEITE, 2001).

Ao avaliar quantitativamente a geração de RSU fica evidente a grande participação da construção civil, sendo os Resíduos de Construção e Demolição (RCD) um dos maiores responsáveis pelo esgotamento de áreas de aterro em cidades de médio e grande porte, correspondendo por mais de 50%. (ÂNGULO, 2005). Estimativas sobre a geração de RCD no Brasil apontam para uma geração de 500 kg/hab.ano. (PINTO, 1999; ULSEN, 2006).

Existem ainda estimativas para diversas cidades brasileiras, como São Paulo, com uma geração de RCD de 1,08 kg/hab.dia, Porto Alegre com 0,29 kg/hab.dia, Salvador com 0,77 kg/hab.dia e Belo Horizonte com 0,60 kg/hab.dia. (OLIVEIRA et al., 2004 apud BUTTLER, 2007).

Uma das condições para se atingir o desenvolvimento sustentável no setor é através da reciclagem de seus resíduos. A reciclagem possui vantagens como a redução do consumo de energia, redução da poluição e esgotamento de aterros, uma vez que a reciclagem transforma um material aparentemente sem uso, em uma fonte de matéria-prima, solucionando os problemas enfrentados pelo gerenciamento destes resíduos. (JOHN, 2000; VIEIRA, 2003).

A importância da reciclagem vem ganhando maior destaque no Brasil desde o final da década de 90, e início dos anos 2000, graças a trabalhos como os realizados por Zordan (1997), Lima, (1999), Pinto (1999), Ângulo (2000, 2005) e John (2000). Mesmo com uma grande quantidade de trabalhos já realizados sobre o tema atualmente, estima-se em apenas 10% a reciclagem de RCD no Brasil, enquanto países como Bélgica, Dinamarca, e Holanda possuem índices de reciclagem superiores a 75%. (DE JUAN, 2004).

O grande potencial de reciclar estes resíduos é com relação ao produto obtido, o agregado reciclado. Mesmo os agregados de RCD, que possuem composição variável, apresentam um alto potencial de reciclagem. Os agregados reciclados possuem como características uma maior porosidade, e por consequência uma menor resistência e maior absorção de água que os agregados naturais. Porém esta qualidade inferior faz com a sua utilização propicie um ganho ambiental, em função de se utilizar um resíduo, evitando-se matérias-primas naturais, além de possuir um custo de produção inferior à produção de agregados naturais. (CABRAL, 2007).

A utilização de agregados reciclados é extremamente atrativa quando comparada à utilização de recursos naturais não-renováveis, pois esta é capaz de promover o desenvolvimento de uma nova matéria-prima, além de preservar os recursos naturais. Juntando-se à isto, existe a necessidade de utilização dos resíduos gerados pelo setor, evitando o descarte em aterros. Por isso a reciclagem apresenta-se como uma ferramenta extremamente viável na construção civil, apresentando uma série de vantagens quanto ao consumo de matéria-prima e descarte de resíduos, contribuindo para a preservação dos recursos naturais e proteção do meio ambiente. (MÁLIA; BRITO; BRAVO, 2011; ZEGA; DI MAIO, 2011; ZORDAN; JOHN, 2004).

A reciclagem de resíduos de concreto possui grandes vantagens em relação à de RCD. Gerados em sua maioria em fábricas de elementos pré-moldados, usinas de concreto e demolições de construções e pavimentos rodoviários a base de concreto, o que resulta numa menor contaminação de outros materiais, além do conhecimento de suas propriedades básicas. Somando-se à isto o fato de em centrais dosadoras e indústria de pré-fabricados, os resíduos de concreto são gerados dentro de um processo produtivo, facilitando a sua utilização. (BUTTLER, 2003).

Os Agregados Reciclados de Concreto (ARC) possuem importantes características que os diferenciam dos agregados naturais, como a forma e a quantidade de argamassa aderida, sendo estas características influenciadas pelo concreto que deu origem ao agregado reciclado e pelo processo de beneficiamento adotado. (NIXON, 1978; KATZ, 2003; LOVATO, 2007; MATIAS et al., 2013). Dentre estas diferenças, a principal é uma camada de argamassa que fica aderida ao agregado natural (AN), tornando o ARC mais poroso, com maior absorção, menor densidade e resistência. (BAIRAGI; RAVANDE; PAREEK, 1993; TAM; GAO; TAM, 2005).

As características do ARC fazem com que os concretos produzidos com estes agregados tenham desempenho inferior em comparação com os concretos produzidos com agregados naturais, especialmente em relação às propriedades de durabilidade, pois vêm se conseguindo obter propriedades mecânicas razoáveis. Como exemplo cita-se o trabalho realizado por Kou e Poon (2012) com Agregados Graúdos Reciclados de Concreto (AGRC), que resultou em uma queda de 13 e 22% na resistência à compressão aos 28 dias, para os teores de respectivamente 50 e 100% de substituição do agregado natural pelo reciclado. E também o trabalho de Pedro, Brito e Evangelista (2014), que ao utilizarem AGRC, no teor de 100% de substituição, provenientes de concreto pré-fabricados com resistência de 20 e 45 MPa, obtiveram um aumento na absorção por imersão de respectivamente 28 e 27%.

## **1.1 JUSTIFICATIVA**

Pelo fato de ser o material mais consumido no mundo e de exigir uma grande quantidade de matéria-prima e energia para sua produção, toda pesquisa voltada ao desenvolvimento de concretos com menor impacto ambiental, é extremamente importante e necessária. (FOLINO; XARGAY, 2014). Sua estrutura e composição heterogênea em diferentes níveis de escala necessitam de estudos em todas estas escalas. Sanchez e Sobolev (2010) e Zhu et al. (2007) afirmam que análises microestruturais em materiais cimentícios têm papel fundamental no desenvolvimento destes materiais, e que graças aos avanços em

técnicas e equipamentos está sendo possível o estudo das propriedades dos materiais cimentícios à este nível de escala.

Uma região em especial vem recebendo grande atenção no estudo da microestrutura de concretos, a Zona de Transição (ZT) que se forma entre a pasta e o agregado. Considerada a zona mais fraca do concreto, com uma maior quantidade de poros e fissuras, esta região é um parâmetro fundamental ao desenvolvimento da tecnologia do concreto. (HUSSIN; POLE, 2011; GAO et al., 2014). Estas características tornam a zona de transição um significativo meio de difusão de agentes agressivos, possuindo um papel chave nas propriedades de durabilidade, e que o desenvolvimento de zonas de transição mais semelhantes à matriz é essencial para a obtenção de concretos com maior durabilidade. (LEEMANN; LOSER; MÜNCH, 2010; LIZARAZO-MARRIAGA, HIGUERA; CLAISSE, 2014; NILI; EHSANI, 2015).

Somando a necessidade de estudos microestruturais em concretos e a utilização de agregados reciclados, em especial os de concretos, se tem um campo de pesquisa vital para o desenvolvimento de um concreto mais sustentável e com boas propriedades mecânicas e de durabilidade. Estas pesquisas estão focadas à ZT que se forma com a utilização do ARC, formada entre duas argamassas. Etxeberria, Vázquez e Marí (2006) recomendam a realização destas análises para um melhor entendimento do comportamento de concretos com ARC, e para que não hajam perdas acentuadas de desempenho. Xiao et al. (2013b) também recomendam estas análises, objetivando seu maior conhecimento e de técnicas que produzam uma ZT com menor espessura e porosidade, resultando em concretos com ARC com propriedades semelhantes aos concretos convencionais.

Dentre as técnicas que estão sendo utilizadas para análise da interface pasta-agregado em concretos com ARC, os testes instrumentados de dureza vem se destacando pela possibilidade de registro da dureza e do módulo de elasticidade, tornando-se extremamente vantajosos em relação às técnicas de microscopia. Soma-se ainda a possibilidade destas medições poderem ser realizadas em nível nanoestrutural, pela técnica de nanoindentação, possuindo maiores vantagens na análise da ZT em relação aos equipamentos de escala micro. (SOUZA, 2007; XIE et al., 2015)

O teste de nanoindentação consiste numa técnica quantitativa de medida de propriedades mecânicas e elásticas pela penetração de um pequeno indentador na superfície de um material. (BLANDO, 2005; JONES; GRASLEY, 2011). Jennings et al. (2007) afirmam

que esta técnica vem proporcionando ao estudo de materiais a base de cimento um grande campo a ser explorado.

O presente trabalho integra o Grupo de Pesquisa em Materiais de Construção e Reciclagem (GMAT) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), que vem nos últimos anos realizando trabalhos sobre a utilização de ARC em concretos, como pode ser observado na Tabela 1.

**Tabela 1 - Trabalhos realizados com ARC pelo GMAT.**

<b>Trabalho</b>	<b>Área de estudo</b>
Werle (2010)	Durabilidade (carbonatação)
Troian (2010)	Durabilidade (íons cloreto)
Cavalheiro (2011)	Utilização <i>in situ</i>
Gonçalves (2011)	Utilização <i>in situ</i>
Benetti (2012)	Propriedades mecânicas (módulo de elasticidade dinâmico)
Cecconello (2013)	Análise da retração com uso de CCA
Fedumenti (2013)	Durabilidade (íons cloreto) com uso de CCA
Padovan (2013)	Influência da pré-molhagem
Sartori (2013)	Durabilidade (carbonatação) com uso de CCA
Gujel (2014)	Propriedades mecânicas (módulo de elasticidade dinâmico e estático)

Dando continuidade aos trabalhos já desenvolvidos pelo grupo, o presente trabalho teve sua pesquisa voltada ao estudo da microestrutura de concretos com ARC utilizando a técnica de nanoindentação.

## **1.2 OBJETIVOS**

Os objetivos da pesquisa foram divididos em objetivo geral e objetivos específicos, estando listados a seguir.

### **1.2.1 Objetivo geral**

O presente trabalho teve como objetivo geral analisar a influência de duas adições (Finos Basálticos – FB e Cinza da Casca de Arroz – CCA) em argamassas de concreto, com ênfase na microestrutura das argamassas, englobando a zona de transição que ocorre em concretos com a utilização de ARC.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Avaliar as propriedades mecânicas (módulo de elasticidade, resistência à compressão e tração) de argamassas de concreto produzidas com FB ou CCA;
- Avaliar a durabilidade pela absorção de água por capilaridade de argamassas de concreto produzidas com FB ou CCA;
- Avaliar as propriedades microestruturais das argamassas de concretos com adição de FB e CCA; utilizando as técnicas de Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM) e nanoindentação pela determinação do módulo de elasticidade;
- Propor métodos para a análise da interface entre duas argamassas através da utilização da técnica de nanoindentação.

## 1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos. O capítulo 1 compreende a introdução sobre o trabalho, onde descreve-se a importância do tema, a justificativa para a pesquisa e os objetivos almejados.

No segundo capítulo é apresentada a revisão bibliográfica, onde foi realizado todo o embasamento teórico, estando dividida em quatro principais temas; a utilização de ARC, a utilização de adições como FB e CCA, zona de transição em concretos, e por último foi realizado uma revisão teórica sobre a técnica de nanoindentação.

O terceiro capítulo descreve o programa experimental realizado, com os fatores fixos e variáveis do programa, os materiais utilizados e os métodos adotados para atingir os objetivos propostos.

O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos, onde também é apresentada a análise e discussão dos resultados.

Por fim, o quinto capítulo consiste nas considerações finais da pesquisa, com base no programa experimental proposto e nos resultados obtidos, relacionando-os com os objetivos propostos.

#### 1.4 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

Em função das variáveis que influem nas propriedades do concreto, apresentam-se as delimitações da presente pesquisa:

- Utilização de apenas um tipo de cimento: CP II-F;
- Dois tipos de adição: finos de rocha basáltica (FB) e Cinza da Casca de Arroz (CCA);
- Teores de adição dos finos em relação à massa de cimento: 0, 5, 10 e 15%;
- Teores de adição de CCA em relação à massa de cimento: 0, 5, 7,5 e 10%;
- Avaliação das propriedades das argamassas aos 28 dias;
- Análise da interface entre duas argamassas aos 63 dias, em uma região com extensão de 200  $\mu\text{m}$ , englobando a zona de transição entre o ARC e a argamassa;
- Realização de um número limitado de medidas de nanoindentação por amostra;
- Utilização de módulo de elasticidade como resultado da nanoindentação, sem análise de outras propriedades.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na presente revisão bibliográfica foram abordados os principais temas relacionados à pesquisa. Com o objetivo de embasar a pesquisa são apresentados quatro principais assuntos. Inicialmente abordou-se a utilização de Agregados Reciclados de Concreto (ARC) e sua influência em concretos, seguido pela utilização de adições, com ênfase ao uso de fílers e Cinza da Casca de Arroz (CCA), adições utilizadas nesta pesquisa. O terceiro subcapítulo trata sobre a zona de transição, especialmente em concretos com ARC, bem como alguns métodos utilizados para sua análise. No último é realizada uma revisão sobre a técnica de nanoindentação, seus princípios e resultados obtidos em materiais cimentícios.

### 2.1 UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETOS

É sabido que a utilização de agregados reciclados começou de forma mais intensa a partir do término da Segunda Guerra Mundial, onde se começaram a desenvolver técnicas de reciclagem em função da grande quantidade de resíduo gerado e pela falta de condições de extração de matéria-prima, o que proporcionou uma maior quantidade de estudos sobre o tema. A partir dos anos 1980, houve uma maior demanda pelo estudo do tema, em função das preocupações ambientais, demanda que ocorre ainda hoje.

#### 2.1.1 O Agregado Reciclado de Concreto (ARC)

O produto obtido pela reciclagem dos resíduos de concreto para ser utilizado como agregado, possui algumas diferenças em relação aos agregados naturais, como a maior porosidade, menor densidade e resistência inferior. Estas características decorrem em função da existência de uma camada de argamassa aderida ao agregado natural, conforme Figura 1, que demonstra um ARC. (GONÇALVES, 2001; HANSEN, 1986; ISMAIL; RAMLI, 2013).



**Figura 1 - Argamassa aderida.**

Fonte: Adaptado de Ulsen (2011).

Esta argamassa aderida é formada tanto pela pasta de cimento, quanto por agregados de menores dimensões, com a qualidade do ARC estando diretamente ligada à quantidade e a qualidade da argamassa aderida, que normalmente possui resistência menor que o agregado natural e a argamassa nova. (ETXEBERRIA et al., 2007). Neste sentido Ulsen et al. (2013a) afirmam que além do teor de argamassa aderida, a quantidade de poros desta argamassa também é fundamental. Corroborando assim, com Padmini, Ramamurthy e Mathews (2009) e Kou e Poon (2015), que expuseram que as propriedades do ARC estão diretamente relacionadas às propriedades do concreto que deu origem ao ARC, e também com Tabsh e Abdelfatah (2009) que demonstraram que a queda no desempenho de um concreto com ARC é maior em concretos com ARC de menor resistência.

As propriedades do ARC já eram discutidas por autores como Nixon (1978), Bairagi, Ravande e Pareek (1993) e Levy (2001), que já apontavam as principais diferenças do ARC em relação aos agregados naturais, principalmente a maior absorção e a menor densidade, cujo principal motivo é a camada de argamassa aderida, que possui uma maior absorção e uma menor densidade que o agregado natural. Em função destas características, Buttler (2007) recomenda que o ARC com grandes quantidades de argamassa aderida, provenientes de concretos de baixa resistência seja evitado. Atualmente estudos como os realizados por Tam e Tam (2008), Kong et al. (2010), Younis e Pilakoutas (2013) e Zhao et al. (2013), vêm buscando maneiras de melhorar as propriedades do ARC, e conseqüentemente do concreto produzido, principalmente com o uso de adições minerais, com o objetivo de promover o preenchimento dos poros, e o aumento da ligação entre as partículas.

#### 2.1.1.1 Teor de argamassa aderida

Tam, Tam e Le (2007) afirmam que a principal razão que afeta a queda de qualidade do ARC é a grande quantidade de argamassa aderida, resultando num agregado mais poroso, e com maior absorção. De acordo com Poon, Shui e Lam (2004), os resíduos de concreto são compostos em 65 a 70% do volume em agregado natural e o restante em pasta de cimento, sendo então intrínseco ao ARC a camada de argamassa. A quantidade de argamassa aderida também está relacionada à dimensão do agregado, em que quanto menor a dimensão do agregado, maior a quantidade de argamassa. (POON; SHUI; LAM, 2004; EVANGELISTA et al., 2015).

De Juan e Gutiérrez (2009) obtiveram, por meio de choque térmico, um teor de 23 a 44% de argamassa para a fração 8 a 16 mm, enquanto a fração de 4 a 8 mm apresentou teor de 33 a 55%. Os resultados obtidos por Heineck (2012) e Padovan (2013), através de choque

térmico, seguido por ataque químico, corroboram com esta afirmação. Enquanto Heineck (2012) obteve para o Agregado Miúdo Reciclado de Concreto (AMRC) proveniente de cura térmica, respectivamente teores de 90 e 88%, Padovan (2013) obteve um teor de 70% para o Agregado Graúdo de Concreto (AGRC) também proveniente de cura térmica.

A Tabela 2 apresenta um levantamento da quantidade de argamassa aderida em ARC encontrada por diversos autores.

**Tabela 2 - Teores de argamassa aderida em diferentes ARC.**

<b>Autor</b>	<b>Origem</b>	<b>Fração (mm)</b>	<b>Argamassa Aderida (%)</b>
Prado (2006)	Telha de concreto	2,4 – 12,5	91,7
	Vigota	2,4 – 12,5	52,9
	Blocos	2,4 – 12,5	49,1
Etxeberria et al. (2007)	Central de reciclagem	4 - 10	40
		10 - 25	20
Domingo-Cabo et al. (2009)	-	4 – 8	31,5
		8 – 20	18
Tegguer (2012)	-	5 – 12	45
		12 – 20	24

Em função da quantidade de argamassa aderida, a textura do ARC também é mais rugosa que o agregado natural. (BAIRAGI; VIDYADHARA; RAVANDE, 1990; WEIDMANN, 2008). Mehta e Monteiro (2008) expõem que assim como a forma, a textura influencia mais no estado fresco do que no estado endurecido, pois para estes agregados ocorre uma maior necessidade de pasta para atingir a trabalhabilidade desejada.

#### 2.1.1.2 Massa Específica e Unitária

Trabalhos como os realizados por Ângulo et al. (2010), Lovato (2007) e Moreira e Figueiredo (2010), demonstram que a massa específica é um parâmetro fundamental para a qualidade do agregado reciclado, sendo recomendado por Ângulo (2005) a utilização de agregados reciclados com massa específica superior à 2,2 g/cm<sup>3</sup>. Uma das vantagens da utilização do ARC é a sua maior massa específica em comparação com agregados de Resíduos de Construção e Demolição (RCD), com valores, normalmente acima do recomendado pelo autor. Porém é consenso que o ARC apresenta densidade menor que o agregado natural, e função de sua maior porosidade e também pela menor densidade da

argamassa aderida. (EVANGELISTA; BRITO, 2007; LIU; XIAO; SUN, 2011; LIMA et al., 2013).

A Tabela 3 apresenta um levantamento comparativo entre os ARC e os agregados naturais utilizados por diversos autores.

**Tabela 3 - Massa específica e unitária de diferentes ARC.**

<b>Autor</b>	<b>Tipo de ARC</b>	<b>Fração (mm)</b>	<b>Massa Específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Relação Massa Específica ARC / Natural (%)</b>	<b>Massa Unitária (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Relação Massa Unitária ARC / Natural (%)</b>
Gonçalves (2001)	AMRC	0,15 – 4,8	2,48	0,93	1,33	0,93
	AMRC Vigotas	0,15 – 4,8	2,48	0,94	1,27	0,81
Prado (2006)	AMRC Blocos	0,15 – 4,8	2,65	1,01	1,32	0,84
	AMRC Telhas	0,15 – 4,8	2,39	0,91	1,25	0,80
Cabral et al. (2010)	AMRC	-	2,56	0,97	1,38	0,92
Morais (2011)	AMRC	0,0 – 4,8	2,46	0,94	1,38	0,95
Gonçalves (2001)	AGRC	4,8 – 25	2,48	0,88	1,29	0,87
	AGRC Vigotas	2,4 – 12,5	2,33	0,84	1,25	0,90
Prado (2006)	AGRC Blocos	2,4 – 12,5	2,38	0,86	1,18	0,85
	AGRC Telhas	2,4 – 12,5	2,24	0,81	1,13	0,81
Cabral et al. (2010)	AGRC	-	2,27	0,79	1,54	1,07
Fedumentì (2013)	AGRC	4,8 – 19	2,21	0,83	1,13	0,81

Pela Tabela 3 nota-se que a menor massa específica e unitária é uma característica intrínseca do ARC, em relação aos agregados naturais. Ressalta-se ainda que a tabela é demonstrativa, não servindo de comparação entre os trabalhos, pois os agregados não são de mesma origem.

### 2.1.1.3 Absorção e Porosidade

De acordo com Farias e Palmeira (2010), a absorção está diretamente relacionada com a quantidade dos vazios comunicantes. No ARC a absorção é considerada a principal propriedade que o difere do agregado natural. (PADMINI; RAMAMURTHY; MATHEWS, 2009). Sendo esta maior devido à camada de argamassa, mais porosa que o agregado natural. A absorção dos agregados reciclados influencia de maneira significativa as propriedades de concretos no estado fresco e endurecido, sendo a porosidade do agregado mais relevante que

sua própria natureza mineral. (CARRIJO, 2005; ULSEN, 2006; MOREIRA, 2010). Werle, Kazmierczak e Kulakowski (2011) mediram a absorção de AGRC, obtidos pela britagem de concretos de diferentes resistências, 18, 37 e 50 MPa, que apresentaram absorção de respectivamente, 8,49, 6,07 e 5,24%, demonstrando que a absorção está diretamente relacionada à resistência do concreto de origem.

Além da maior absorção dos agregados reciclados, estes apresentam como característica uma absorção extremamente elevada nos minutos iniciais, com estimativas de 90% nos primeiros 5 minutos. Esta maior taxa de absorção nos minutos iniciais, bem como a maior quantidade absorvida ocorrem pela maior quantidade de poros e continuidade destes, além do tamanho da partícula. (AGRELA et al., 2011; BUTTLER, 2003; FONSECA; BRITO; EVANGELISTA, 2011; TEGGUER, 2012). Resultados obtidos por Buttler (2007) comprovam esta maior absorção, onde o autor obteve uma absorção para AGRC, nos primeiros 10 minutos, oriundos de vigotas e telhas, de respectivamente 91 e 80% da quantidade absorvida em 24 horas. Já Fedumenti (2013) obteve uma absorção de 6,29% em 10 minutos, o que representou uma absorção de 60,83% da absorção total medida em 24 horas.

Os agregados reciclados utilizados por diversos autores apontam uma maior absorção para os agregados miúdos, sendo o motivo, exposto por Tegguer (2012), a maior quantidade de argamassa aderida presente nestes agregados. Kou e Poon (2013) avaliaram a absorção de agregados graúdos reciclados e naturais em dois tamanhos (10 mm e 20 mm), sendo que absorção do maior agregado reciclado foi 4,81 vezes maior que seu respectivo agregado natural, enquanto que para o agregado de 10 mm a absorção foi 6,42 vezes maior que o respectivo Agregado Graúdo Natural (AGN).

A Tabela 4 apresenta um levantamento quanto à absorção de diversos agregados reciclados em relação a seus respectivos agregados naturais.

**Tabela 4 - Absorção de diferentes ARC.**

<b>Autor</b>	<b>Tipo de ARC</b>	<b>Absorção ARC (%)</b>	<b>Absorção AN (%)</b>	<b>Relação ARC/AN</b>
Ravindrarah e Tam (1987)	AMRC	6,20	0,63	9,84
Levy e Helene (2004)	AMRC	10,30	1,80	5,72
Morais (2011)	AMRC	3,50	1,00	3,50
Zega e Di Maio (2011)	AMRC	8,50	0,90	9,44
Geng e Sun (2013)	AMRC	7,20	1,60	4,5
Ji et al. (2013)	AMRC	7,20	1,20	6,00
Bairagi, Vidyadhara e Ravande (1990)	AGRC	5,76	2,00	2,88
Sagoe-Crentsil, Brown e Taylor (2001)	AGRC	5,60	1,00	5,60
Levy e Helene (2004)	AGRC	5,60	0,80	7,0
Rahal (2007)	AGRC	3,47	0,68	5,10
Grubba (2009)	AGRC	4,60	2,20	2,09
Bhutta et al. (2013)	AGRC	4,60	1,20	3,83

Pela Tabela 4 comprova-se a maior absorção dos ARC, em relação aos seus respectivos agregados naturais, onde a maior quantidade de argamassa aderida nos agregados miúdos resulta numa maior absorção em relação aos graúdos.

### **2.1.2 Concretos com ARC**

Com base na maioria das pesquisas realizadas, é consenso que a utilização de ARC resulta em um concreto com desempenho inferior. Porém estas pesquisas também demonstram que há viabilidade na sua utilização. Diversos autores vêm afirmando que o teor ideal de incorporação, sem grande queda nas propriedades, situa-se numa faixa entre 20 e 30 %. (CORINALDESI, 2010; ETXEBERRIA et al., 2007; EVANGELISTA; BRITO, 2007, 2010; LIMBACHIYA; MARROCCHINO; KOULOURIS, 2007; LIMBACHIYA; MEDDAH; OUCHAGOUR, 2012; SOUZA, 2006; TAM; TAM; WANG, 2007; TOPÇU; SENDEL, 2004; ZEGA; DI MAIO, 2011). Porém a necessidade de maiores teores de utilização vêm fazendo com uma série de trabalhos seja realizada, analisando a utilização de um ARC de melhor qualidade e de adições, e até de diferentes processos de produção destes concretos.

#### **2.1.2.1 Pré-Molhagem do ARC**

A utilização de agregados reciclados faz com que a produção destes concretos também mereça atenção. Um dos procedimentos comumente utilizado é a pré-molhagem do ARC, que consiste em adicionar ao agregado reciclado uma quantidade de água antes da mistura,

sendo esta quantidade e o período, função da taxa de absorção do agregado, de maneira que ao se realizar a mistura não venha a ocorrer alteração na relação a/c com consequente perda de trabalhabilidade. Padovan (2013) avaliou a influência da pré-molhagem em concretos produzidos com AGRC, afirmando que a pré-molhagem se mostra pouco influente na trabalhabilidade e na resistência à compressão, porém apresenta influência significativa na absorção de água por capilaridade. Em concretos que não fazem uso de aditivo superplastificante, a autora recomenda o teor de 80% de pré-molhagem. Nos concretos com aditivo superplastificante, a autora obteve o melhor desempenho para os concretos com o teor de pré-molhagem de 40%.

Já Poon et al. (2004) expuseram que a melhor maneira de se utilizar o agregado é no estado seco ao ar, pois pelos resultados obtidos com AGRC, as propriedades de concretos no estado fresco e endurecido se mostraram menos influenciáveis neste estado do que ao se utilizar o agregado no estado seco em estufa ou saturado com superfície seca. Os autores expõem que ao se utilizar AGRC no estado seco em estufa, a água move-se em direção à superfície do agregado, levando consigo partículas de cimento, que podem se acumular ao redor do agregado reciclado. Como resultado ocorre uma ligação mais forte entre a matriz e o agregado, especialmente nas primeiras idades.

Assim como no concreto convencional, o uso de aditivos em concretos com agregados reciclados também já faz parte da maioria das dosagens. Grande parte dos autores vêm utilizando aditivos com o objetivo de proporcionar um melhor desempenho ao concreto, em função das propriedades intrínsecas do ARC. (PEREIRA; EVANGELISTA; BRITO, 2012). Pereira (2010) afirma que o desempenho dos aditivos estão diretamente relacionados à quantidade de agregado reciclado utilizado, obtendo melhores desempenhos para as menores taxas de substituição e para as menores idades do ARC. O autor justifica este comportamento pelo aumento da superfície específica dos ARC, devido às suas formas mais alongadas e angulosas e pelo maior poder de retenção de água dos aditivos. O autor obteve resultados semelhantes para concretos com AMRC com superplastificantes de alto desempenho (a base de policarboxilatos) e o concreto referência de mesmo aditivo, com uma queda de apenas 3,3% na resistência para o concreto produzido com 100 % de AMRC.

#### 2.1.2.2 Concreto com ARC no Estado Endurecido

Em função das características do ARC, ocorre uma queda nas propriedades no estado endurecido, muito em função da maior porosidade deste agregado. (RAVINDRARAJAH; TAM, 1987; MARINKOVIC et al., 2010; DUAN; KOU; POON, 2013; XIAO et al., 2015).

### Resistência à Compressão

Em concretos com agregados naturais a importância do agregado à resistência à compressão normalmente é negligenciada, pois suas propriedades, principalmente resistência e porosidade, são normalmente mais resistentes que a matriz e a zona de transição. (JACINTHO; GIONGO, 2005; MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A utilização de agregados reciclados faz com que esta variável não possa ser negligenciada. As propriedades do ARC, principalmente a menor resistência e a maior porosidade, além da quantidade utilizada, fazem com que a resistência de concretos produzidos com estes agregados seja inferior ao produzido com agregado natural. (KWAN et al. 2012; KOU; POON, 2012). Segundo López-Gayarre et al. (2009, 2011), a resistência à compressão se mostra mais sensível à qualidade do agregado, enquanto o módulo de elasticidade ao teor de incorporação de ARC. A Tabela 5 apresenta um resumo de diferentes resistências à compressão com a utilização do ARC, em relação aos respectivos concretos de referência.

**Tabela 5 - Resistência à compressão com o uso de ARC.**

Autor	Teor de Incorporação (%)	Tipo de ARC	Idade (d)	Queda da Resistência em Relação à Referência (%)
Khatib (2005)	100	AMRC	90	26,03
	25		90	14,68
Tabsh e Abdelfatah (2009)	100	AGRC	28	30
Domingo-Cabo et al. (2009)	100	AGRC	28	2,29
Corinaldesi (2010)	30	AGRC (6-12 mm)	28	28,02
		AGRC (6-12 mm)		20,96
Pereira (2010)	100	AMRC	28	3,30
Zega e Di Maio (2011)	20	AMRC	28	2,06
	30			5,05
Kou e Poon (2013)	100	AGRC	28	21,60
			5 anos	12,31
			10 anos	7,11
Matias et al. (2013)	100	AGRC	28	3,90
Fedumenti (2013)	50	AGRC	28	18,44
			63	11,24

### **Absorção e Porosidade**

Segundo Campitelli (1987), a porosidade é a propriedade de apresentar poros ou vazios, sendo representada pela fração do volume total de poros ou de vazios de uma amostra. No concreto a porosidade ocorre principalmente pela água da mistura, porosidade dos agregados, fissuras no concreto endurecido, falhas de produção e também por alterações na zona de transição entre a pasta e os agregados. Olorunsogo e Padayachee (2002) afirmam que a absorção consiste num processo onde um fluido é aspirado para dentro de um material poroso, não saturado, por forças de capilaridade. Ho et al. (1986, apud GONÇALVES et al., 2007) afirmam que os mecanismos de transporte em um meio poroso dependem da distribuição do tamanho de poros e continuidade destes, da porosidade total e do teor de umidade do mesmo, sendo diretamente influenciado pelos materiais utilizados.

Levy (2001) expõe que ao se avaliar a absorção de um concreto, busca-se determinar o total dos poros permeáveis na estrutura do concreto, uma vez que o índice de vazios está relacionado ao total de poros existentes, servindo de forma indireta para estimar a durabilidade. Além disto, a distribuição de poros em concretos com ARC é modificada, principalmente em função do teor de agregado reciclado utilizado e de sua porosidade, que proporciona uma maior quantidade de macro e meso poros. (GÓMEZ-SOBÉRON, 2002; SANI et al., 2005).

Zaharieva et al. (2003) afirma que o concreto com ARC é significativamente mais permeável que o concreto com agregados naturais, principalmente ao se utilizar agregado miúdo reciclado. O autor ainda recomenda a utilização de adições com o objetivo de diminuir a porosidade e a permeabilidade. González-Fonteboa et al. (2011), Zega e Di Maio (2011) e Duan e Poon (2014) explicam esta maior absorção em função da argamassa aderida ao ARC, que resulta numa diminuição das propriedades mecânicas e de durabilidade.

Padovan (2013) demonstrou que em concretos com AGRC e aditivo superplastificante, quanto maior o teor de pré-molhagem, maior o coeficiente de capilaridade. Para uma relação a/c 0,55 e pré-molhagem de 80%, a autora obteve um coeficiente de capilaridade 31,25% maior que o concreto de mesma relação a/c, porém com pré-molhagem de 40%. Este mesmo comportamento também foi observado na absorção por capilaridade, com o teor de 80% apresentando uma absorção 33,33% maior que o teor de 40% de pré-molhagem. A autora aponta uma provável migração da água da argamassa para o AGRC, como um fator que leva ao menor coeficiente de capilaridade e absorção, conforme a diminuição do teor de pré-molhagem.

A Tabela 6 demonstra a influência dos agregados reciclados na absorção de concretos obtida por diversos autores.

**Tabela 6 - Absorção de concretos com ARC.**

<b>Autor</b>	<b>Teor de Incorporação (%)</b>	<b>Tipo de ARC</b>	<b>Tipo de Absorção</b>	<b>Absorção (%)</b>	<b>Aumento da Absorção em Relação à Referência (%)</b>
Gómez-Soberón (2002)	30	AGRC	Por imersão	8,60	2
	100			9,60	14
Zaharieva et al. (2003)	100	AGRC	Por capilaridade	12,50	74
Levy e Helene (2004)	50	AGRC	Por imersão	7,00	6
	100			8,00	21
Chakradhara, Bhattacharyya e Barai (2011)	50	AGRC	Por imersão	6,54	18
	100			7,37	33
Soares et al. (2014)	25	AGRC	Por imersão	-	9
	100			-	27

Com base na Tabela 6, comprova-se a grande influência dos agregados reciclados, especialmente os miúdos na absorção de concretos. Demonstrando que esta é uma propriedade fundamental à maior utilização dos agregados reciclados, devido à maior sensibilidade em relação às propriedades mecânicas, estando a absorção diretamente ligada às propriedades de durabilidade, como resistência à penetração de íons cloretos e a carbonatação.

### **Outras Propriedades no Estado Endurecido**

Matias et al. (2013) afirmam que além da origem do agregado, a resistência à tração na flexão também é influenciada pela forma e textura do agregado, que no ARC são mais angulosas e rugosas, o que faz com que esta propriedade não seja tão afetada como a resistência à compressão. Werle (2010) obteve ao analisar a resistência à tração por compressão diametral, apenas o teor de substituição apresentando significância estatística, verificando uma resistência à tração semelhante, para os diferentes tipos de AGRC utilizado. Khoshkenari et al. (2014) ao analisar a influência da fração mais fina do ARC (0 a 20 mm), obtiveram maior influência desta fração na resistência à tração que à compressão.

Quanto ao módulo de deformação do concreto com ARC, este geralmente é inferior ao concreto produzido com agregados naturais. Segundo Xiao et al. (2013a) esta queda deve-se ao fato do agregado reciclado apresentar um menor módulo de elasticidade que

o agregado natural, maior porosidade, e também por uma zona de transição mais fraca. (LEITE, 2001; POON; SHUI; LAM, 2004).

Em sua pesquisa, Benetti (2012) obteve uma diminuição dos valores do módulo de elasticidade dinâmico conforme o aumento do teor de AGRC, sendo que o teor de substituição influencia mais fortemente que a resistência do agregado reciclado. Já Pedro, Brito e Evangelista (2014) obtiveram uma redução no módulo de elasticidade de cerca de 22, 18 e 15% para os concretos produzidos com AGRC oriundos de concretos com faixa de resistência na ordem de respectivamente 20, 45 e 60 MPa.

Gujel (2014) também analisou o módulo de elasticidade Estático e dinâmico em concretos com AGRC no teor de 50% de substituição ao agregado natural. Os resultados obtidos, tanto pelo método dinâmico sob tensão, quanto pelo método estático, demonstraram que concretos com AGRC apresentam limite estático semelhante aos produzidos com agregados naturais, estando este limite situado numa faixa de 40 a 50% da resistência à compressão.

## **2.2 UTILIZAÇÃO DE ADIÇÕES EM CONCRETOS**

Adições minerais vêm sendo utilizadas a centenas de anos pela humanidade. Atualmente o uso em concretos vem trazendo enormes benefícios, por proporcionarem um concreto de melhor qualidade e também pela preservação do meio ambiente, seja pelo menor consumo de cimento, pela utilização de um produto de baixa energia incorporada, e pelo fato de muitas adições serem resíduos de processo produtivos, evitando-se a disposição final destes.

Em concretos com agregados reciclados, adições minerais também estão sendo utilizadas com o objetivo de promover uma melhora no desempenho do concreto produzido. Autores como Ann et al. (2008), Kou, Poon e Agrela (2011), Kou e Poon (2012), e Mukharjee e Barai (2014) comprovaram a viabilidade de utilização, obtendo bons resultados, acima até dos concretos produzidos apenas com agregados naturais.

A utilização de adições também influencia a zona de transição, em dois principais fatores, pela modificação no processo de hidratação, aumentando pontos de nucleação, e pela densificação das partículas da região, especialmente se a dimensão das partículas forem menores que os grãos de cimento. (OLLIVIER; MASO; BOURDETTE, 1995; ROSSIGNOLO, 2009; DAL MOLIN, 2011).

### 2.2.1 Utilização de microfios inertes

O fíler constitui-se em uma adição mineral sem atividade química, cujo objetivo é promover um efeito físico de empacotamento granulométrico, além de alguns pontos de nucleação para a hidratação do cimento. Dentre estes efeitos físicos, cita-se o efeito microfíler, que promove a densificação da mistura através do preenchimento de vazios, o refinamento da estrutura de poros e dos produtos de hidratação, que em função da restrição de espaço geram uma grande quantidade de pequenos cristais, ao invés de poucos cristais de grandes tamanhos. A utilização de fílers também promove uma alteração da zona de transição, em função da diminuição do acúmulo de água que fica retido nos agregados, diminuindo o tamanho desta região, e do preenchimento de espaços vazios deixados pelos produtos de hidratação do cimento. (DAL MOLIN, 2005).

Goldman e Bentur (1993) afirmam que o efeito microfíler ocorre quando a adição de microfios propicia modificações através apenas de efeitos físicos, e que quanto menor o tamanho da partícula do microfio, mais significativo será este efeito. Microfios (normalmente partículas menores que 75  $\mu\text{m}$ ) exercem grande influência no desempenho de concretos, já sendo sentido no estado fresco, uma vez que seu uso também afeta a reologia do concreto, reduzindo a quantidade de água disponível para formar a zona de transição, densificando-a devido ao melhor empacotamento das partículas. Além disto, a utilização de fíler pode reduzir a quantidade de pasta para se obter um concreto de mesma característica. (SOROKA; STERN, 1976; SILVA et al., 2005; DAMO, 2011; LAGERBLAD; GRAM; WESTERHOLM, 2014; LI; KWAN, 2015).

Para obtenção de melhorias nas propriedades com o uso de microfios, sua utilização deve ocorrer em um teor ideal, pois sua quantidade pode afetar as propriedades de maneira positiva ou negativa. O aumento da quantidade interfere de forma direta nas propriedades no estado fresco, alterando o abatimento, podendo acarretar em exsudação e retração plástica, que proporcionará um aumento no consumo de cimento, para manter a mesma relação a/c, e também da retração. (TOPÇU; UGURLU, 2003; BUEST; SILVA; CAMPITELI, 2005; LOPES, 2005; BEDERINA; MAKHLOUFI; BOUZIANI, 2011).

A NBR 7211 (ABNT, 2009), cita que a utilização de material passante na peneira 75  $\mu\text{m}$ , caso estes grãos tenham sido gerados durante a britagem de rocha, pode ter seu limite de utilização alterado de 3 para 10%, para concretos submetidos ao desgaste superficial, e de 5 para 12%, em concretos protegidos de desgaste superficial, desde que os grãos não influenciem nas propriedades dos concretos. A presente norma, ainda expõe que os limites de utilização de material passante na peneira 75  $\mu\text{m}$  para areia de britagem, estão entre 10 e 12%.

Já a NBR 15116 aceita como teor máximo de microfinos, a quantidade de até 15% para os AMRC e até 10% para AGRC. (ABNT, 2004).

Rosa (2013) recomenda a utilização de microfinos de britagem basáltica em argamassas de revestimento produzidas com areia natural em teores de até 30%, e para argamassas com areia de britagem basáltica teores de até 10%. Já Miranda e Selmo (2006) produziram argamassas de revestimento com agregados reciclados de RCD e microfinos, recomendando pequenos teores, em que teores de 20 a 25% já podem representar um valor crítico.

Topçu e Ugurlu (2003) utilizaram microfinos de origem calcária em concretos, recomendando sua utilização em teores de até 10%, ao passo que maiores teores, podem provocar uma queda no desempenho.

#### 2.2.1.1 Geração de Microfinos a Partir de Britagem

Topçu e Ugurlu (2003) afirmam que uma grande quantidade de microfinos é gerada durante a britagem de rochas, especialmente as mais fracas. Os autores ainda afirmam que se estes microfinos não forem argilosos, sua utilização será extremamente benéfica em concretos. Damo (2011) expõe que a quantidade de microfinos gerados num processo de britagem depende do sistema adotado, onde quanto maior o número de etapas de redução de tamanho, maior será o percentual gerado. Neste sentido, Arnold (2011) aponta uma maior quantidade de microfinos nas areias de britagem, em função do processo de britagem, que desgasta a rocha, gerando uma maior quantidade de material fino, cerca de 8 a 16%.

A Tabela 7 apresenta um levantamento da quantidade de finos presentes em diferentes agregados miúdos.

**Tabela 7 - Geração de microfinos.**

<b>Autor</b>	<b>Tipo de Agregado</b>	<b>Quantidade Presente (%)</b>	<b>Dimensão</b>
Pedrozo (2008)	AMN	3,00	Ø < 150 µm
Arnold (2011)	Areia natural quartzosa	1,50	Ø < 75 µm
	Areia de britagem (Basalto) – Britador Mandíbulas	11,20	Ø < 75 µm
	Areia de britagem (Basalto) – Britador VSI	9,20	Ø < 75 µm
Rodrigues (2011)	AMN	2,00	Ø < 150 µm
Damo (2011)	Areia de britagem (Basalto) – Britador VSI	14,15	Ø < 75 µm
	Areia de britagem (Basalto) – Britador Cone	18,44	Ø < 75 µm
Heineck (2012)	AMN – não lavado – Ø < 2,4 mm	2,30	Ø < 75 µm

### 2.2.1.2 Produtos Cimentícios com Microfinos Inertes

Rosa (2013) avaliou o efeito da utilização de microfinos de britagem basáltica em argamassas de revestimento. As argamassas produzidas pelo autor com areia natural e teores de microfinos de 1,5, 6, 10, 20 e 30%, apresentaram maior resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico até o teor de 20%, porém, para a resistência à tração na flexão, a incorporação de microfinos produziu uma diminuição na resistência. Este comportamento também foi observado por Arnold (2011), que também obteve maior resistência e módulo de elasticidade com o aumento do teor de microfinos em argamassas. A autora explica este comportamento ao melhor empacotamento dos grãos e da menor demanda de água, que os microfinos proporcionaram.

Çelik e Marar (1996) obtiveram, em concretos convencionais, aumento da resistência à compressão ao utilizarem 10% de microfinos de britagem, teores acima desta quantidade resultaram em resistências menores que os concretos produzidos sem microfinos. Os autores expõem que a maior quantidade de microfinos exige uma maior quantidade de pasta para cobrir a maior superfície específica. Resultado semelhante ao obtido por Topçu e Ugurlu (2003), que utilizaram microfinos em teores de 7 a 15% em substituição ao agregado natural. Os autores obtiveram ganhos de resistência à compressão ao utilizarem estas adições, obtendo os melhores resultados para os teores de 7 e 10%. Já Bederina, Makhloufi e Bouziani (2011) obtiveram os melhores resultados com o teor de 5%, ao produziram concretos com fíler calcário em teores que variaram de 0 a 40%, em relação à massa de areia.

Os microfinos também influenciam nas propriedades de durabilidade. Rosa (2013) obteve uma diminuição no índice de vazios e na absorção, afirmando que este comportamento está relacionado à redução de água na mistura que obteve com a adição dos microfinos. Arnold (2011) também obteve uma diminuição na absorção por capilaridade, no período de 10 minutos, ocorreu uma diminuição de 31% utilizando 10% de microfinos em argamassas de revestimento, em relação à produzida com 1,5% de microfinos.

O melhor preenchimento dos vazios também foi observado em concretos, onde Topçu e Ugurlu (2003) obtiveram uma queda no coeficiente de permeabilidade com o aumento de microfinos. Assim como Çelik e Marar (1996), que obtiveram uma queda na absorção com microfinos em teores de até 15%, sendo que quantidades acima deste teor proporcionaram um aumento na absorção. Por consequência, também obtiveram menor coeficiente de permeabilidade, que demonstrou ser, inversamente proporcional à quantidade de microfinos, em função da menor quantidade de vazios proporcionada pelos microfinos.

### 2.2.2 Utilização de Cinza de Casca de Arroz

Subproduto agrícola, a CCA é obtida pelo processo de queima da casca de arroz, realizada no próprio beneficiamento do grão, especialmente na secagem. A obtenção da CCA pela queima da casca de arroz pode ser obtida com controle da temperatura de queima, em fornos para a fabricação de cerâmica, engenhos para secagem de grãos e até pela queima não controlada realizada a céu aberto. (HOPPE, 2008; SOKOLOVICZ, 2013).

Vários autores destacam os ganhos com a utilização da CCA em materiais cimentícios, especialmente os voltados ao meio ambiente ao se substituir a CCA pelo cimento, fazendo com que seu uso esteja em constante crescimento. (ZERBINO et al., 2013). Ceconello (2013) cita a utilização da CCA como uma alternativa viável e sustentável, porém esta utilização deve estar diretamente ligada a um teor ideal de utilização, de maneira a não prejudicar as propriedades dos produtos resultantes.

O uso da CCA em materiais cimentícios contribui para a solução, de maneira eficiente e ambientalmente correta, da destinação final desta cinza, proporcionando uma redução na demanda por áreas de aterros, além de minimizar os riscos potenciais de poluição ao meio ambiente. Soma-se a estas vantagens a redução no consumo de cimento, a redução de custos e energia, a preservação de recursos naturais, tudo isso estando atrelado a um resultado de melhora nas propriedades de concretos, tanto nas propriedades mecânicas quanto as de durabilidade. (HOPPE, 2008; SOARES et al., 2015).

O motivo pela grande vantagem no uso de CCA está na sua elevada pozolanicidade, pela grande quantidade de sílica amorfa e elevada superfície específica. Duart (2008) afirma que em função da reação pozolânica que ocorre com o uso da CCA, esta pode tranquilamente ser utilizada em concretos, obtendo-se alterações positivas na microestrutura do mesmo, que acarreta na maior coesão no estado fresco, no aumento da resistência, diminuição da porosidade e refinamento dos poros, aumentando a durabilidade. O autor ainda cita que além da reação pozolânica, pozolanas também exercem influência pelo efeito físico, através da finura dos grãos, que em função das forças de Van der Waals proporcionam uma aproximação das partículas. Silveira (2007) aponta algumas características que tornam a CCA uma superpozolana, como o alto teor de sílica amorfa, estrutura altamente celular, superfície específica alta, a forma angular e diâmetro médio normalmente inferior a 45  $\mu\text{m}$ .

### 2.2.2.1 Origem, Produção e Beneficiamento da CCA

O Brasil está entre os maiores produtores de arroz, com produção na safra de 2009/2010 de 11,26 milhões de toneladas, com o Rio Grande do Sul possuindo o posto de maior produtor brasileiro. (MAPA, 2013).

O beneficiamento do grão gera a casca como resíduo, em uma quantidade de cerca de 20%, que por questões econômicas e ambientais, aliado ao seu potencial calorífico vem sendo utilizado no processo de combustão em indústrias, gerando como resíduo a cinza. O uso da casca é comum nas indústrias arroseiras, utilizando-a como combustível no processo de beneficiamento do grão, o que gera uma quantidade considerável de cinza residual, que normalmente não tem destinação específica, sendo descartada no meio ambiente. (DELLA et al., 2005; CEZAR, 2011).

O uso da CCA em larga escala como substituição ao cimento, ainda possui como entrave a falta de homogeneidade da CCA e um padrão mínimo de qualidade, uma vez que sua utilização como pozolana necessita de um produto homogêneo e reativo que são garantidos pelo processo de queima. Soma-se a isso o beneficiamento da cinza através de sua moagem e peneiramento, que busca um maior refinamento dos grãos, aumentando sua superfície específica, e consequente sua pozolanicidade. (HOPPE, 2008; KIELING, 2009).

Sokolovicz (2013) coloca como os dois principais fatores para se obter uma CCA com alta reatividade pozolânica o processo de queima com controle de temperatura e a finura da partícula, obtida pela moagem. Quanto ao processo de queima, Santos (2006) cita a necessidade de controle do processo de queima para obtenção de uma pozolana de boa qualidade, podendo esta ser realizada a céu aberto, em fornalhas tipo grelha ou leito fluidizado, além de parâmetros como a temperatura de queima e o tempo de exposição.

Autores como Duarte (2008) e Cezar (2011) afirmam que não há consenso sobre a melhor faixa de temperatura para a queima da CCA. Porém o autor cita a faixa entre 500 e 700 °C, uma vez que temperaturas elevadas tendem a produzir uma CCA com maior quantidade de sílica cristalina, principalmente quando o resfriamento ocorrer naturalmente ao ambiente.

Quanto ao processo de moagem da CCA, este também possui importante papel para obtenção de elevada pozolanicidade, pois a reatividade esta diretamente relacionada com a dimensão da partícula, onde quanto maior a área superficial, maior a reação com o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , resultante da hidratação do cimento. (HOPPE, 2008; XU et al., 2015).

Sokolovicz (2013) demonstrou a importância da moagem da CCA ao comparar a resistência à compressão aos 540 dias, em concretos produzidos com CCA moída e natural, em teor de substituição ao cimento de 15%. Os resultados demonstraram uma elevação na resistência de 21% com o uso da cinza moída, enquanto que a utilização da CCA natural resultou num decréscimo na resistência de 3%.

#### 2.2.2.2 CCA em Concretos

Adições minerais resultam em concretos com uma estrutura mais densa, de menor porosidade e melhor ligação entre a matriz e os agregados. (DUAN et al., 2013). Souza (2011) e Jamil et al. (2013) afirmam que o efeito da substituição do cimento por pozolanas como CCA em materiais cimentícios pode ser dividido em efeito físico e pozolânico. Enquanto o físico reflete num melhor empacotamento da mistura, preenchendo os vazios entre as partículas de cimento e aumentando a compacidade da mistura, o pozolânico está associado às reações que provocam com  $\text{Ca(OH)}_2$ , formando novos produtos de hidratação (C-S-H secundário). Cezar (2011) coloca que pelo fato de a CCA reagir com o  $\text{Ca(OH)}_2$ , esta reação é mais lenta que a reação do  $\text{C}_3\text{S}$  do cimento Portland, o que resulta num ganho de resistência também mais lento.

Cezar (2011) obteve uma elevação dos 7 aos 91 dias na resistência à compressão em concretos produzidos com relação a/c 0,55, sem CCA, com CCA moída e natural, no teor de 15% de substituição ao aglomerante, de respectivamente 53, 75 e 95%, para os concretos produzidos. Mesmo com a maior elevação na resistência observada no concreto produzido com a CCA ao natural, esta ainda foi inferior à resistência do concreto com CCA moída, com cerca de 27%.

Hoppe (2005) analisou a influência da CCA, quanto à resistência à compressão, onde para uma relação a/c de 0,50, os teores de substituição de 10, 20 e 30%, proporcionaram uma elevação na resistência aos 91 dias, em relação ao concreto sem CCA, de respectivamente 21, 22 e 27%.

Ceconello (2013) utilizou CCA com o objetivo de analisar uma possível melhora na retração por secagem de concretos com AGRC. O autor produziu concretos com CCA em teores de substituição de 10 e 20% em relação ao cimento, e AGRC nos teores de 25 e 50% do agregado natural. Os resultados obtidos demonstraram uma redução nos valores para os concretos produzidos com 20% de CCA, ao contrário do ocorrido com o uso de 10% de CCA. Ceconello (2013) expõe o motivo deste comportamento uma melhor interação entre a CCA e os componentes da mistura, que resultou numa redução do volume total de poros, reduzindo a retração.

Geneasan, Rajagopal e Thangavel (2008) obtiveram em concretos produzidos com 30% de CCA, em substituição ao cimento, uma redução de 35% na permeabilidade e 28% no coeficiente de difusão dos cloretos.

Ao substituir o cimento por CCA num teor de 20%, Sartori (2013) obteve para concretos com 25 e 50% de AGRC uma redução no coeficiente de carbonatação de respectivamente 40% e 11%. Esta melhora é explicada pelo autor pela diminuição dos macroporos através da reação pozolânica, tornando-os mais fechados e tortuosos, dificultando a difusão de  $\text{CO}_2$ . O autor também obteve redução na taxa de absorção variando de 34 a 53% com o uso da CCA em concretos com AGRC, citando como motivo além da reação pozolânica entre a CCA e o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  da matriz, uma provável reação com o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  presente na pasta do AGRC, uma vez que este não estava carbonatado, resultando numa diminuição da porosidade do agregado reciclado, com conseqüente fortalecimento da zona de transição.

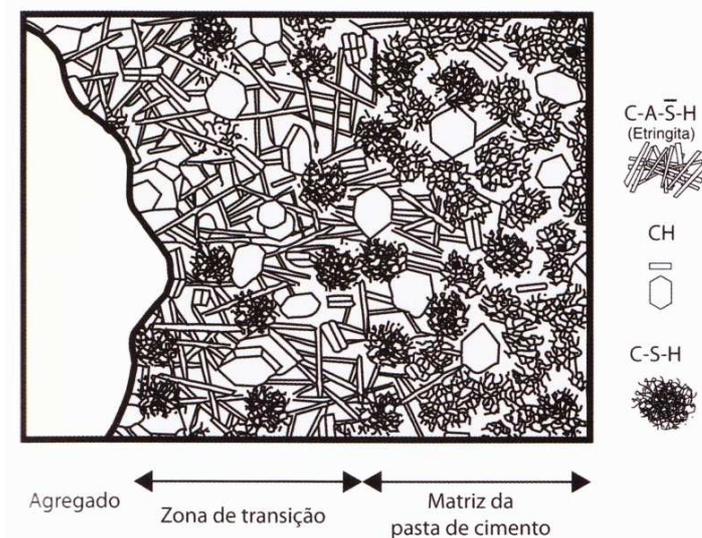
### **2.3 ZONA DE TRANSIÇÃO EM CONCRETOS**

Para se obter um bom entendimento do comportamento do concreto, além da porosidade da matriz e do agregado, deve-se avaliar também a porosidade da zona de transição (ZT) que existe entre ambos. Com a utilização de agregados reciclados, estas propriedades merecem ainda mais atenção, em função da maior porosidade do agregado reciclado, que também influencia diretamente na porosidade da pasta e da zona de transição. (LEITE, 2001; SUN et al., 2015).

A pasta de cimento na zona de transição possui uma estrutura diferente que a pasta distante da superfície do agregado, possuindo uma grande quantidade de portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) e etringita. A formação da zona de transição entre a pasta e o agregado ocorre inicialmente através do filme de água aderido à superfície dos agregados, que proporciona uma maior relação a/c na região. (OLLIVIER; MASO; BOURDETTE, 1995; CARDE; FRANÇOIS, 1997; PAULON, 2005; PAULON; KIRCHHEIM, 2011).

Em função desta maior quantidade de água ocorre uma maior formação de cristais de etringita e portlandita de tamanhos maiores, formando uma estrutura mais porosa. Por último, em função desta maior quantidade de poros, ocorre a formação de Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H) pouco cristalino e uma segunda geração de etringita e portlandita de tamanhos menores, proporcionando uma diminuição da porosidade da zona de transição. (CAMPITELI, 1987; MEHTA; MONTEIRO, 2008). Sicat et al. (2014) afirmam que a maior porosidade da ZT, além de influenciar nas propriedades de durabilidade, também influencia as

propriedades mecânicas, exibindo uma menor resistência e maior capacidade de deformação que a matriz e o agregado. A Figura 2 demonstra uma representação da zona de transição em concretos convencionais, mostrando uma menor quantidade de C-S-H na região.



**Figura 2 - Zona de transição do concreto.**

Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

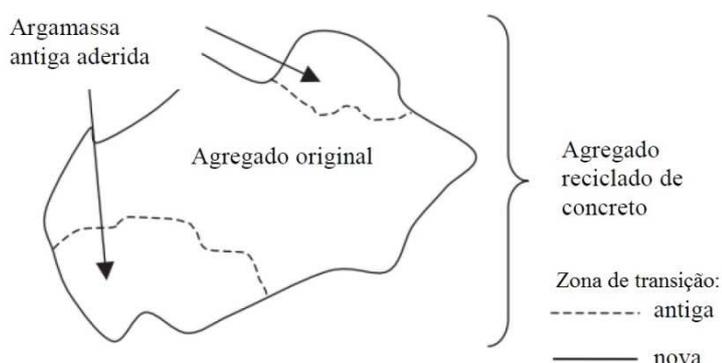
Bentz (2009) e Sidorova et al. (2014) apontam que os principais fatores que influenciam a ZT são a relação  $a/c$  e o tipo de agregado, em função de sua superfície, porosidade e absorção. Ke et al. (2010) afirma que quando o agregado possui baixa capacidade de absorção forma-se uma ZT mais porosa que a matriz. Quanto ao tamanho e forma do agregado, quanto maior a área superficial, maior a ZT, pois na face do agregado cria-se uma região de maior quantidade de água, aumentando a porosidade, a formação de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e conseqüentemente a espessura. A textura do agregado também influencia a ZT, pois um agregado mais rugoso resulta numa melhor aderência, enquanto que superfícies mais lisas não permitem a penetração da pasta, resultando numa pior aderência. (MONTEIRO; MASO; OLLIVIER, 1985; ELSHARIEF; COHEN; OLEK, 2003; BASHER; BASHER; LONG, 2005; NEVILLE; BROOKS, 2013).

Gao et al. (2005) e Duan et al. (2013) afirmam que a utilização de adições também é extremamente benéfica à ZT em função do refinamento de poros que estas proporcionam, resultando numa maior quantidade C-S-H, maior densidade e aderência ao agregado. Mohammed, Dawson e Thom (2014) colocam as adições não-inertes, como sílica ativa e cinza volante, as ideais para a melhora das propriedades da ZT, em comparação com adições inertes, como fíler calcário.

### 2.3.1 Zona de transição em concretos com ARC

A zona de transição em concretos com agregados reciclados possui uma microestrutura mais fraca, e uma zona de transição mais porosa. Esta microestrutura é mais complexa que em concretos convencionais, pois o ARC possui duas zonas de transição, uma entre o ARC e a nova pasta de cimento e outra no próprio ARC, entre seu agregado natural e a pasta antiga aderida, normalmente menos densa que a pasta nova. (TAM; GAO; TAM, 2005; KOU; POON, 2009; XIAO et al., 2012 THOMAS et al., 2013).

Como exposto, concretos com ARC possuem duas zonas de transição, uma entre o agregado reciclado e a nova pasta de cimento, chamada de zona de transição nova, e outra entre o agregado natural do ARC e a pasta aderida ao ARC, chamada de zona de transição antiga, conforme Figura 3. Esta zona de transição antiga e a argamassa aderida correspondem à parte mais fraca do agregado reciclado, com uma grande quantidade de poros e fissuras. Na região do ARC sem argamassa aderida, a zona de transição se desenvolve da mesma maneira que no agregado natural (zona de transição nova). (TAM; GAO; TAM, 2005; ETXEBERRIA; VÁZQUEZ; MARÍ, 2006; KONG et al.; 2010).



**Figura 3 - Zona de transição em concretos com ARC.**

Fonte: Adaptado de Tam, Gao e Tam (2005).

Para Poon, Shui e Lam (2004) a zona de transição nova, pode ter sua porosidade diminuída em função de uma maior hidratação do cimento que pode ocorrer no local. Esta maior ou menor porosidade e densidade da ZT nova dependem do estado de saturação do ARC no momento da mistura, que irá influenciar significativamente a movimentação de água entre as duas argamassas. Em geral, quando se utiliza um agregado poroso e saturado, há um enfraquecimento da ZT, pelo maior acúmulo de água na região. Quando o agregado é utilizado seco ou parcialmente saturado, há uma melhora da ZT nova, pois ao absorver a água da mistura ocorre a migração de grãos de cimento para dentro do agregado reciclado, resultando em uma maior quantidade de produtos de hidratação na região.

A utilização de adições também é benéfica para a melhoria da zona de transição, Xiao et al. (2013b) utilizaram cinza volante e obtiveram para a zona de transição nova uma maior quantidade de C-S-H em relação a zona de transição antiga, que apresentou uma grande quantidade de vazios e cristais de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Além disto, a utilização de adições minerais como pozolanas também tem como objetivo a reação com o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , que se acumulam em maior quantidade na zona de transição, produzindo C-S-H, e fortalecendo a ZT nova. (KONG et al., 2010).

Trabalhos como os realizados por Tam, Gao e Tam (2005), Tam e Tam (2008) e Li et al. (2012) demonstraram que o próprio método de mistura influencia nas propriedades dos concretos com ARC. Nestes trabalhos ficou comprovado a melhora nas propriedades mecânicas e de durabilidade, ao inicialmente revestirem o ARC, com pasta de cimento e adições, ocorrendo também melhora na zona de transição, densificando-a pela maior presença de C-S-H, e pela menor presença de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , possível graças à diminuição da porosidade e aumento da densidade do ARC pelo método de mistura utilizado.

### **2.3.2 Análise da zona de transição**

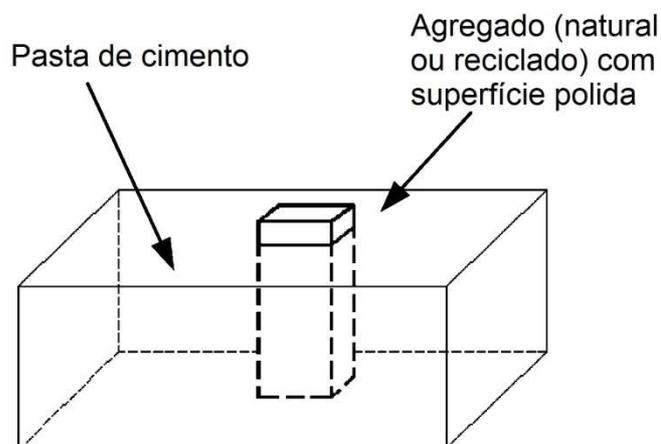
Gao et al. (2014) apontam a espessura e a porosidade como os principais parâmetros de caracterização da ZT. Para um concreto convencional, Akçaoglu, Tokyay e Çelik (2004) citam que a ZT possui espessura na ordem de 10 a 50  $\mu\text{m}$ , trabalhos como os realizados por Prokopski e Halbiniak (2000), Diamond e Huang (2001) e Wang et al. (2009) também corroboram, porém citam que a espessura fica mais próxima dos 50  $\mu\text{m}$ . Já Sidorova et al. (2014) observaram uma ZT de 70 e 100  $\mu\text{m}$ , para pastas com agregados naturais produzidas com relação a/c de respectivamente 0,4 e 0,5.

Grande parte dos trabalhos que analisaram a zona de transição basearam-se predominantemente em duas técnicas, análise de imagem por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), e medidas de dureza. A seguir são apresentadas algumas metodologias e resultados obtidos por diversos autores ao utilizarem microscopia, enquanto que os trabalhos que fizeram uso de técnicas de micro e nanodureza estão expostos no subcapítulo sobre o tema.

#### **Poon, Shui e Lam (2004)**

Poon, Shui e Lam (2004) avaliaram a zona de transição em três concretos diferentes, com AGRC de concreto convencional e de alto desempenho, além de um concreto com agregado natural como referência. A metodologia adotada para avaliar a zona de transição se baseou em estudos que avaliaram a interface entre cimento e fibra de vidro, e consistiu inicialmente na produção de concretos em formato prismático. Após desmoldagem, os concretos foram serrados

de maneira a possuírem dimensões de 20x50x5 a 10 mm. Estas amostras foram colocadas em um recipiente com pasta de cimento, conforme Figura 4, e após 28 dias de cura úmida foram preparadas as amostras da interface entre a argamassa da amostra de concreto (ARC) com a pasta.



**Figura 4 - Representação esquemática do procedimento adotado pelos autores.**

Fonte: Adaptado de Poon, Shui e Lam (2004).

Os autores realizaram a análise da ZT por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), obtendo para o concreto com ARC de alto desempenho a zona de transição mais densa entre os concretos analisados, com uma maior quantidade de C-S-H, que foi explicada pela melhor qualidade do concreto de alto desempenho, em função das adições utilizadas. Apesar da melhora da ZT, a porosidade dos agregados utilizados prevaleceu na resistência à compressão, já que o concreto com AGN apresentou maior resistência, seguido pelo produzido com AGRC de alto desempenho e pelo AGRC convencional, com uma diminuição na resistência aos 28 dias, de respectivamente 6,75 e 21,45% em relação à referência.

#### **Etxeberria, Vázquez e Marí (2006)**

Etxeberria, Vázquez e Marí (2006) produziram concretos utilizando um agregado graúdo em quatro teores de substituição (0, 25, 50 e 100%). Os autores estabeleceram a mesma resistência para todas as dosagens, e a mesma consistência, variando a quantidade de água, cimento e aditivo superplastificante. A análise microestrutural ocorreu através de um microscópio óptico de luz fluorescente após um período de 8 meses de cura em câmara úmida. Os autores citam que a utilização deste método é comumente utilizada para analisar a ligação entre concretos velhos e novos. A preparação da amostra ocorreu retirando-se uma fatia localizada entre o centro e a parte superior de um corpo de prova cilíndrico, com a dimensão final da amostra sendo de 15x30x45 mm. Após o corte, estas fatias sofreram uma impregnação à vácuo de uma camada de 20 µm de resina epóxi fluorescente, cujo objetivo era o preenchimento dos poros capilares,

espaços vazios e fissuras, contrastando com os demais espaços na análise microscópica. Os autores obtiveram resultados que demonstram uma maior relação a/c na pasta de cimento antiga, resultando numa maior porosidade em relação à pasta nova, que tem sua porosidade aumentada quando o percentual de agregado reciclado é superior a 50 %.

#### **Kong et al. (2010)**

Kong et al. (2010) produziram uma espécie de concreto sanduíche e avaliaram a zona de transição por meio de MEV por elétrons secundários, em concretos com AGRC e adições minerais. Este “sanduíche” foi produzido inicialmente cortando pequenas fatias de um corpo de prova prismático de concreto, que foram revestidas por uma pasta de cimento e adição (cinza volante), e posterior secagem por cerca de 30 min, com o objetivo de representar o que ocorre com o ARC ao misturá-lo inicialmente com água, cimento e adições. Após a secagem, as fatias foram inseridas em novo molde prismático, para ser realizada uma nova concretagem representando o concreto novo, conforme Figura 5.



**Figura 5 - Amostra produzida pelos autores.**

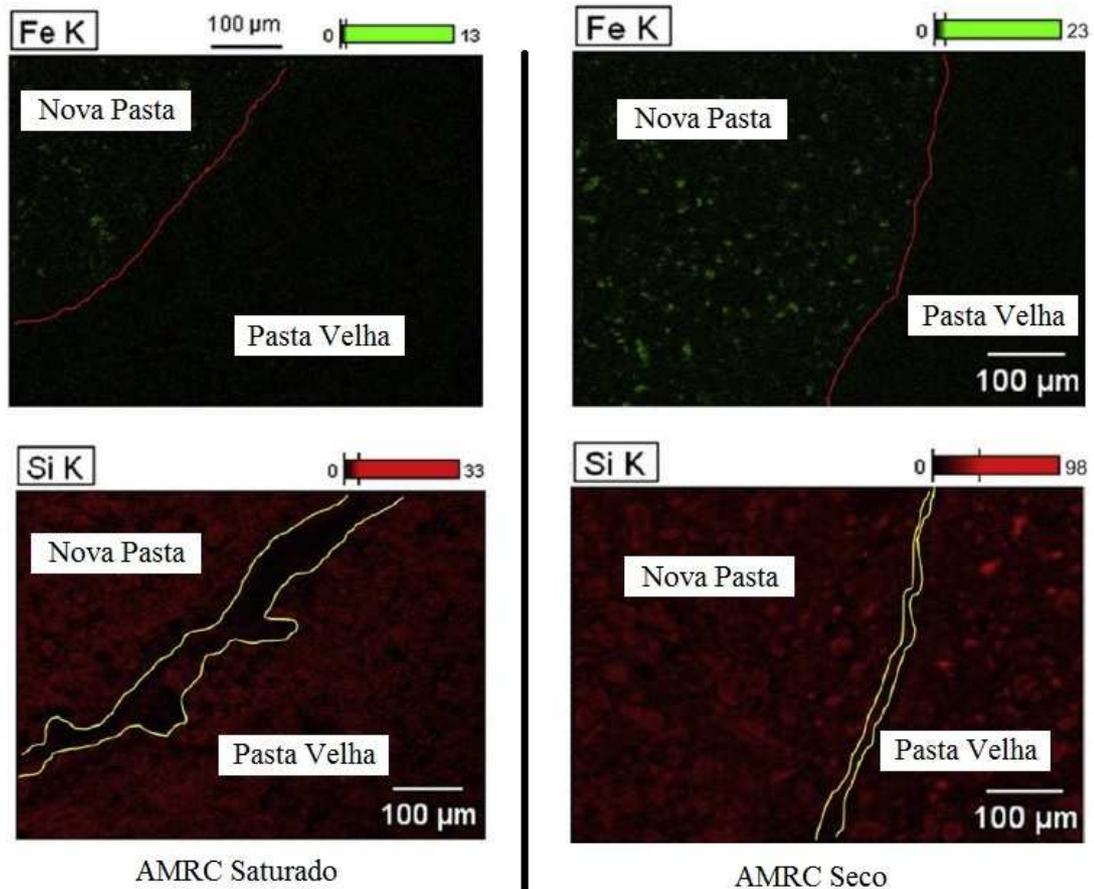
Fonte: Adaptado de Kong et al. (2010).

Os resultados observados através de MEV mostram que as pozolanas adicionadas ao agregado reciclado reagiram com o  $\text{Ca(OH)}_2$  localizado na argamassa aderida, resultando em novos produtos de hidratação, o que proporcionou uma melhora da aderência na zona de transição, e conseqüentemente o aumento das propriedades avaliadas.

#### **Zhao et al. (2015)**

Zhao et al. (2015) avaliaram a zona de transição em argamassas de concreto produzidas com AMRC no estado seco e saturado, por meio de MEV com análise por Espectroscopia de Energia Dispersiva (*Energy Dispersive Spectroscopy* – EDS), os autores realizaram mapeamento dos elementos como ferro e silício. Pelo ferro estimaram a localização da ZT, pois utilizaram na argamassa velha cimento branco, que possui baixo teor de ferro. Assim como também pela quantidade de silício, que apresenta menor quantidade na ZT, definindo então a ZT como a zona em que se concentra a menor quantidade de silício, próximo

à região de maior quantidade de ferro, conforme Figura 6. Assim, estimaram a espessura em 20 a 80  $\mu\text{m}$  para o AMRC no estado saturado e em 10  $\mu\text{m}$  para o AMRC no estado seco.



**Figura 6 - MEV realizado pelos autores.**

Fonte: Adaptado de Zhao et al. (2015).

Como resultado Zhao et al. (2015) apontam para uma espessura maior da ZT entre a pasta e o AMRC no estado saturado do que no estado seco, em função de no estado seco o agregado absorver uma maior quantidade de água juntamente com grãos de cimento.

Já Mohammed, Dawson e Thom (2013) fazem um contraponto à estimativa da espessura da zona de transição através do uso do EDS pelo MEV, uma vez que muitos autores se baseiam na quantidade de cálcio na análise, havendo sérias dificuldades de se diferenciar o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  do  $\text{CaCO}_3$ .

## 2.4 TÉCNICA DE NANOINDENTAÇÃO

Como a técnica de nanoindetação foi a técnica utilizada neste trabalho para analisar a ZT, foi elaborada uma revisão específica sobre o tema, descrita a seguir, onde

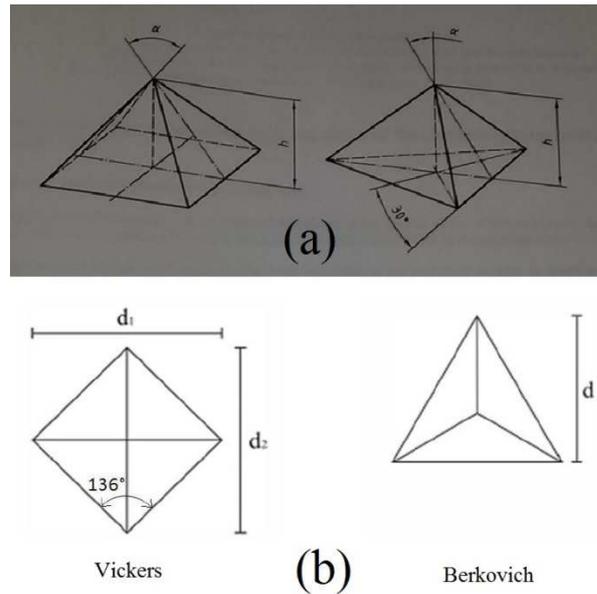
foram abordados seus princípios e sua utilização em materiais cimentícios, como pastas de cimento, clínquer e também na ZT.

Blando (2005) afirma que dentro das técnicas de medida de dureza, a mais difundida e utilizada é a técnica de indentação, utilizada para análise do comportamento elasto-plástico da superfície de materiais, que graças ao controle computadorizado associado a sensores de deslocamento torna o teste capaz de obter resultados instantâneos do material.

A técnica, que tem como princípio a aplicação de uma carga por uma agulha, chamada de indentador ou penetrador, ao longo do tempo vem sendo muito utilizada na realização de medidas de propriedades mecânicas e elásticas. A técnica é largamente utilizada na medida de propriedades mecânicas, especialmente de materiais homogêneos, filmes finos e de materiais em pequenos volumes. Estes testes dinâmicos são definidos como Testes Instrumentados de Dureza (Hardness Instrumental Tests – HIT). (HAY; PHARR, 2000 apud Souza, 2011; JONES; GRASLEY, 2011).

O princípio da técnica, que em escala nano é denominada de nanoindentação, é extremamente simples, onde o penetrador, de geometria e propriedades conhecidas, é pressionado em um material até que a carga ou profundidade, previamente definida, seja atingida, e após este instante, o indentador é removido da amostra. Durante este processo o material se deforma, refletindo as propriedades mecânicas. (SOUZA; 2007; CONSTANTINIDES; ULM, 2004, 2007).

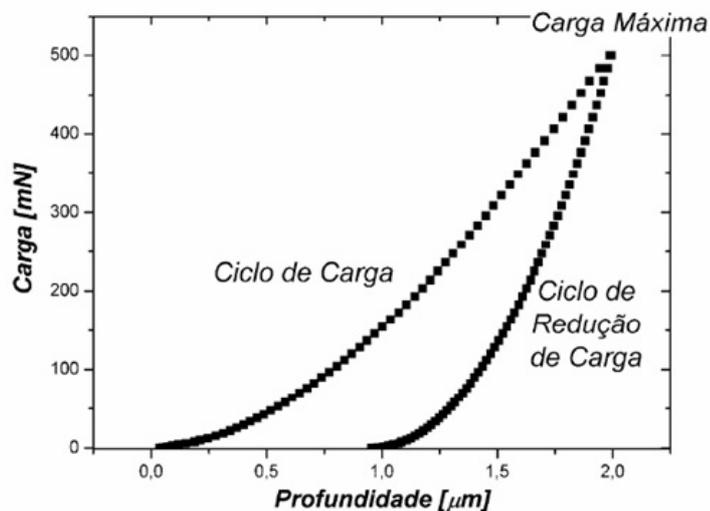
Callister (2002) coloca o diamante e os carbetos como os materiais mais utilizados para os indentadores, enquanto que para os formatos, as geometrias mais utilizadas são as piramidais, do tipo Vickers e Berkovich. A Figura 7 demonstra os penetradores Vickers e Berkovich, bem como os formatos que ambos deixam no material.



**Figura 7 - Formato e marca de penetração dos penetradores Vickers e Berkovich.**

Fonte: (a) ISO (2002) e (b) Massardo (2011).

O teste tem início quando o penetrador entra em contato com o material, com valor de carga mínimo, e após o contato a carga vai sofrendo incrementos, iniciando-se o ciclo de carregamento. O ciclo de carregamento é finalizado com o alcance da carga máxima, que tem duração pré-estabelecida, período chamado de *creep*, ou também de retenção na carga máxima, iniciando-se então o ciclo de descarregamento. Nesta etapa o indentador sofre reduções de carga até alcançar o valor de carga mínima, finalizando o teste com a retirada completa do indentador da amostra. (BLANDO, 2005). A Figura 8 demonstra o comportamento do material com o ciclo de carregamento e descarregamento da carga, sendo registrado por meio de gráfico.



**Figura 8 - Ciclo de carregamento da nanoindentação.**

Fonte: Blando (2005).

Conforme o penetrador é dirigido para dentro do material, durante o ciclo de carregamento, ocorrem deformações elásticas e plásticas, estimando-se assim, pela profundidade de penetração e de acordo com o penetrador utilizado, o seu valor de dureza. Na fase de descarga (remoção do indentador), somente a porção elástica do material é reestabelecida, de modo que é possível conhecer o módulo de elasticidade do material, uma vez que durante o ciclo de descarga, a deformação do material está diretamente ligada à recuperação elástica do material. Assim fica dispensada a utilização de microscópio ótico para a medida da indentação e posterior correlação com a dureza, evitando-se distorções nos resultados. (BLANDO, 2005; ZHU et al., 2007).

Souza (2007) cita que um dos métodos mais utilizados para interpretação e análise de resultados é o proposto por Olivier e Pharr (1992), que utiliza o trabalho necessário para criação da indentação e do trabalho durante o carregamento, dado pela área sob a curva de carregamento e descarregamento.

#### **2.4.1 Utilização da Nanoindentação em Materiais Cimentícios**

A técnica que foi originalmente desenvolvida para materiais homogêneos, metálicos e cerâmicos, ao contrário do concreto, extremamente heterogêneo e com compostos que variam de um nível nano para macro, vem nos últimos anos sendo largamente utilizada para análise de compostos cimentícios, analisando desde clínquer, compostos do cimento hidratado, argamassas e concretos. Porém a utilização da nanoindentação em materiais a base de cimento, traz uma série de dificuldades, em função da heterogeneidade, o que faz com que para uma análise estatística confiável, sejam necessárias centenas de indentações numa única amostra, e uma complexa validação por análise estatística. (JENNINGS et al., 2007; ULM et al., 2010).

Dentre os trabalhos já realizados, destacam-se aqueles que vêm medindo as propriedades dos compostos do cimento hidratado, como os trabalhos de Constantinides e Ulm (2004, 2007), Trtik; Münch; Lura, (2009), Xiao et al. (2013b), Venkovic, Sorelli e Martirena (2014) e Silva, Nemecek e Stemberk (2014). Estes trabalhos demonstram principalmente a existência de dois compostos de C-S-H, que se assemelham na composição, mas que diferem estruturalmente entre si, sendo um de alta densidade e outro de baixa densidade. Estes trabalhos ainda demonstram que as propriedades elásticas do C-S-H são intrínsecas ao composto. Para Jennings et al. (2007) os valores de módulo de elasticidade dos C-S-H de pasta de cimento, ficaram na ordem de 18 GPa, para o de baixa densidade, enquanto o de alta densidade ficou na ordem de 31 GPa.

Já Vandamme (2008 apud Souza 2011) em ensaio com pastas de cimento e pastas de silicato tricálcio, avaliando a influência da relação água/cimento, do tratamento térmico, e das adições de sílica ativa e fíler calcário, chegou à conclusão da existência de um terceiro tipo de C-S-H, de ultra-alta densidade, que poderia conter nanopartículas de portlandita em sua rede porosa. Os resultados obtidos para o módulo de elasticidade estão expostos na Tabela 8, que também apresenta os resultados de outros trabalhos que avaliaram os compostos do cimento hidratado.

**Tabela 8 - Resultados de módulo de elasticidade obtidos com nanoindentação em compostos do cimento hidratado.**

	Constantinides e Ulm (2004)	Constantinides e Ulm (2005, apud Souza 2011)	Zhu et al. (2007)	Sorelli et al. (2008)	Vandamme (2008 Apud Souza 2011)	Hu e Li (2015)
C-S-H Baixa Densidade	21,7±2,2	18,8±4,0	23,4±3,4	19,7±2,5	23,3±8,5%	24,2
C-S-H Alta Densidade	29,4±2,4	30,1±4,0	31,4±2,1	34,2±5,0	30,6±5,7%	30,3
CH	38±5	41,0±3,9	-	-	43,2±5,1%	36,4
Microporo	-	-	-	7,0±4,0	-	0,0
Macroporo	-	9,1±2,3	-	-	-	0,0
Pasta de cimento	-	21,6±3,2	-	-	-	-
Areia	-	-	-	76,3±15,1	-	-
Cimento Anidro	-	-	-	141,1±34,8	-	90,3

Pesquisas também vêm sendo realizadas para avaliação dos compostos do clínquer. A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos para estes compostos.

**Tabela 9 - Resultado de nanoindentações nos compostos do clínquer.**

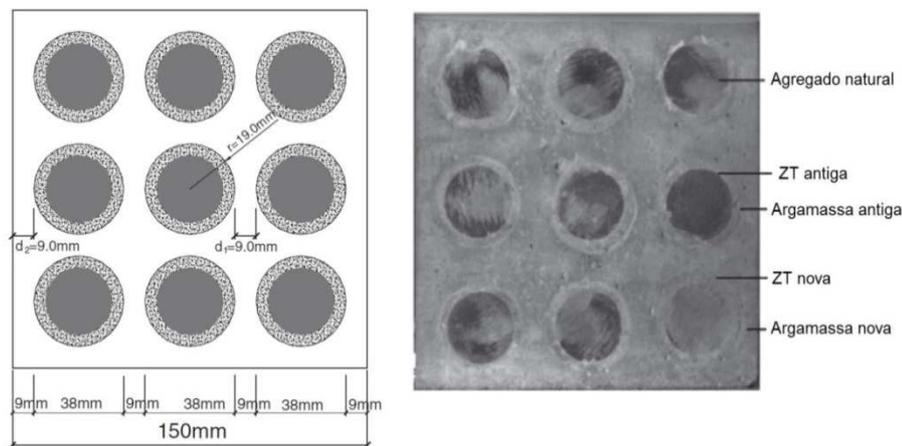
Autor	Propriedade	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
Velez et al. (2001)	E (GPa)	135±7	130±20	145±10	125±25
Souza (2007)	E (GPa)	127±6	130±11	137±4	143±5

A técnica de nanoindentação vem sendo utilizada, especialmente nos últimos anos para análise da ZT. Esta técnica permite a obtenção de resultados quantitativos, fornecendo mais informação do que a microscopia

Com o objetivo de demonstrar como alguns autores se utilizaram da técnica para análise da ZT, são apresentados alguns trabalhos sobre o tema.

**Xiao et al. (2013a, 2013b )**

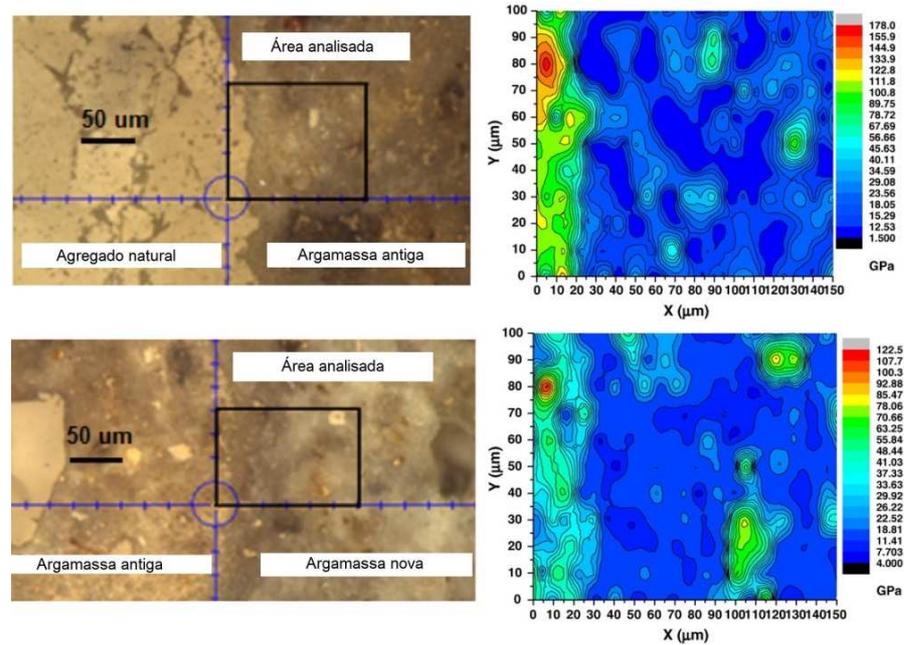
Xiao et al. (2013a) para avaliarem a zona de transição de concreto com agregado reciclado por nanoindentação, produziram como amostra um concreto reciclado. O concreto foi produzido a partir de nove agregados graúdos naturais, serrados em formato cilíndrico e revestidos por uma camada de argamassa, representando a zona de transição antiga. Estes nove agregados naturais revestidos foram dispostos em uma fôrma prismática e novamente revestidos por uma camada de argamassa, representando a zona de transição nova, conforme Figura 9.



**Figura 9 - Amostras iniciais produzidas.**

Fonte: Adaptado de Xiao et al. (2013a).

Para a realização do ensaio os autores utilizaram quatro áreas de 150  $\mu\text{m}$  X 100  $\mu\text{m}$ , onde 341 indentações foram realizadas na medição. Pela Figura 10 visualizam-se duas amostras, uma englobando o agregado natural e a argamassa antiga, e outra entre a argamassa antiga e a nova, com ambas apresentando como resultado o módulo de elasticidade. O autores avaliaram o módulo de elasticidade, em função deste contribuir para o entendimento do comportamento de fissura e ruptura da zona de transição.



**Figura 10 - Amostra e resultados do teste por nanoindentação.**

Fonte: Adaptado de Xiao et al. (2013a).

Pelos resultados, Xiao et al. (2013a) estimaram a espessura das duas zonas de transição através da variação do módulo de elasticidade. Para a zona de transição antiga os autores estimaram uma espessura de cerca de 50  $\mu\text{m}$ , e um módulo de elasticidade de 20 GPa, contra uma espessura de 60  $\mu\text{m}$  e módulo de elasticidade de 18 GPa para a ZT nova. A argamassa velha e nova, tiveram seus módulos de elasticidade estimados em respectivamente, 25 e 23 GPa.

#### **Sidorova et al. (2014)**

Sidorova et al. (2014) avaliaram a ZT por nanoindentação entre a pasta de cimento e três diferentes agregados, natural (calcário – AN), ARC e agregado reciclado de cerâmica vermelha (ARCV). Para a preparação das amostras, os autores produziram corpos de prova de pasta de cimento com relação a/c de 0,3, 0,4 e 0,5, nas dimensões de 2,5x2,5x30 cm, introduzindo uma quantidade de 8 a 10 agregados. Após 7 dias de cura, foi cortado uma fatia central do corpo de prova com espessura de cerca de 1,5 cm, que foi embutida e polida.

Os autores realizaram 200 medidas, sendo 40 medidas por linha, com as medidas espaçadas a cada 6  $\mu\text{m}$ , e em 5 linhas, espaçadas a cada 10  $\mu\text{m}$  para cada amostra. Para a análise os autores consideraram os seguintes parâmetros de módulo de elasticidade para os compostos do cimento hidratado:

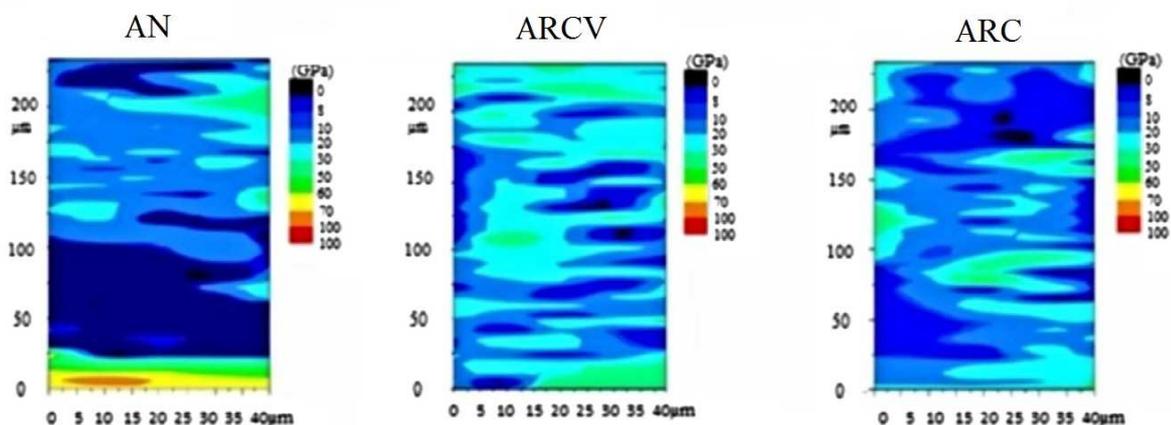
- Porosidade: 0-8 GPa
- C-S-H e etringita: 8-30 GPa

- CH: 30-50 GPa
- Cimento não hidratado e agregado natural:  $\geq 50$  GPa

Os autores ainda classificaram os resultados de módulo de elasticidade da seguinte maneira:

- Extremamente alto:  $\geq 30$  GPa
- Alto: 20 a 29 GPa
- Médio: 15 a 19 GPa
- Baixo:  $<15$  GPa

Pelos resultados obtidos, a ZT no agregado natural para as relações a/c 0,3, 0,4 e 0,5, foi de respectivamente 50, 70 e 100  $\mu\text{m}$ . Porém nos agregados reciclados, os autores não conseguiram estimar a espessura da ZT, devido à semelhança da interface com à matriz, o que impossibilitou a diferenciação da ZT com a pasta. Os autores justificaram estes resultados pela maior absorção dos agregados reciclados, que ao absorverem uma maior quantidade de água evitavam o acúmulo de água na interface, impedindo a formação da ZT. A Figura 11 demonstra a distribuição do módulo de elasticidade nas amostras com relação a/c 0,5.



**Figura 11 - Resultados obtidos para a relação a/c.**

Fonte: Adaptado de Sidorova et al. (2014).

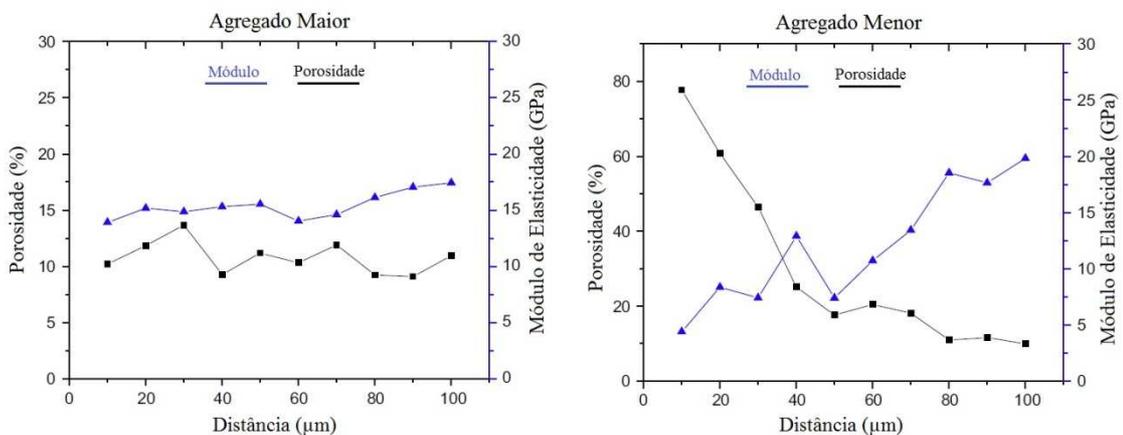
### **Xie et al. (2015)**

Xie et al. (2015) analisaram a zona de transição em um concreto do tipo RFC (*rock-filled concrete*), que consiste num concreto obtido pela deposição de Concreto Auto-Adensável (CAA) sobre uma camada de agregados de elevadas dimensões (tipicamente maior que 30 cm). Os autores tiveram como objetivo avaliar a ZT entre o concreto auto-adensável e os agregados

gráudos, que em função de suas dimensões possuem um elevado acúmulo de água em sua superfície. Os autores produziram corpos de prova cilíndricos, preenchidos inicialmente com os agregados gráudos de duas dimensões, 19,6 a 25,4 mm e 5,7 a 9,5 mm e depois introduziram o CAA. Após 28 dias de cura, foram preparadas as amostras para a análise da ZT.

A porosidade foi medida através das imagens obtidas por MEV e por softwares gráficos, e o módulo de elasticidade pela nanoindentação. Para a nanoindentação os autores definiram duas regiões de 100x120  $\mu\text{m}$ , com 143 medidas em cada região. Uma região próxima a um agregado de maior dimensão e a outra num agregado de menor dimensão.

Os resultados obtidos na ZT não foram de encontro ao comportamento que grande parte dos trabalhos realizados demonstram, pois foi observada uma menor porosidade na ZT do agregado de maior dimensão. Quanto à nanoindentação, os resultados de módulo de elasticidade demonstraram que a ZT no agregado de menor dimensão foi inversamente proporcional à porosidade, demonstrando o resultado esperado. Quanto maior a distância da ZT, maior o módulo de elasticidade e menor a porosidade. Já para o maior agregado, a porosidade e o módulo se mostraram mais proporcionais, com um comportamento mais linear e com menor variação em relação à amostra com agregado menor. A Figura 12 demonstra os resultados obtidos.



**Figura 12 - Resultados obtidos pelos autores.**

Fonte: Adaptado de Xie et al. (2015).

Os autores colocam como motivo, a diferença do concreto produzido em relação aos concretos convencionais, pois os agregados gráudos não foram misturados ao CAA, e nem os corpos de prova adensados, sendo o volume de vazios preenchido apenas com a ação da gravidade pelo CAA. Os autores também justificaram que os vazios ao redor dos agregados maiores, foram maiores do que nos agregados menores, o que fez com estes fossem melhor preenchidos pelo CAA.

**Nezerka et al. (2015)**

Nezerka et al. (2015) analisaram o comportamento elástico pela nanoindentação da interface entre uma argamassa a base de cal e fragmentos de cerâmica vermelha, extraída de uma igreja construída no século IX, com o objetivo de analisar mais profundamente o atual estado de conservação do sistema construtivo utilizado na época. Pela análise do MEV com EDS, foi observado uma maior quantidade de sílica e alumina na interface em relação à matriz. O resultado da nanoindentação demonstrou uma maior rigidez na interface em relação à matriz a base de cal, com um resultado de 18,4 GPa na interface, sendo comparada pelos autores ao C-S-H de baixa densidade, contra 3,6 GPa da matriz.

**Trabalhos que utilizaram a técnica de Microdureza Vickers**

A técnica de microdureza Vickers tem o mesmo princípio da nanoindentação, aplicação de carga por um penetrador, neste caso o penetrador Vickers, por um determinado tempo, porém em escala maior.

Lee e Choi (2013) utilizaram esta técnica para avaliar a ZT em concretos produzidos com AGRC. Os autores retiraram amostras de 10x30x1 mm do centro de um corpo de prova cilíndrico e realizaram as medidas de microdureza com uma carga de 10 g com um tempo de contato de 10 s. Os pontos de medida variaram de 90 µm para o interior do agregado para até 300 µm do seu exterior, espaçados a cada 30 µm, englobando a argamassa antiga e a nova. Através desta medida os autores assumiram a zona de transição na faixa de menor dureza. Pelos resultados, os autores demonstraram que a zona de transição velha é mais fraca que a zona de transição nova, com um valor 40,70% menor, sendo o motivo pela maior dureza na ZT nova explicado pela sua maior absorção, com consequente migração de grãos de cimento e geração de uma maior quantidade de produtos de hidratação na região.

Mukharjee e Barai (2014) obtiveram na zona de transição os menores valores de microdureza Vickers em concretos com agregados reciclados, colocando como motivo a maior porosidade, que foi observada pela maior quantidade de microporos e microfissuras. Os autores produziram concretos com ARC e nanosílica, obtendo uma melhora da ZT nova com o uso da adição, porém ainda assim com valores inferiores a ZT entre o agregado natural e a pasta. Ao analisarem o comportamento da dureza e da porosidade, os autores obtiveram resultados inversamente proporcionais para todas as amostras, em que quanto maior a distância à ZT, maior a dureza e menor a porosidade.

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

A elaboração do programa experimental ocorreu com base na revisão teórica realizada, buscando avaliar a influência do Fino Basáltico (FB) e da Cinza da Casca de Arroz (CCA) em argamassa de concreto, com ênfase na interface entre duas argamassas, representando a zona de transição nova, que ocorre ao se utilizar ARC em concretos.

Neste capítulo o programa experimental é descrito, detalhando o planejamento adotado para o alcance dos objetivos propostos. Apresenta-se também a caracterização dos materiais utilizados, os procedimentos adotados para produção dos corpos de prova, macro e microestruturais, e as respectivas propriedades avaliadas.

#### 3.1 PLANEJAMENTO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

Com o objetivo de organizar as atividades a serem desenvolvidas e executá-las de forma mais eficiente, a pesquisa seguiu o fluxograma apresentado na Figura 13, e na sequência as variáveis de resposta, de controle e não controláveis.

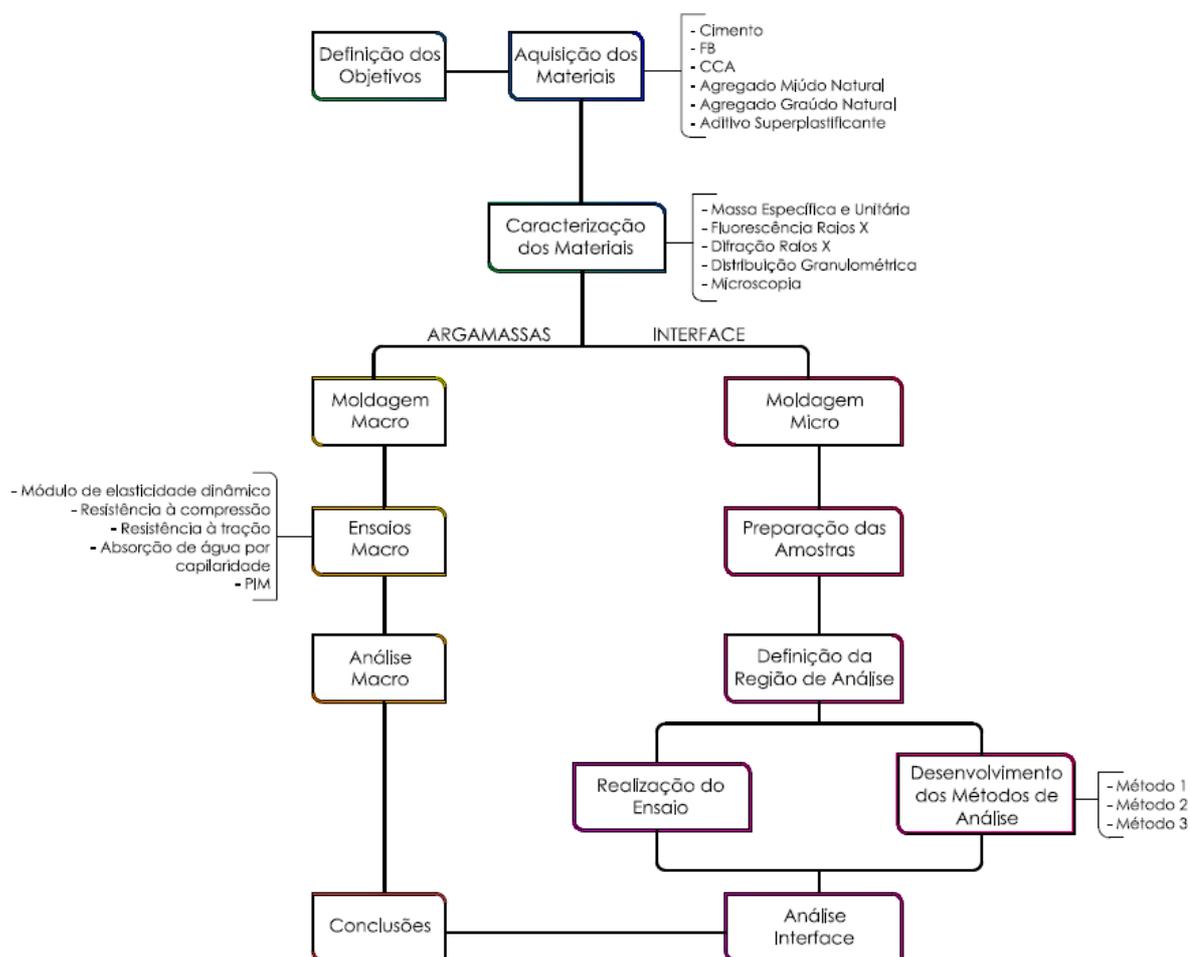


Figura 13 - Fluxograma de atividades do programa experimental.

### 3.1.1 Variáveis de Resposta

Apresentam-se as seguintes variáveis de resposta a serem analisadas quanto às argamassas:

- Massa específica (28 dias);
- Módulo de elasticidade dinâmico (28 dias);
- Resistência à compressão (28 dias);
- Resistência à tração por compressão diametral (28 dias);
- Absorção por capilaridade (28 dias);
- Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM) (28 dias);

Quanto à interface entre duas argamassas de concreto:

- Módulo de elasticidade pela técnica de nanoindentação na interface (63 dias);

### 3.1.2 Variáveis de Controle

As variáveis de controle e seus níveis fixos foram determinados com o objetivo de avaliar as influências que estas exercem sobre as variáveis de resposta:

- Tipo de adição: inerte (Fino Basáltico – FB) e não-inerte (Cinza da Casca de Arroz – CCA);
- Teor de FB: 5, 10 e 15%, em adição à massa de cimento;
- Teor de CCA: 5, 7,5 e 10%, em adição à massa de cimento;

Os fatores fixos adotados são:

- Tipo de cimento: CP II-F-32;
- Relação a/c: 0,62;
- Consistência por espalhamento:  $360 \pm 10$  mm;
- Procedimento de cura: embalados e mantidos em sala com temperatura e umidade controlada.

## 3.2 MATERIAIS

### 3.2.1 Cimento e Adições

Com o objetivo de comparar as características do cimento e das adições optou-se por apresentar estes materiais no mesmo subcapítulo.

Decidiu-se por utilizar o cimento CP II-F-32 em função deste conter pequena quantidade de adições em comparação com cimentos do tipo CP III e CP IV, e por esta adição não ser reativa.

O fino basáltico foi obtido junto a uma pedreira localizada no município de Campo Bom-RS, cujo processo de cominuição ocorre por britador do tipo VSI. Após a obtenção dos microfinos, estes foram novamente submetidos a um processo de peneiramento, com o objetivo de garantir que todo o material utilizado fosse passante na peneira de malha 0,075 mm.

A cinza da casca de arroz utilizada neste trabalho foi a mesma utilizada nos trabalhos de Fedumenti (2013) e Erhart (2014), sendo comercialmente chamada de sílica da casca de arroz, oriunda da cidade de Alegrete-RS, e gerada a partir da queima da casca de arroz em forno de leito fluidizado.

A massa específica destes materiais foi determinada conforme ABNT NBR NM 23:2001, e encontra-se exposta na Tabela 10.

**Tabela 10 - Massa específica do cimento e adições.**

Material	Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )
Cimento	2,91
FB	2,63
CCA	2,07

As características físicas e químicas estão expostas nas Tabela 11, Tabela 12, onde para o cimento os resultados foram obtidos junto ao fabricante, e das adições por técnicas de Fluorescência de raios X por dispersão de energia (ED-XRF). Os resultados para o cimento demonstraram conformidade com as exigências estabelecidas por norma.

**Tabela 11 - Características físicas do cimento.**

<b>Ensaio</b>	<b>Resultado</b>	<b>Metodologia</b>	<b>Exigência (ABNT NBR 11578:1991)</b>
Finura # 200 (%)	2,40	ABNT NBR 11579:2012	-
Finura # 325 (%)	13,60	ABNT NBR 12826:2014	-
Blaine (g/cm <sup>2</sup> )	3320	ABNT NBR NM 76:1998	-
Consistência normal (%)	26,7	ABNT NBR NM 43:2003	-
Tempo de pega (h:min) Início	03:00	ABNT NBR NM 65:2003	≥ 1
Tempo de pega (h: min) Fim	03:30	ABNT NBR NM 65:2003	≤ 10
Expansão à quente (mm)	0,50	ABNT NBR 11582:2012	≤ 5
Resistência à compressão à 1 dia (MPa)	14,7	ABNT NBR 7215:1997	-
Resistência à compressão aos 3 dias (MPa)	28,9	ABNT NBR 7215:1997	≥ 10
Resistência à compressão aos 7 dias (MPa)	34,7	ABNT NBR 7215:1997	≥ 20
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	41,6	ABNT NBR 7215:1997	≥ 32

Fonte: Fabricante.

Tabela 12 - Características químicas do cimento e da CCA.

Ensaio	Cimento			CCA	
	Metodologia	Teor (%)	Exigência (ABNT NBR 11578:1991)	Teor (%)	Exigência (ABNT NBR 12653:2014)
CaO	ABNT NBR 14656:2001	59,30	-	0,33	-
SiO <sub>2</sub>	ABNT NBR 14656:2001	19,46	-	94,99	(SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) ≥ 50,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ABNT NBR 14656:2001	5,11	-	0,18	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ABNT NBR 14656:2001	3,00	-	0,06	
MgO	ABNT NBR 14656:2001	4,85	≤ 6,5	0,01	-
SO <sub>3</sub>	ABNT NBR 14656:2001	2,68	≤ 4,0	0,57	≤ 5,0
K <sub>2</sub> O	-	-	-	1,01	-
Cl	-	-	-	0,43	-
MnO	-	-	-	0,20	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	-	-	-	0,10	-
TiO <sub>2</sub>	-	-	-	0,01	-
ZnO	-	-	-	0,00	-
Perda ao fogo	NBR NM 18:2012	4,98	≤ 6,5	2,12	≤ 6,0
Cao livre	NBR NM 12:2012	1,15	-	-	-
Resíduo insolúvel	NBR NM 15:2012	1,35	≤ 2,5	-	-
Equivalente alcalino	NBR 14656:2001	0,68	-	-	-

Fonte: Fabricante e Fedumenti (2013).

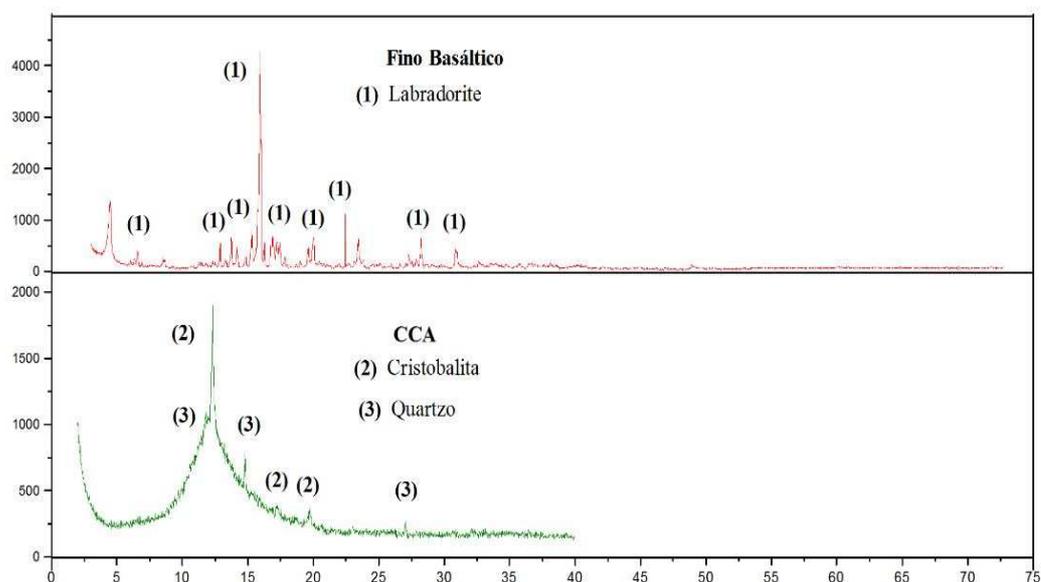
O resultado da CCA demonstra que a mesma classifica-se, conforme ABNT NBR 12653:2012, como uma pozolana de classe E, apresentando um teor elevado de sílica, com a soma dos compostos de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> representando um total de 95,23%. A atividade pozolânica da CCA também foi comprovada por Fedumenti (2013), utilizando o método proposto pela ABNT NBR 5752:1992, e também por um método adaptado, ajustando a consistência com o uso de aditivo, muito similar ao proposto na revisão da norma, que atualmente é de 2014, o que fez com que não fosse considerada a repetição do ensaio. Em ambos os métodos a CCA apresentou valor de pozolanicidade superior ao exigido pela norma (≥ 75%), com o método convencional resultando numa atividade pozolânica de 105%, e com a utilização do aditivo de 132%.

Em função da heterogeneidade de cristais presentes numa rocha basáltica, com a técnica de Fluorescência de Raios X, não foi possível realizar a análise quantitativa dos elementos do FB, sendo realizada apenas a análise qualitativa, conforme Tabela 13.

**Tabela 13 - Fluorescência de raios X qualitativa do FB.**

Elementos Majoritários (>50%)	Menor Quantidade (5%<X<50%)	Elementos Traços (<5%)
-	Fe, Si, Ca e Al	K, Ti, Ba, S, Mn, Sr e Zn

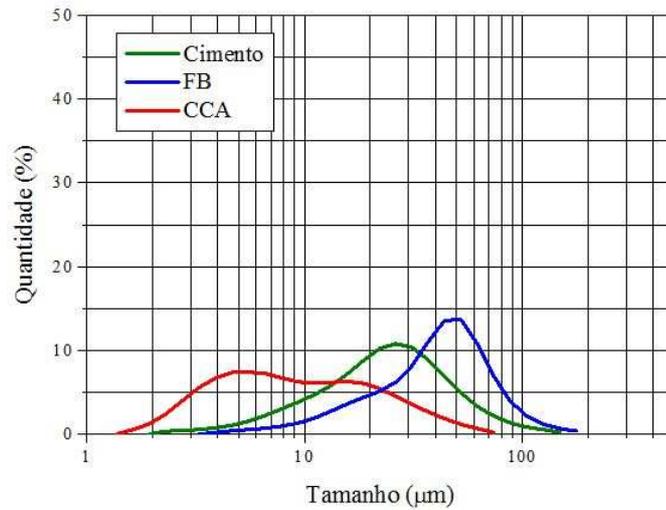
A Figura 14 apresenta o resultado da caracterização mineralógica das adições, obtidas pela técnica de Difração de Raios X. Os resultados obtidos para a difração da CCA foram obtidos através do trabalho de Fedumenti (2013).



**Figura 14 - Difração de raios X FB e CCA.**

O resultado da difração do FB demonstra uma grande quantidade de picos cristalinos, identificados como labradorites, enquanto que a caracterização mineralógica da CCA demonstrou picos de sílica cristalina e cristobalita.

A distribuição granulométrica dos grãos foi obtida por meio de granulometria a laser, de acordo com Figura 15, com os percentuais acumulados expostos na Tabela 14, e os resultados completos nos apêndices.

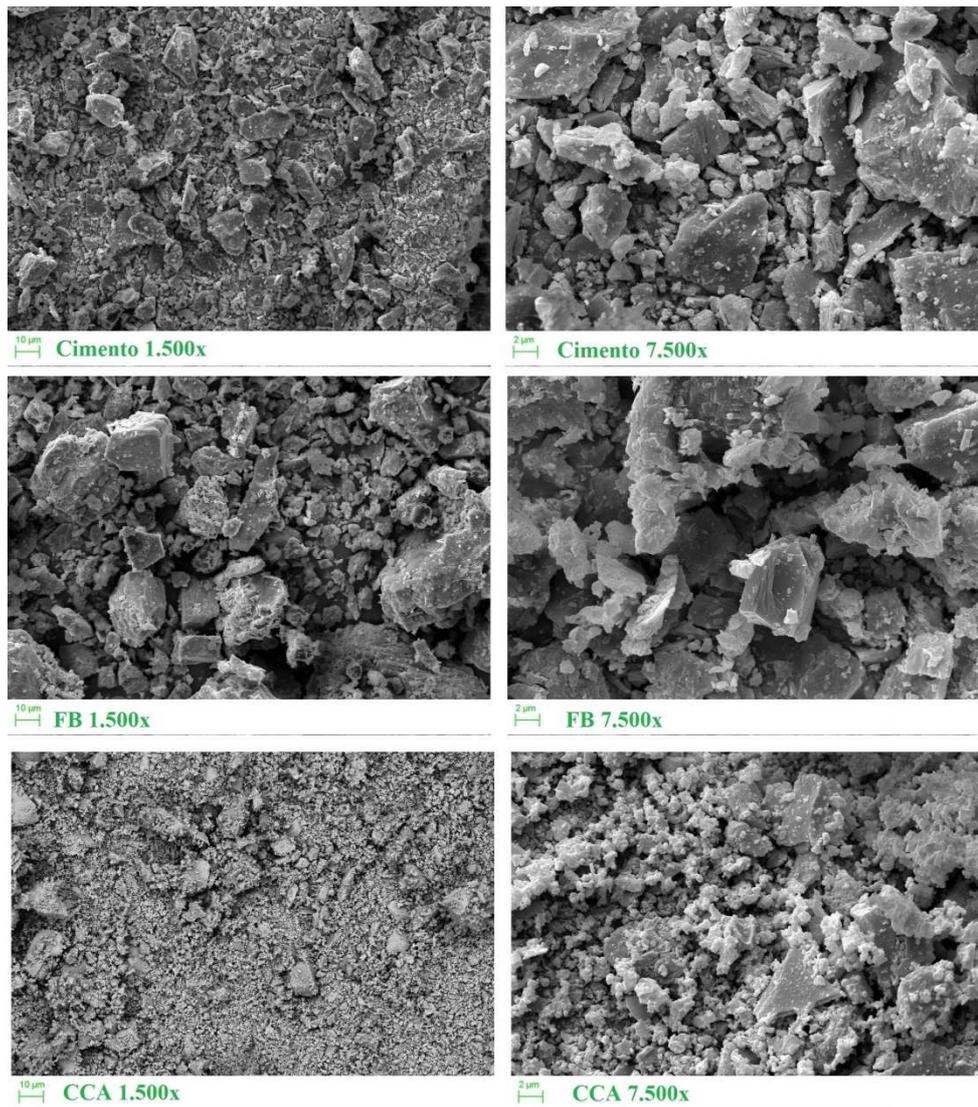


**Figura 15 - Distribuição granulométrica do cimento e adições.**

**Tabela 14 - Distribuição granulométrica acumulada do cimento e adições.**

Massa Acumulada (%)	Dimensão Equivalente ( $\mu\text{m}$ )		
	Cimento	FB	CCA
10	7,88	14,11	02,93
50	22,06	38,61	07,97
90	49,10	70,32	26,24

Realizou-se uma microscopia por MEV nas ampliações de 1.500 e 7.500 vezes, apresentada na Figura 16.



**Figura 16 - Microscopias cimento e adições.**

Com base nas características obtidas, especialmente a distribuição granulométrica e microscopia, a CCA apresentou maior finura que o cimento e o FB. Os finos utilizados apresentaram granulometria mais grossa que a CCA e o cimento. Deste modo estima-se que apenas a parcela de dimensão inferior a 75  $\mu\text{m}$  pode ser considerada como fíler, colaborando com o refinamento de poros e com a hidratação pela formação de pontos de nucleação.

### **3.2.2 Agregado Miúdo Natural**

O agregado miúdo utilizado foi uma areia quartzosa de leito de rio, proveniente do Rio Jacuí, na região de Porto Alegre–RS.

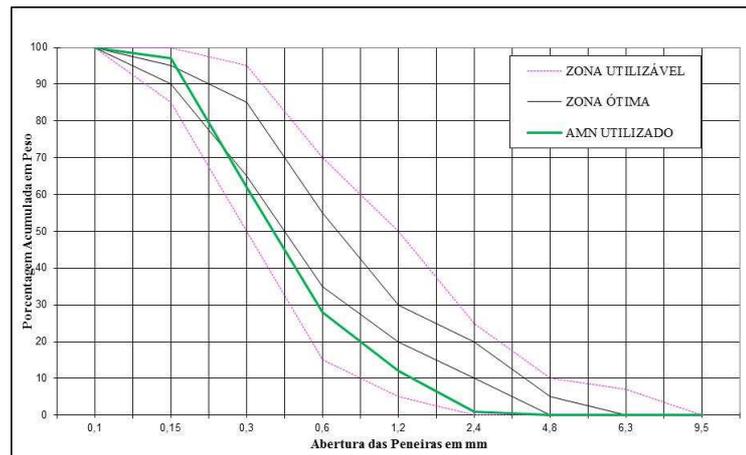
Para a utilização da areia, esta inicialmente foi peneirada e lavada, sendo utilizada apenas a fração passante na peneira de malha 4,80 mm, e retida, por meio de lavagem na

peneira de malha 0,075 mm. Esta lavagem teve por objetivo remover todas as partículas menores que 75  $\mu\text{m}$ , evitando que estas interferissem nos resultados. Esta quantidade de material passante na peneira 75  $\mu\text{m}$  foi realizada conforme ABNT NBR NM 46:2003, após o processo de lavagem, resultado numa quantidade de 0,16% de material passante.

A Tabela 15 apresenta as propriedades físicas da areia utilizada, enquanto a Figura 17 a distribuição granulométrica.

**Tabela 15 - Propriedades do AMN.**

Propriedade	Resultado	Metodologia
Massa unitária ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1,50	ABNT NBR NM 45:2006
Massa específica ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2,60	ABNT NBR NM 52:2009
Dimensão máxima característica (mm)	2,40	ABNT NBR NM 248:2003
Módulo de finura	2,08	ABNT NBR NM 248:2003



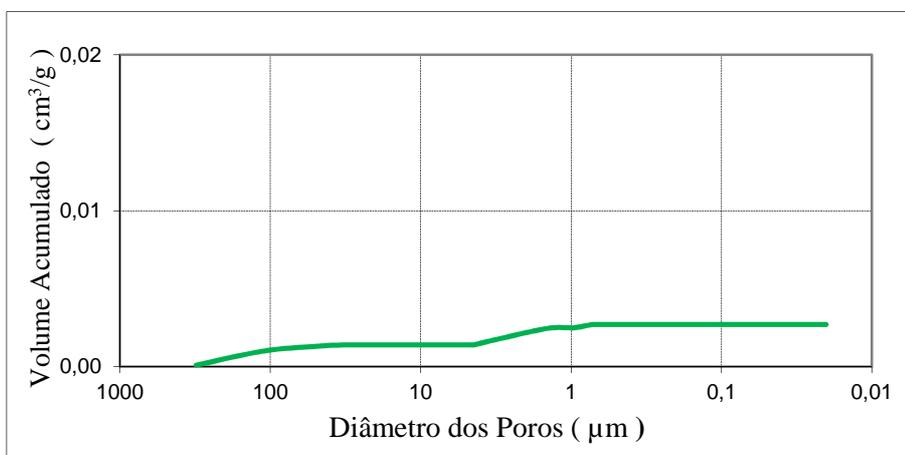
**Figura 17 - Distribuição granulométrica do AMN.**

### 3.2.3 Agregado Graúdo Natural

O agregado graúdo utilizado foi um basalto, proveniente da cidade de Nova Prata-RS, sendo utilizado apenas na produção dos corpos de prova para as análises microestruturais. Foi realizada o ensaio de massa específica deste basalto, de acordo com ABNT NBR NM 53:2009, com o resultado de **2,66  $\text{g}/\text{cm}^3$** .

Com objetivo de conhecer a porosidade do basalto foi realizado também porosimetria, em equipamento QuantaChrome PoreMaster, em uma pressão de intrusão de mercúrio de 0 a 0,34 MPa na baixa pressão e de 0,34 a 227,37 MPa na alta pressão, num

ângulo de contato de  $\approx 130^\circ$ . O resultado demonstrou uma quantidade de volume de mercúrio intrudido de  $0,0027 \text{ cm}^3/\text{g}$ , conforme Figura 18.



**Figura 18 - Porosimetria por Intrusão de Mercúrio do basalto.**

### 3.2.4 Água

A água utilizada foi proveniente da rede pública da cidade de São Leopoldo-RS.

### 3.2.5 Aditivo Superplastificante

O aditivo utilizado foi um superplastificante a base de policarboxilatos de alto desempenho, com as características obtidas junto ao fabricante, de acordo com a Tabela 16.

**Tabela 16 - Propriedades do aditivo.**

Característica	Valor
Densidade ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	1,07
pH	7,00
Teor de sólidos (%)	30,17

Fonte: Fabricante.

## 3.3 ANÁLISE DAS ARGAMASSAS

Neste subcapítulo descreve-se as etapas e os procedimentos adotados para a análise das argamassas produzidas, englobando sua produção, cura e ensaios.

### 3.3.1 Produção dos Corpos de Prova

Para a produção dos corpos de prova, utilizou-se um dos traços utilizado por Padovan (2013),  $1 : 2,815 : 3,25$ , com a relação a/c, 0,62. Como um dos enfoques deste trabalho foi a análise microestrutural, os corpos de prova produzidos foram apenas de argamassa, não utilizando o agregado graúdo. O motivo da escolha deste traço ocorreu pela

necessidade de trabalhar com uma interface com maior chance de ser detectada, sendo este o traço com a maior relação a/c, utilizado por Padovan (2013), buscando com isso complementar os trabalhos realizados pelo grupo de pesquisa sobre a utilização de ARC.

Com o traço (1:2,815) e a relação a/c (0,62) definidos, foi medido o índice de consistência por espalhamento desta argamassa, que resultou em  $360\pm 10$  mm, o qual se manteve fixo para todos os demais traços que fizeram uso das adições. A correção da consistência foi realizada com a utilização de aditivo superplastificante. Por ter se utilizado uma elevada relação água/cimento, apenas em um traço foi necessário a utilização do aditivo. A Tabela 17 apresenta os traços unitários, com as adições sendo utilizadas em adição ao cimento.

**Tabela 17 - Consumo unitário de materiais.**

Descrição	Cimento	Agregado Miúdo	Água/Cimento	FB (%)	CCA (%)	Aditivo (g)
Ref	1	2,815	0,62	-	-	-
5% FB	1	2,815	0,62	5	-	-
10% FB	1	2,815	0,62	10	-	-
15% FB	1	2,815	0,62	15	-	0,10
5% CCA	1	2,815	0,62	-	5	-
7,5% CCA	1	2,815	0,62	-	7,5	-
10% CCA	1	2,815	0,62	-	10	-

Como neste trabalho não se utilizou agregado graúdo na análise macroestrutural, o método de mistura utilizado foi o especificado na ABNT NBR 7215:1997, com as adições sendo adicionadas à mistura junto com o cimento. No traço que foi utilizado aditivo superplastificante, este foi adicionado à mistura juntamente com a água. A mistura foi realizada em argamassadeira de eixo vertical, em sala com temperatura ( $23\pm 2$  °C) e umidade ( $60\pm 10\%$ ) controladas.

Após a mistura, os corpos de prova eram moldados, em fôrmas cilíndricas de dimensão 5x10 cm, adensados em quatro camadas com trinta golpes por camada. Estes permaneciam nos moldes por 24 horas, em caixa plásticas completamente vedadas, e com recipientes de água, conforme Figura 19, para garantir a saturação do ambiente.



**Figura 19 - Cura inicial dos corpos de prova.**

### **3.3.2 Cura dos Corpos de Prova**

Após a desmoldagem os corpos de prova foram submetidos ao processo de cura, que consistiu na embalagem de cada corpo de prova com filme plástico, e posteriormente em dois sacos plásticos vedados, proporcionando que o corpo de prova sofresse a cura apenas com a água interna, e evitando eventual lixiviação durante a cura. Após o processo de embalagem os corpos de prova eram mantidos em câmara úmida por 28 dias, com temperatura e umidade de respectivamente  $23\pm 2$  °C e  $97,5\pm 2,5\%$ .

### **3.3.3 Propriedades Avaliadas**

As propriedades macroestruturais foram avaliadas aos 28 dias de cura.

Após o período de cura os corpos de prova tinham suas superfícies retificadas para então serem realizados os ensaios macroestruturais, listados à seguir.

#### **Massa Específica**

Medida antes do ensaio de ultrassom, a massa específica das argamassas foi determinada na condição saturada, medindo o volume e a massa de cada corpo de prova.

#### **Módulo de Elasticidade Dinâmico**

Determinado com aparelho “Pundit” (*Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicator Tester*), Pundit Lab da empresa Proceq e com base na ABNT NBR 8802:2013, em corpos de prova cilíndricos de dimensão 5x10 cm, utilizando três corpos de prova para cada traço. Através do aparelho Pundit, encontrou-se a velocidade de propagação da onda ultrassônica que percorreu o corpo de prova, com base no tempo que esta onda levou.

A velocidade da onda ultrassônica foi obtida conforme a Equação 1:

$$v = \frac{d}{t} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

v = Velocidade da onda ultrassônica que percorre o corpo de prova, em km/s;

d = distância entre os transdutores, neste caso altura do corpo de prova, em km;

t = tempo que a onda ultrassônica percorre a distância entre os transmissores, em s.

O módulo de elasticidade dinâmico, por sua vez é calculado conforme Equação 2.

$$Ed = \rho \cdot V^2 \frac{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}{1 - \nu} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

Ed = Módulo de elasticidade dinâmico, em MPa;

$\rho$  = Massa específica, em kg/m<sup>3</sup>;

V = Velocidade da onda ultrassônica percorre o corpo de prova, em km/s;

$\nu$  = Coeficiente de Poisson, razão entre a deformação transversal e a longitudinal, quando um corpo de prova é submetido a uma carga de compressão axial. Valor adotado para este trabalho de 0,20, conforme trabalho de Ajdukiewicz e Kliszczewicz (2002);

Por se tratar de um ensaio não destrutivo, após a realização deste ensaio os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de resistência à compressão axial e diametral.

### **Resistência à Compressão axial**

O Ensaio de resistência à compressão foi realizado com base na ABNT NBR 5739:2005 e na ABNT NBR 7215:1997. Foram ensaiados uma quantidade de três corpos de prova por traço, adotando-se a média como resultado. A prensa utilizada foi uma prensa classe I, da marca Controls, com capacidade de 2.000 kN, utilizando uma velocidade de carregamento de 0,30 MPa/s, atendendo a velocidade exigida pelas NBR's supracitadas, que exigem uma velocidade de carregamento de respectivamente 0,45±0,15 e 0,25±0,05 MPa/s. Foi ensaiado uma quantidade de três corpos de prova por traço, com a média sendo adotada como resultado.

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

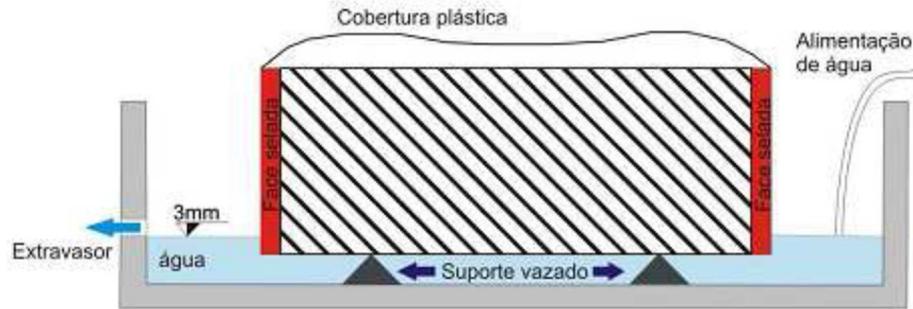
O ensaio de resistência à tração por compressão diametral teve como base a ABNT NBR 7222:1994, ensaiando-se a quantidade de três corpos de prova por traço, com a média sendo adotada como resultado. A prensa utilizada foi a mesma utilizada no ensaio de compressão axial, porém com uma velocidade de carregamento de 0,05 MPa/s.

Esta norma também exige para o ensaio que seja acoplado no corpo de prova uma tira de chapa dura de fibra de madeira, sendo as dimensões desta em função das dimensões dos corpos de prova. Como os corpos de prova ensaiados possuíam dimensões cilíndricas de 5x10 cm, esta tira possuía altura de 3,5 mm, largura de 8 mm e comprimento de 100 mm.

### **Absorção por Capilaridade**

Para o ensaio de absorção por capilaridade teve-se como referência a recomendação RILEM TC 116 PCD (1999). Para a execução deste ensaio foram utilizados 3 corpos de prova por traço, na dimensões cilíndricas de 5x5 cm. Estes corpos de prova foram obtidos a partir do corte de corpos de prova de dimensão 5x10 cm, descartando-se as extremidades, com 2,5 cm cada. Após o corte, os exemplares foram levados à estufa numa temperatura de  $100 \pm 5$  °C até estabilização de massa, e posteriormente em dessecador com sílica gel até atingirem temperatura ambiente. Após a estabilização da temperatura cada exemplar foi embalado, vedando-se o topo com balão de látex, cujo objetivo é proporcionar que o ar expulso pela absorção de água tenha espaço para ser expulso do exemplar, e toda a lateral com fita adesiva de elevada aderência.

Após a vedação dos exemplares, estes tiveram sua massa medida (estado seco ou tempo zero), e em seguida colocados em contato com uma lâmina de água, de fluxo constante, de 3 mm de espessura. Os exemplares foram colocados em bandejas plásticas vazadas lateralmente, para que o nível de água se mantivesse constante, sobre estrados plásticos, proporcionando o contato da água com a face inferior dos exemplares. A Figura 20 ilustra o procedimento do ensaio.



**Figura 20 - Esquema do procedimento adaptado do RILEM TC 116 PCD.**

Fonte: Werle (2010).

A absorção foi medida pelo acréscimo de massa através da pesagem dos exemplares, que ao serem retiradas da bandeja tiveram sua face inferior seca superficialmente com pano úmido, para a remoção do excesso de água. Estas medidas foram realizadas nos intervalos de tempo de 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 30 e 60 min, além dos intervalos de 2, 3, 4, 5, 6, 24, 48, 72 e 96 h. Com base no acréscimo de massa medido em cada tempo, calculou-se a absorção (em gramas) em relação ao exemplar no estado seco, sendo a absorção por capilaridade expressa pela razão entre a absorção e a área de cada exemplar em  $\text{g}/\text{cm}^2$ , proporcionando a possibilidade de comparação ao longo do tempo entre diferentes exemplares. A Figura 21 demonstra o ensaio sendo realizado.



**Figura 21 - Ensaio de absorção de água por capilaridade.**

### **Porosimetria Por Intrusão de Mercúrio (PIM)**

Este ensaio foi realizado em equipamento QuantaChrome PoreMaster, com pressão de intrusão de mercúrio de 0 a 0,34 MPa na baixa pressão e de 0,34 a 227,37 MPa na alta pressão, num ângulo de contato de  $\approx 130^\circ$ , em corpos de prova obtidos a partir do corte das argamassas produzidas, na idade de 28 dias.

### 3.4 ANÁLISE DA INTERFACE

Apresenta-se de forma mais detalhada os procedimentos realizados na análise da interface entre as argamassas, detalhando-se a metodologia utilizada, como também a produção dos corpos de prova, a preparação das amostras, os métodos de análise desenvolvidos e a realização do ensaio. A Figura 22 apresenta o fluxo das atividades realizadas nesta etapa.

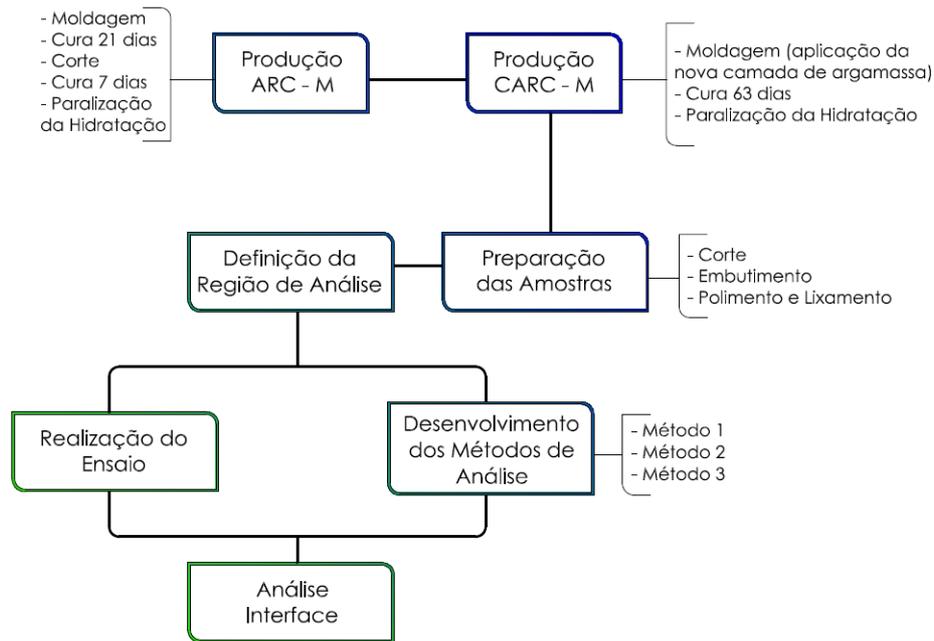


Figura 22 - Fluxograma de atividades para análise da interface.

#### 3.4.1 Produção dos Corpos de Prova

Com o objetivo de analisar a influência das adições especificadas neste trabalho na zona de transição, especialmente na interface entre duas argamassas, como ocorre em concretos com ARC, foram moldados corpos de prova, para representar tanto um ARC, quanto de concretos.

Os métodos de produção destes corpos de prova se basearam nos trabalhos apresentados na revisão teórica. É importante frisar que estes corpos de prova têm por objetivo representar a real condição de um ARC, e um concreto com ARC incorporado. A definição da moldagem destes corpos de prova ocorreu com o objetivo de padronizá-los, facilitando a preparação das amostras; a identificação e a localização da interface.

Inicialmente foram moldados corpos de prova para representar o ARC, que após terem sido curados foram misturados a uma nova camada de argamassa, resultando então numa interface que ocorre em concretos com ARC. Para denominação destes corpos de prova

se adicionou a letra “M”, pois se tratam de corpos de prova modificados. A Figura 23 demonstra o corpo de prova do ARC e do concreto moldado, com as respectivas dimensões.

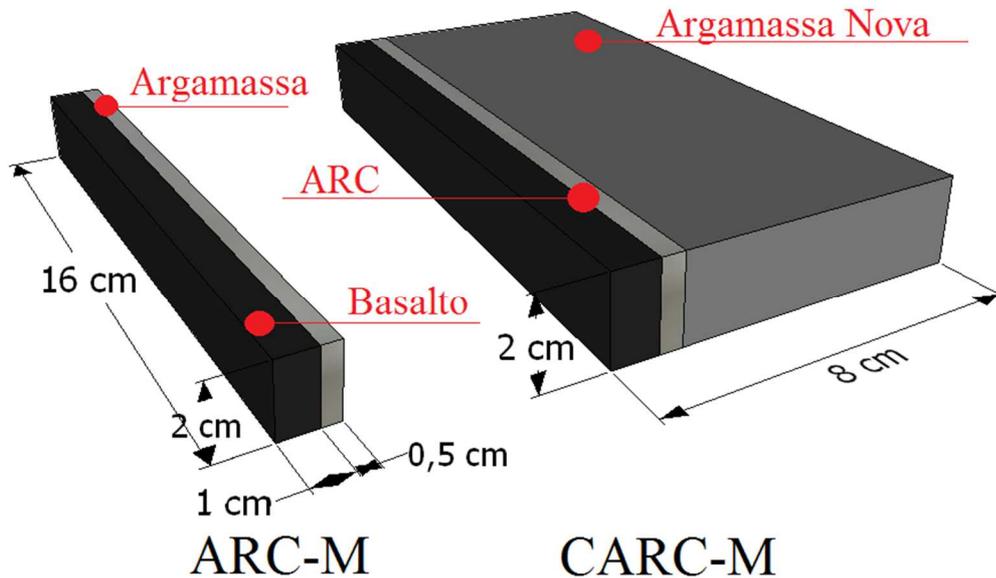


Figura 23 - Corpos de prova para análise da interface.

#### 3.4.1.1 Agregado de Reciclado de Concreto – Modificado (ARC-M)

Para a produção do ARC-M, inicialmente foi obtido um bloco basalto, para servir de agregado gráudo natural, já caracterizado no item 3.2.3. Este basalto de dimensões 50x50x5 cm foi serrado para se obter um filete de 1x2x16 cm, uma vez que a fôrma utilizada para as moldagens foram de dimensões 4x4x16 cm e a altura do ARC-M deveria ser igual a do basalto, 2 cm. Estes filetes de basaltos eram colocados nas fôrmas, protegidas por filme plástico adesivo, para evitar o contato direto com a oleosidade da fôrma. O traço utilizado na moldagem da argamassa velha, foi o traço de referência utilizado nas propriedades macroestruturais (1 : 2,815 a/c=0,62), variando-se apenas os traços para as argamassas novas. Com o basalto disposto na lateral da fôrma a argamassa era adensada com 12 golpes de soquete metálico.

Assim como utilizado nas propriedades macroestruturais utilizou-se o mesmo método de cura: nas 24 horas iniciais em caixas plásticas vedadas, com recipientes com água, e posteriormente, embalados e levados à sala de cura.

Após 21 dias de cura, os exemplares foram serrados de modo a diminuir a espessura da camada de argamassa para  $5 \pm 1$  mm. Após o corte desta camada, os ARC-M tinham sua superfície de argamassa lavada, com uma leve corrente de água e pincel de cerdas

macias, para não danificar a face da argamassa, por um período de 2 min, para limpeza da face, removendo-se possíveis sujeiras que poderiam preencher os poros. A Figura 24 demonstra o ARC-M antes e depois deste processo de corte.



**Figura 24 - ARC-M antes (Figura superior) e após o corte (Figura inferior).**

Após o corte e a limpeza da face os ARC-M eram novamente embalados, levados à sala de cura por mais 7 dias, totalizando uma cura de 28 dias. Após os 28 dias estes tinham sua hidratação paralisada permanecendo imersos em álcool isopropílico por 30 min e posteriormente levados a uma estufa de 60 °C por 24 horas (um período de tempo maior ou estufa com temperatura mais elevadas pode resultar no deslocamento entre a argamassa e o basalto). Após as 24 horas os ARC-M eram levados para outra estufa, de 40 °C e mantidos até a etapa de moldagem dos concretos modificados.

#### 3.4.1.2 Concreto com Agregado Reciclado de Concreto – Modificado (CARC-M)

Após os ARC-M estarem com a hidratação paralisada e secos, realizava-se a mistura da argamassa nova, representando então um concreto com agregado reciclado. Para a argamassa nova foram então utilizados os sete traços produzidos nas propriedades macroestruturais, conforme Tabela 17. A utilização destes traços com adições têm por objetivo também analisar se estas adições promovem uma melhora na zona de transição entre as argamassas, e não apenas na pasta de cimento.

Muitos autores para avaliarem o comportamento da zona de transição utilizam pasta, uma vez que a ZT se forma entre a pasta e o agregado. Porém neste trabalho decidiu-se ao invés da pasta, utilizar argamassa, com o objetivo de representar uma situação mais real, e evitar também a retração e uma consequente fissuração na interface com a utilização da pasta.

Os CARC-M eram produzidos da mesma maneira que os ARC-M, em fôrmas prismáticas metálicas protegidas por filme plástico adesivo, porém em formato de 8x4x16 cm, espaço equivalente a duas fôrmas 4x4x16 cm, para se ter uma camada maior de argamassa nova em relação à argamassa velha, mantendo-se a altura do corpo de prova em 2 cm. Com o ARC-M disposto na lateral da fôrma aplicava-se a argamassa na outra lateral, adensando-a com 20 golpes de soquete metálico. A Figura 25 demonstra o CARC-M, antes e após a desforma.



**Figura 25 - CARC-M antes (à esquerda) e após a desforma (à direita).**

O método de cura foi o mesmo utilizado para o ARC-M, porém a cura ocorreu até a idade de 63 dias. A escolha desta idade ocorreu em função do uso da CCA, que pela reação pozolânica, propicia ganhos de resistência mais lentos. Com isso, aos 63 dias estima-se que esta reação já tenha ocorrido em quase que sua totalidade, podendo-se avaliar a influência das adições na zona de transição nova. Após os 63 dias de cura, os corpos de prova tiveram sua hidratação paralisada, pelo mesmo método utilizado no ARC-M.

### **3.4.2 Preparação das Amostras**

A preparação das amostras foi realizada de duas maneiras, uma, mais simples, para a análise de porosimetria (PIM) e massa específica das argamassas, e outra para a análise da zona de transição entre as argamassas. Para a preparação dos corpos de prova estes foram inicialmente retirados da estufa e acondicionados em dessecadores com sílica gel até estabilização da temperatura.

#### **3.4.2.1 Corte das Amostras**

Para a realização da PIM, as amostras eram cortadas dos corpos de prova cilíndricos moldados apenas para estas análises, em serra de precisão Buehler IsoMet 1000 com lâminas diamantadas. As amostras foram obtidas do centro do corpo de prova e de

maneira que não se utilizasse as faces externas evitando o efeito parede na análise. As amostras cortadas possuíam formato prismático com as dimensões ficando em torno 5x5x20 a 30 mm, tamanho suficiente para o porta amostra do porosímetro.

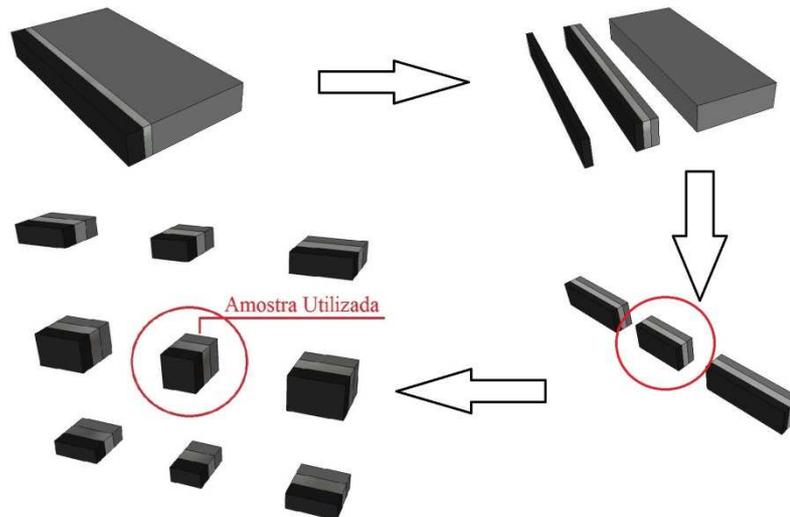
Após o corte, as amostras eram enxaguadas para remoção de possíveis partículas, com álcool isopropílico dentro de um pequeno recipiente, para evitar o contato com a água e levadas para a estufa de 100 °C, até estabilização da massa, e posteriormente armazenadas em dessecador com sílica gel.

O corte das amostras para análise da interface, também ocorreu na serra de precisão, e assim como nas argamassas utilizou-se álcool isopropílico como refrigerante. Como a amostra, em função das duas zonas de transição existentes, era extremamente sensível, o processo foi realizado com extrema acuidade, pois muitas vezes a própria fixação no braço da serra fazia com que ocorresse um desprendimento entre as camadas. O passo inicial para o corte era a redução da amostra, cortando-se parte da argamassa nova, reduzindo-se o tamanho do CARC-M até ser possível acoplá-lo no braço, e cortá-lo numa dimensão de cerca de 10x10x10 mm. O contato entre a lâmina e amostra sempre ocorria perpendicularmente às interfaces, conforme Figura 26, pois o contato primeiro com a argamassa nova, ou com o basalto resultava também no desprendimento das camadas ao se chegar numa nova camada.



**Figura 26 - Posição da amostra para o corte.**

A Figura 27 detalha os passos realizados no corte do CARC-M até a obtenção final das amostras.



**Figura 27 - Etapas utilizadas no corte para obtenção da amostra.**

Após o corte das amostras, estas também eram enxaguadas em recipiente com álcool isopropílico, para a remoção do pó do corte, e levadas para estufa na temperatura de 40 °C, pois temperaturas maiores podem gerar deslocamento.

#### 3.4.2.2 Embutimento, Lixamento e Polimento das Amostras

Para a análise por indentação, a preparação da amostra possui um papel extremamente importante, pois para que a indentação ocorra, a superfície da amostra deve estar plana, minimizando a variabilidade da rugosidade e possibilitando uma maior repetição de resultados.

Com as amostras cortadas, estas eram embaladas com sílica gel, em sacos plásticos, para evitar contato com a umidade e também evitar a carbonatação da superfície, e levadas ao Instituto Tecnológico em Ensaios e Segurança Funcional (itt Fuse), localizado no Complexo Tecnológico da UNISINOS, para então serem embutidas, lixadas e polidas.

O embutimento da amostra foi realizado utilizando resina epóxi EMBED 812, que após a moldagem era seca em estufa a 60 °C por 24 horas, para então ser desmoldado. Com a amostra embutida era realizado o lixamento da amostra em politriz Buehler MetaServ 250. Utilizaram-se lixas com carbeto de silício nas granas de 320, 400, 600, 800 e 1.200. Após a etapa de lixamento realizava-se o polimento da amostra com pasta de alumina de 1 e 0,3 µm. Nas etapas finais do lixamento e polimento as amostras eram visualizadas em microscópio ótico, com o objetivo de analisar a situação do polimento, eliminando-se, por exemplo, riscos oriundos do processo de lixamento.

A Figura 28 demonstra uma amostra após as etapas de embutimento, lixamento e polimento.



**Figura 28 - Amostra polida.**

### **3.4.3 Análise do Módulo de Elasticidade pela Técnica de Nanoindentação**

O ensaio foi realizado no Parque Científico e Tecnológico da PUCRS (TecnoPUCRS), no Centro de Física, no Grupo de Estudo de Propriedades de Superfícies e Interfaces (GEPSI). As nanoindetações foram realizadas em equipamento FischerScope H100VP XY, pelo técnico do laboratório. A Figura 29 apresenta o equipamento.



**Figura 29 - Equipamento de nanoindentação.**

Para o ensaio foram utilizadas as seguintes configurações:

- Penetrador: Berkovich;
- Carga: 50 mN;

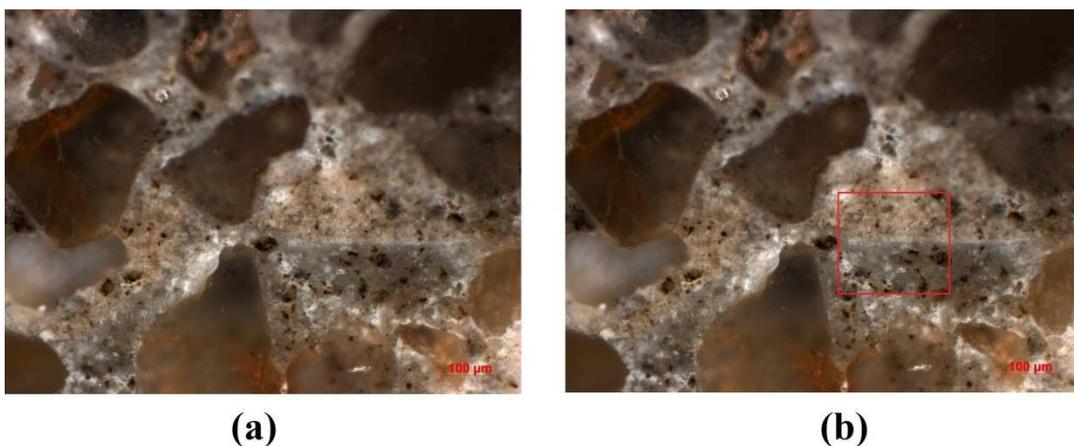
- Tempo: 40 s;
- Tempo de retenção na carga máxima: 5 s.

Dentre os parâmetros que podem ser determinados a partir da nanoindentação decidiu-se trabalhar com o módulo de elasticidade, uma vez que esta é uma propriedade típica de concretos e argamassas. A determinação desta propriedade, em especial, leva em consideração para o comportamento elástico apenas a parcela de descarregamento durante o ensaio, ao contrário da dureza, que leva em consideração o ciclo de carregamento e descarregamento e exige uma interpretação que pode ser subjetiva para materiais cimentícios.

#### 3.4.3.1 Definição do Trecho a Ser Analisado

O passo seguinte foi identificação da melhor região da zona de transição nova para serem realizadas as medidas de nanoindentação. Para a definição do trecho realizou-se microscopia ótica, em microscópio Carl Zeiss Axiovision M2m, por toda a extensão da interface, nas ampliações de 25, 50 e 100 vezes. Para definição da região, buscou-se observar dois aspectos, a presença de interface entre a argamassa velha e a nova, e a existência de maior quantidade de pasta, facilitando o ensaio.

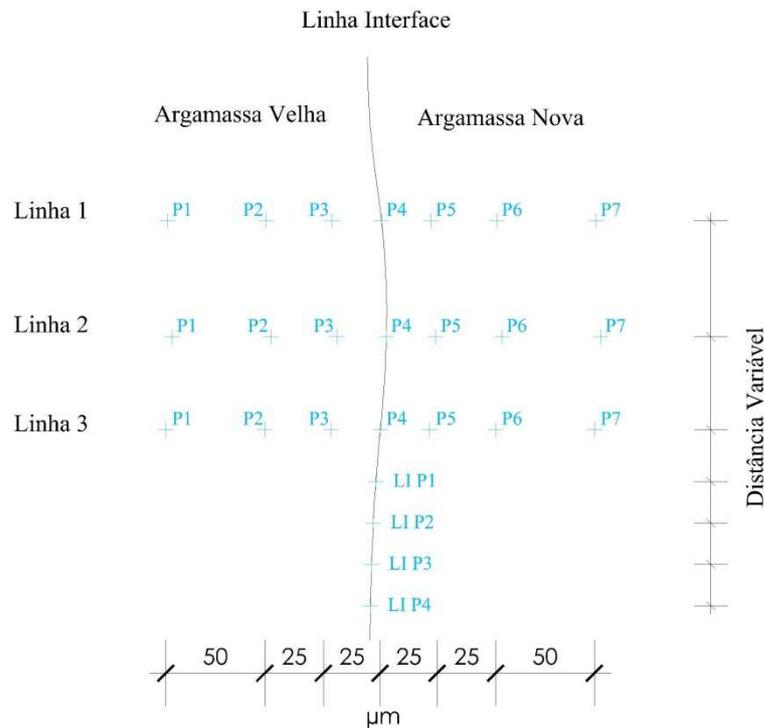
A Figura 30 exemplifica o processo de microscopia e definição da região, enquanto que nos apêndices se visualiza as microscopias selecionadas para cada traço. Após a identificação da região, as amostras eram embaladas com sílica gel, e levadas ao GEPSI para serem ensaiadas.



**Figura 30 - Microscopia ótica para definição da região analisada. antes (a) e após (b) a escolha da região.**

Para a execução do ensaio definiu-se a realização de 25 medidas por amostra, em 3 linhas com 7 medidas cada, perpendiculares à interface, e mais 4 medidas ao longo da

interface, conforme detalhado na Figura 31, priorizando-se desta maneira uma maior quantidade de medidas na interface. O espaçamento foi fixado apenas entre os pontos de cada linha, a cada 25  $\mu\text{m}$ , com exceção da extremidade, realizado com 50  $\mu\text{m}$ . A distância entre as linhas era variável, porém mantendo-as próximas, buscando uma maior possibilidade de evitar a realização de indentações sobre partículas de agregados.



**Figura 31 - Localização das medidas realizadas.**

Como a interface não é reta, sempre se posicionou as medidas centrais (ponto 4) na interface, e a partir destas que se realizavam os deslocamentos para as medidas laterais. A vantagem destas medidas lineares é que as linhas de medida (1, 2 e 3) não necessitavam estar em distâncias exatamente conhecidas, pois para a análise da variação do módulo de elasticidade linear era realizada a média dos pontos de cada coluna. Desta maneira se obteve uma extensão de leitura máxima de 200  $\mu\text{m}$ .

Todas as medidas com módulo de elasticidade acima de 45 GPa, foram excluídas da análise dos resultados, pois foram consideradas como grãos de areia. Para este limite de corte, foram realizadas medidas nos próprios grãos de areia, especificadas na Tabela 18, e utilizados como base resultados de diferentes trabalhos expostos na revisão teórica, conforme Tabela 8.

**Tabela 18 - Módulo de elasticidade dos grãos de areia medidos pela nanoindentação.**

Medida	Resultado
Média (GPa)	72,06
Desvio-Padrão (GPa)	18,63
Valor máximo (GPa)	96,65
Valor Mínimo (GPa)	47,63

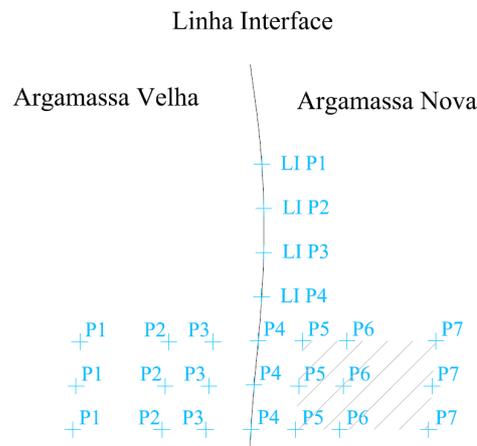
Para a análise da interface através do módulo de elasticidade, pela técnica de nanoindentação, realizaram-se diferentes tipos de análises, em função da menor quantidade de pontos realizados e da grande heterogeneidade encontrada. As metodologias de análise utilizadas estão descritas a seguir.

#### 3.4.4 Métodos de Análise da interface

Por se tratar de uma técnica ainda pouco difundida para análise de propriedades microestruturais em materiais cimentícios, ainda não há metodologia consagrada para a utilização da nanoindentação. Com o objetivo de identificar alterações na interface entre duas argamassas, o presente trabalho utilizou as metodologias propostas a seguir:

##### **Método 1: Comparação entre os módulos de elasticidade nas argamassas novas com os diferentes tipos de adição**

Esta análise teve por objetivo verificar se pela técnica utilizada é possível identificar alterações nos sete tipos de argamassas utilizadas (referência e mais três traços para cada tipo de adição), somente na região da argamassa nova, conforme Figura 32.



**Figura 32 - Região de análise Método 1.**

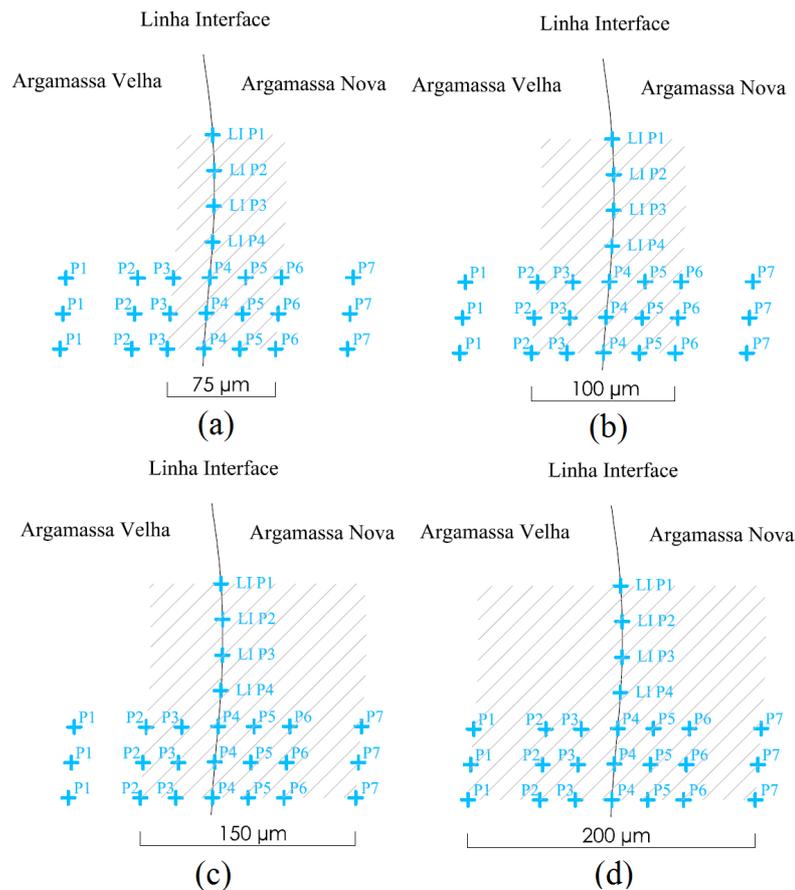
O método consiste na determinação da média aritmética dos valores de nanoindentação considerando-se:

- a) Todos os valores;
- b) Somente os valores abaixo de 45 GPa, uma vez que os superiores são considerados agregados e partículas de cimento não hidratado, conforme Tabela 18.

### **Método 2: Média aritmética geral das interfaces nas argamassas**

Neste método, a partir da média aritmética dos pontos medidos, é realizada comparação entre os diferentes teores e tipos de adições utilizadas, buscando identificar qual interface apresenta maior rigidez. Foram levados em consideração os seguintes parâmetros:

- a) Exclusão dos pontos com valores  $\geq 45$  GPa, que são valores de módulo de elasticidade referentes à agregados naturais e partículas de cimento não hidratado;
- b) Adoção de 4 extensões de leitura da interface, detalhadas a seguir e na Figura 33:
  - 75  $\mu\text{m}$  (Figura 33a): 25  $\mu\text{m}$  além da linha interface para a argamassa velha e 50  $\mu\text{m}$  para a argamassa nova;
  - 100  $\mu\text{m}$  (Figura 33b): 25  $\mu\text{m}$  além da linha interface para a argamassa velha e 75  $\mu\text{m}$  para a argamassa nova;
  - 150  $\mu\text{m}$  (Figura 33c): 50  $\mu\text{m}$  além da linha interface para a argamassa velha e 100  $\mu\text{m}$  para a argamassa nova;
  - 200  $\mu\text{m}$  (Figura 33d): 100  $\mu\text{m}$  além da linha interface para a argamassa velha e 100  $\mu\text{m}$  para a argamassa nova.



**Figura 33 - Extensões de leitura.**

Com base na revisão teórica estima-se que a espessura da ZT nas amostras deve variar entre 50 e 100 µm, e que o módulo de elasticidade nesta região seja menor que o restante da pasta. Portanto, este procedimento tem o objetivo de identificar uma eventual ZT na região de interface, que se torna mais clara se houver diferenças entre os valores médios de indentação de cada extensão de leitura.

### **Método 3: Análise por faixas de variação do módulo de elasticidade nas argamassas**

De acordo com a revisão teórica, especialmente pela Tabela 8 (item 2.4.1), em materiais cimentícios há grande variabilidade dos resultados de nanoindentação, em função da grande heterogeneidade típica destes materiais e dos produtos de hidratação resultantes. A análise pela média aritmética de todos os valores (utilizados no método 1 e 2) pode negligenciar a real situação da interface medida, pois valores maiores podem representar portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), e menores, poros e vazios, e a média de duas medidas desta natureza, (entre um valor muito baixo e um valor elevado), pode resultar numa interpretação

equivocada do módulo de elasticidade da região, aparentando a existência de um valor intermediário, típico de C-S-H.

Nesta terceira metodologia propõem-se a interpretação da interface, nas mesmas extensões de leitura da metodologia anterior (75, 100, 150 e 200  $\mu\text{m}$ ), porém individualizando as seguintes faixas de módulo de elasticidade:

- Acima de 45 GPa, considerado como agregados e cimento não hidratado;
- Entre 35 e 45 GPa, considerado como  $\text{Ca(OH)}_2$ ;
- Entre 15 e 35 GPa, considerado como C-S-H;
- Menor que 15 GPa, considerado como poros e vazios.

A definição destas faixas de valores teve como parâmetro os resultados de módulo de elasticidade dos produtos de hidratação apresentados na revisão teórica, conforme Tabela 8. Faz-se necessário a observação de que as faixas de módulo de elasticidade foram estabelecidas com base na revisão bibliográfica realizada, e são aproximações da realidade.

Para a análise foram levados somente em consideração as faixas de valores entre 15 e 35 GPa, e a faixa com os valores inferiores abaixo de 15 GPa, pois os valores obtidos entre 35 e 45 GPa foram poucos, e os acima de 45 GPa não compreendem valores de pasta.

## 4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

No presente capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir dos ensaios descritos no capítulo anterior dos ensaios voltados às argamassas, e posteriormente os resultados dos ensaios referentes à interface pela nanoindentação.

### 4.1 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS

#### 4.1.1 Massa Específica

Os resultados de massa específica foram determinados no estado saturado, antes da realização dos ensaios de velocidade de ultrassom, resistência à compressão e resistência à tração.

Os resultados obtidos para as médias de três exemplares estão expostos na Figura 34 para os resultados das argamassas com FB e na Figura 35, para os resultados com CCA.

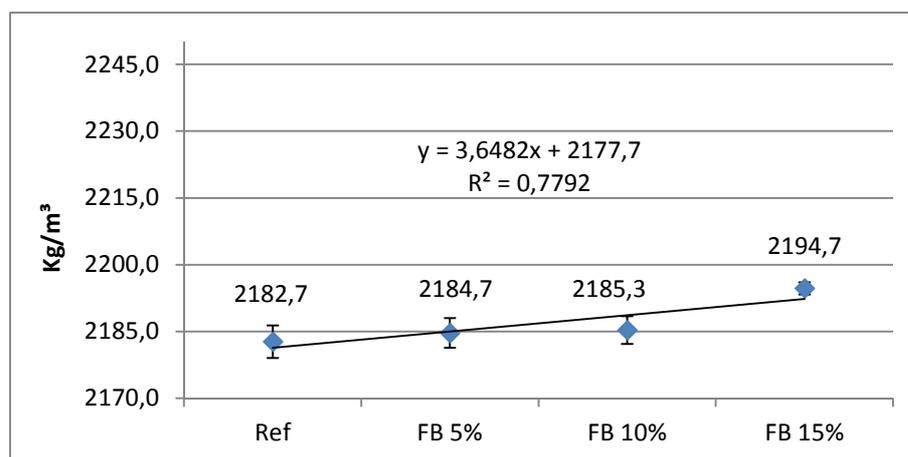


Figura 34 - Massa específica com FB.

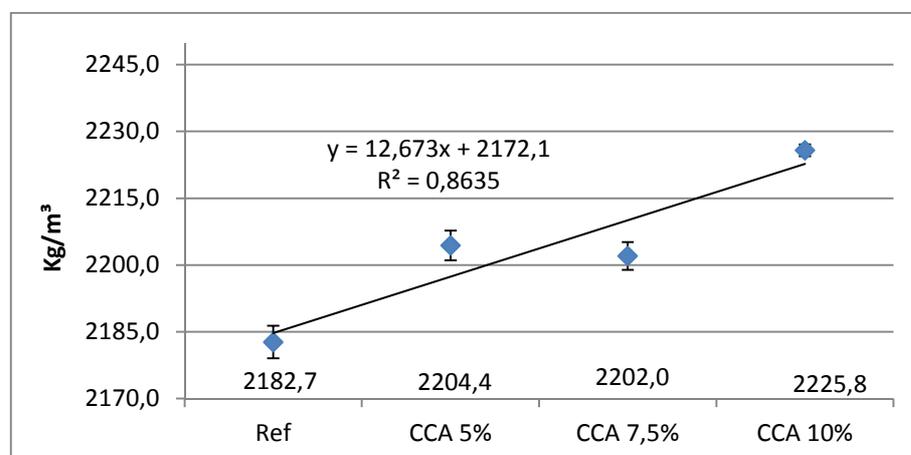


Figura 35 - Massa específica argamassas com CCA.

Os finos de basalto e a CCA promoveram um ganho mínimo de massa específica. Os finos proporcionaram um aumento máximo de 0,5%, para o teor de 15% de utilização. Já o teor de CCA com maior elevação foi observado no teor de 10%, com uma elevação na massa específica de 2%.

Pela Análise de Variância (ANOVA), realizada individualmente para cada tipo de adição, o uso do FB não resultou em ganhos significativos, conforme Tabela 19.

**Tabela 19 - ANOVA massa específica FB.**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Significância
Entre grupos	256,2226	3	85,40752	0,342164	0,795788	4,066181	Não
Dentro dos grupos	1996,878	8	249,6098				
Total	2253,101	11					

Onde: SQ = soma quadrada; GL = graus de liberdade; MQ = média quadrada.

Já a ANOVA realizada com os resultados obtidos com a CCA comprovaram estatisticamente a influência da CCA na massa específica com os três exemplares medidos. O resultado da ANOVA encontra-se na Tabela 20.

**Tabela 20 - ANOVA massa específica CCA.**

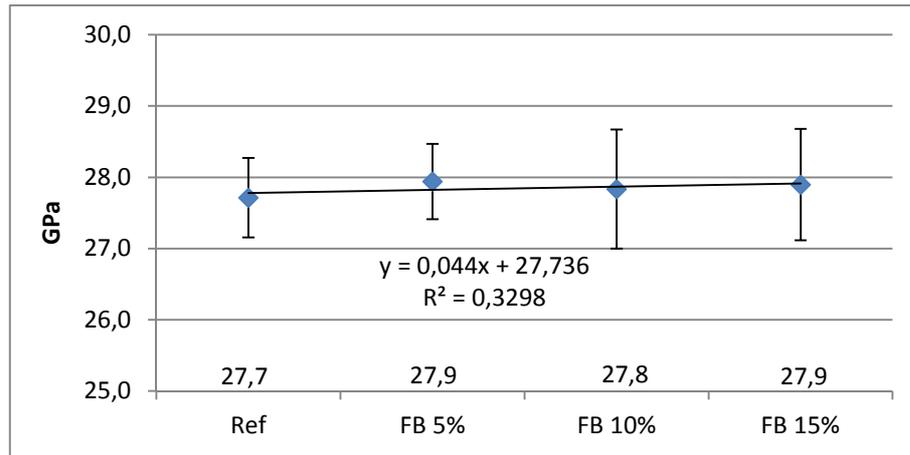
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Significância
Entre grupos	2789,976	3	929,9922	5,304702	0,026358	4,066181	Sim
Dentro dos grupos	1402,517	8	175,3147				
Total	4192,494	11					

Onde: SQ = soma quadrada; GL = graus de liberdade; MQ = média quadrada.

Os resultados obtidos para a massa específica demonstram uma tendência de que quanto maior o uso de CCA, maior a massa específica, assim como para independentemente do teor de CCA, seu uso foi superior a qualquer teor de finos de basalto, que por sua vez não resultaram em diferença significativa de massa específica.

#### 4.1.2 Módulo de Elasticidade Dinâmico

A Figura 36 apresenta os resultados obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias, para as argamassas com fino basáltico, calculado através da medição da massa específica e velocidade de propagação de onda ultrassônica no estado saturado.



**Figura 36 - Módulo de elasticidade dinâmico FB.**

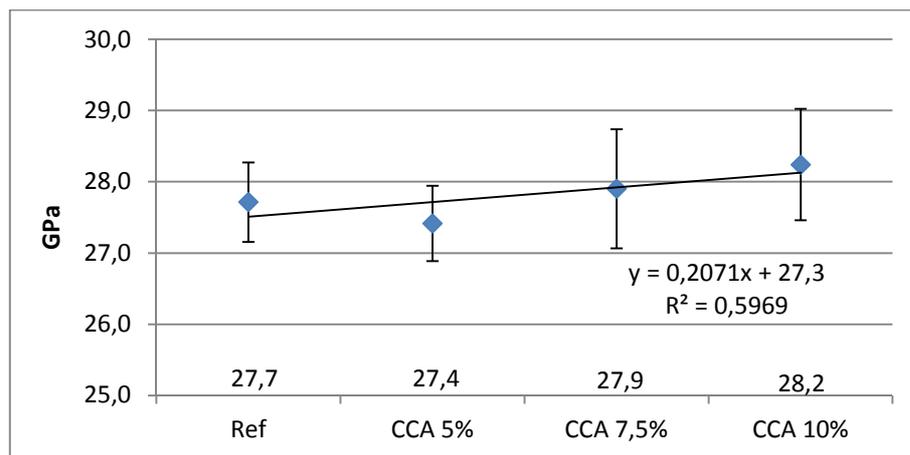
Os resultados para o módulo de elasticidade dinâmico também não apresentaram variação significativa com o uso de FB, conforme análise por ANOVA, exposta Tabela 21.

**Tabela 21 - ANOVA Módulo de Elasticidade Dinâmico FB.**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Significância
Entre grupos	0,088065	3	0,029355	0,061822	0,978516	4,066181	Não
Dentro dos grupos	3,798664	8	0,474833				
Total	3,88673	11					

Onde: SQ = soma quadrada; GL = graus de liberdade; MQ = média quadrada.

As argamassas com CCA estão com seus resultados de módulo de elasticidade apresentados na Figura 37.



**Figura 37 - Módulo de elasticidade dinâmico CCA.**

Os teores de 7,5 e 10% resultaram num pequeno acréscimo de valor médio de módulo de elasticidade de respectivamente 1 e 2%. Em função também do elevado desvio-

padrão, a análise estatística, também realiza por ANOVA, conforme Tabela 22, demonstrou que a utilização de CCA não resulta em variação significativa.

**Tabela 22 - ANOVA módulo de elasticidade dinâmico CCA.**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Significância
Entre grupos	1,077886	3	0,359295	0,256696	0,85458	4,066181	Não
Dentro dos grupos	11,19755	8	1,399693				
Total	12,27543	11					

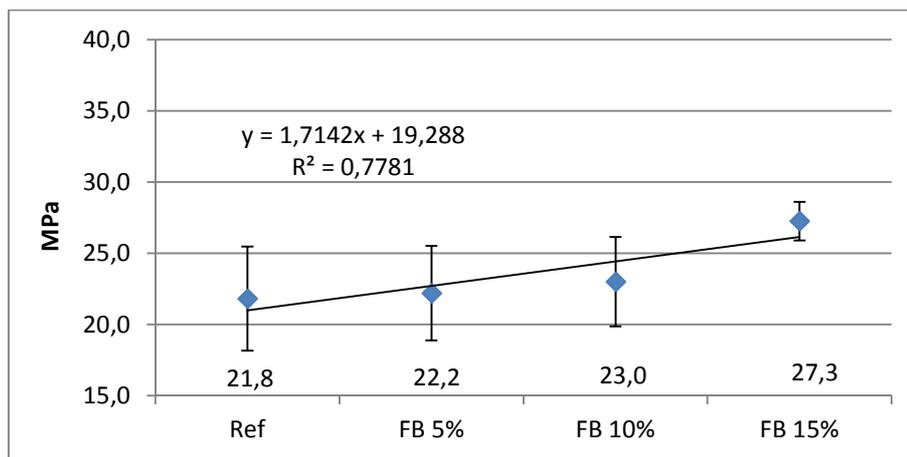
Onde: SQ = soma quadrada; GL = graus de liberdade; MQ = média quadrada.

Os resultados de módulo de elasticidade mostram valores muito próximos entre si, e com pouca diferença em relação à argamassa de referência, não correspondendo ao comportamento esperado a partir dos resultados de resistência à compressão, que serão discutidos no item 4.1.3, onde o efeito da reação pozolânica na diminuição da porosidade da argamassa se torna visível.

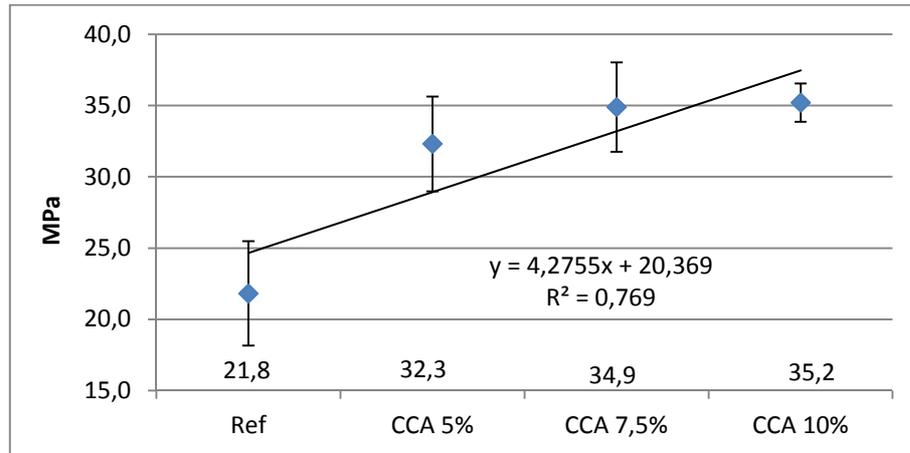
Uma possível explicação para a diferença não significativa entre os valores de módulo de elasticidade pode ser a sensibilidade do equipamento de ultrassom, uma vez que os valores lidos têm diferença menor que 1 GPa.

#### 4.1.3 Resistência à Compressão

Os resultados estão apresentados na Figura 38 para os traços com FB e na Figura 39, para os com CCA.



**Figura 38 - Resistência à compressão FB.**



**Figura 39 - Resistência à compressão CCA.**

A utilização de finos basálticos resultou num aumento máximo na resistência à compressão de 25%, em relação ao traço referência, para o teor de adição de 15%, enquanto que os teores de 5 e 10% resultaram num aumento de respectivamente 2 e 6%. A análise estatística, realizada com os três exemplares, demonstrou que não há significância estatística no aumento da resistência com o uso dos finos, conforme Tabela 23.

**Tabela 23 - ANOVA resistência à compressão FB.**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Significância
Entre grupos	56,6475	3	18,8825	2,090037	0,179938	4,066181	Não
Dentro dos grupos	72,27622	8	9,034528				
Total	128,9237	11					

Onde: SQ = soma quadrada; GL = graus de liberdade; MQ = média quadrada.

Já a utilização da CCA provocou um expressivo aumento na resistência, com o maior resultado (10% CCA) proporcionando um ganho de 61%, praticamente o mesmo ganho observado no teor de 7,5%, com 60%. Mesmo o menor teor de utilização (5%), resultou em ganho superior ao maior teor de finos, com uma elevação na resistência de 48% em relação à referência.

A ANOVA, realizada com os três exemplares comprova este aumento significativo na resistência à compressão conforme Tabela 24.

Tabela 24 - ANOVA resistência à compressão CCA.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Significância
Entre grupos	356,5751	3	118,8584	10,56764	0,003715	4,066181	Sim
Dentro dos grupos	89,97914	8	11,24739				
Total	446,5543	11					

Onde: SQ = soma quadrada; GL = graus de liberdade; MQ = média quadrada.

A análise dos resultados obtidos demonstra, como esperado, a maior influência da CCA em comparação com os finos, com os valores para todos os teores utilizados estando situados acima dos traços com FB e da referência.

#### 4.1.4 Resistência à Tração Por Compressão Diametral

Os resultados obtidos de resistência à tração por compressão diametral estão demonstrados na Figura 40, para os traços com FB e Figura 41 para os resultados com CCA.

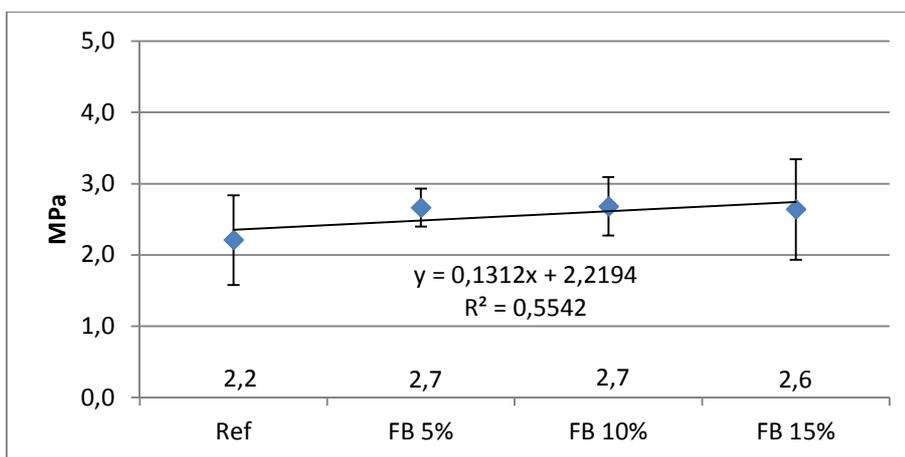


Figura 40 - Resistência à tração FB.

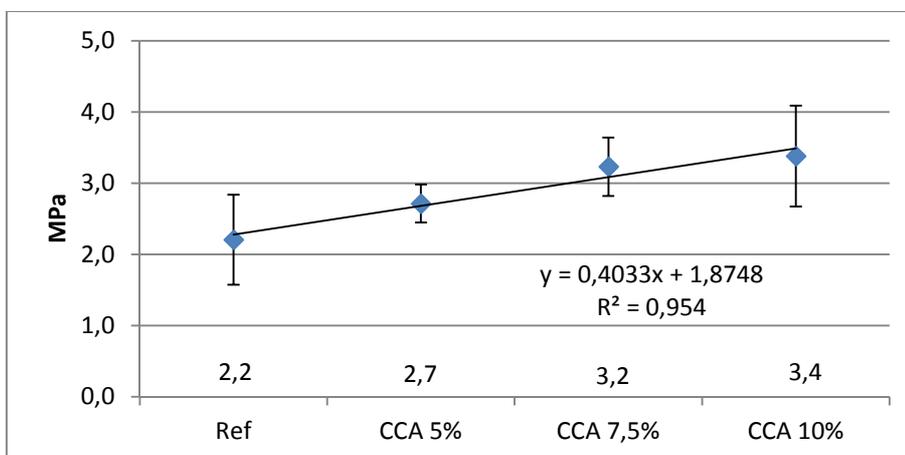


Figura 41 - Resistência à tração CCA.

A utilização de finos de basalto resultou num pequeno aumento da resistência à tração. Porém a análise estatística realizada por ANOVA, conforme Tabela 25 demonstra que não há influência significativa na utilização de finos.

**Tabela 25 - ANOVA resistência à tração FB.**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Significância
Entre grupos	0,465789	3	0,155263	0,545805	0,664661	4,066181	Não
Dentro dos grupos	2,275729	8	0,284466				
Total	2,741518	11					

Onde: SQ = soma quadrada; GL = graus de liberdade; MQ = média quadrada.

Quanto ao uso da CCA, os teores de 5, 7,5 e 10% resultaram em ganhos de resistência de respectivamente 18, 45 e 55%. Entretanto ao se analisar estatisticamente por ANOVA, a Tabela 26 demonstra que não há significância no aumento da resistência à tração com o uso da CCA. Tal resultado, embora não esperado, é fortemente influenciado pelo elevado desvio-padrão dos resultados.

**Tabela 26 - ANOVA resistência à tração CCA.**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Significância
Entre grupos	2,557499	3	0,8525	1,54334	0,276799	4,066181	Não
Dentro dos grupos	4,418985	8	0,552373				
Total	6,976483	11					

Onde: SQ = soma quadrada; GL = graus de liberdade; MQ = média quadrada.

#### 4.1.5 Absorção por Capilaridade

Os resultados da absorção por capilaridade, analisada pelo método adaptado da RILEM TC 116 PCD, conforme Troian (2010), Werle (2010) e Padovan (2013), estão expostos nas Figura 42 e Figura 43 e nos apêndices de forma mais detalhada.

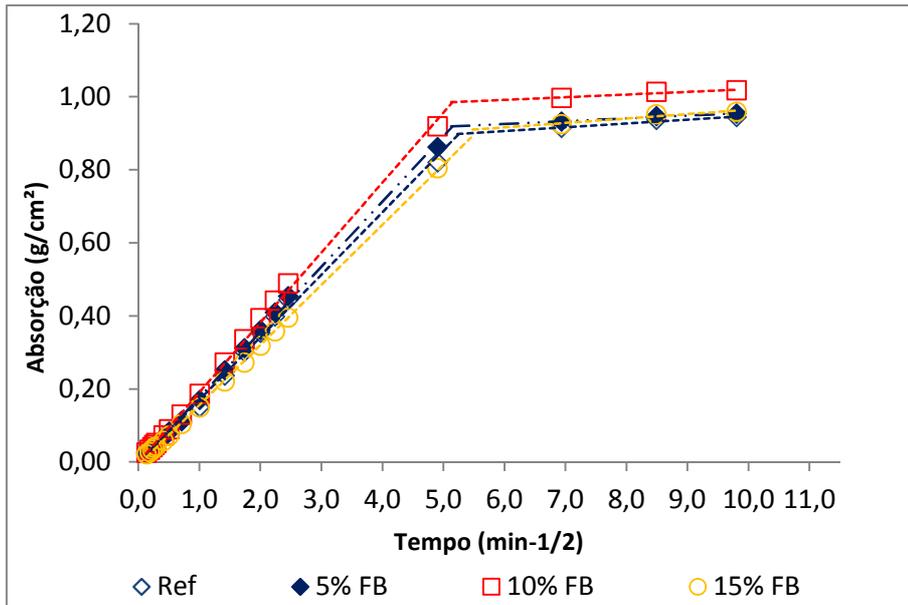


Figura 42 - Absorção das argamassas com FB.

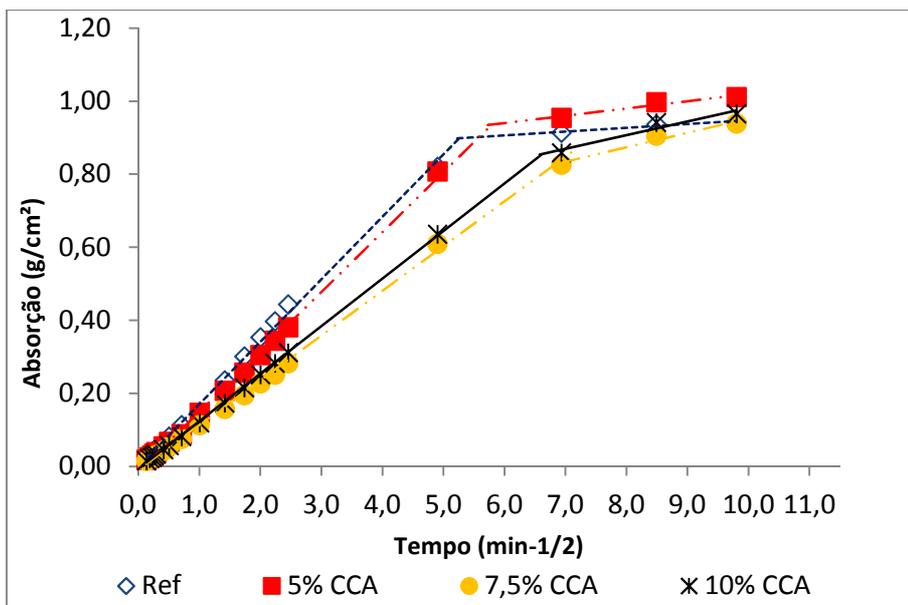
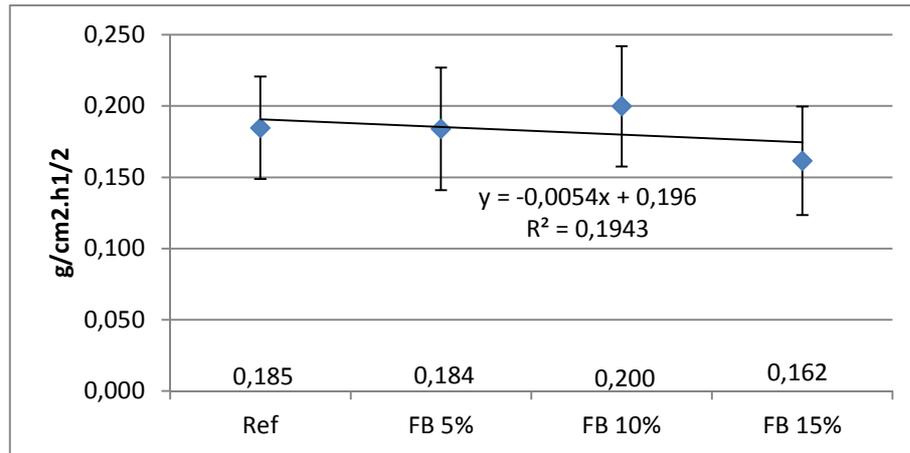


Figura 43 - Absorção das argamassas com CCA.

Com base nas medidas realizadas foi possível obter a taxa de absorção capilar ( $S$ ), pela inclinação da reta linear na fase de absorção capilar. Os resultados obtidos pela média dos exemplares medidos para o traço com FB estão expostos na Figura 44.



**Figura 44 - Taxa de absorção capilar das argamassas com FB.**

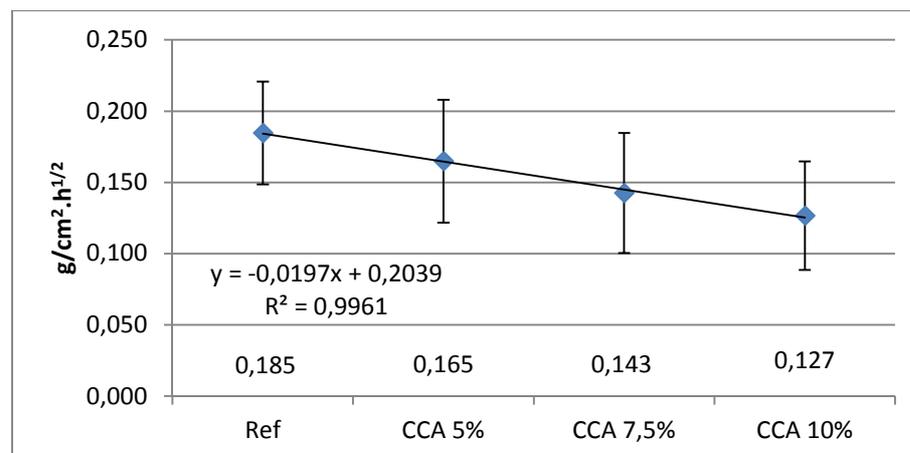
O uso do FB só resultou em melhora com o teor de 15%, com uma queda em relação à referência de 12%. A análise geral dos resultados de ANOVA consta na Tabela 27 e não demonstrou significância estatística para os diferentes teores de FB.

**Tabela 27 - ANOVA taxa de absorção para as argamassas com FB.**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Significância
Entre grupos	0,002233	3	0,000744	0,416155	0,746245	4,066181	Não
Dentro dos grupos	0,014309	8	0,001789				
Total	0,016542	11					

Onde: SQ = soma quadrada; GL = graus de liberdade; MQ = média quadrada.

A Figura 45 apresenta os resultados da taxa de absorção para os traços que utilizaram CCA.



**Figura 45 - Taxa de absorção capilar das argamassas com CCA.**

A utilização da CCA resultou em menores taxas de absorção, com o melhor resultado para o teor de 10% de utilização, com queda em relação à referência de 31%, enquanto que os teores de 5% e 7,5% resultaram em quedas de respectivamente 11 e 23%.

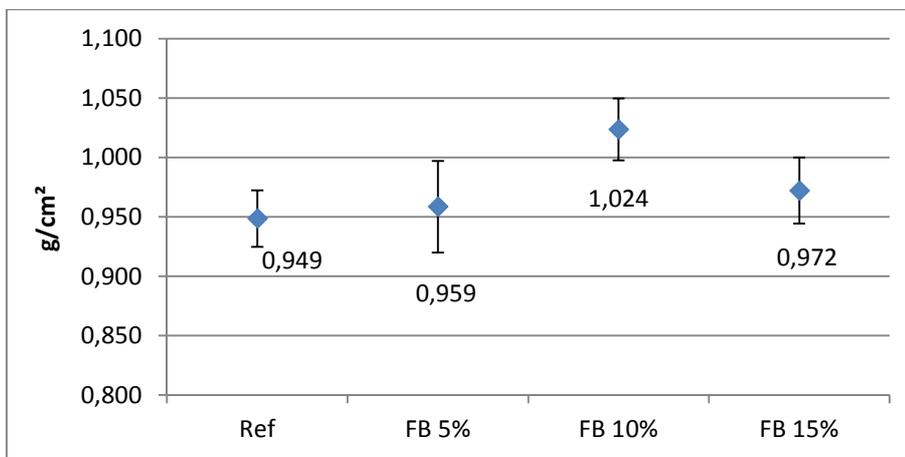
Entretanto como ocorrido com o uso dos finos, a análise estatística realizada por ANOVA e demonstrada na Tabela 28, não resultou em influência significativa para o uso da CCA.

**Tabela 28 - ANOVA taxa de absorção para as argamassas com CCA.**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Significância
Entre grupos	0,005667	3	0,001889	2,267586	0,167852	4,346831	Não
Dentro dos grupos	0,005831	7	0,000833				
Total	0,011498	10					

Onde: SQ = soma quadrada; GL = graus de liberdade; MQ = média quadrada.

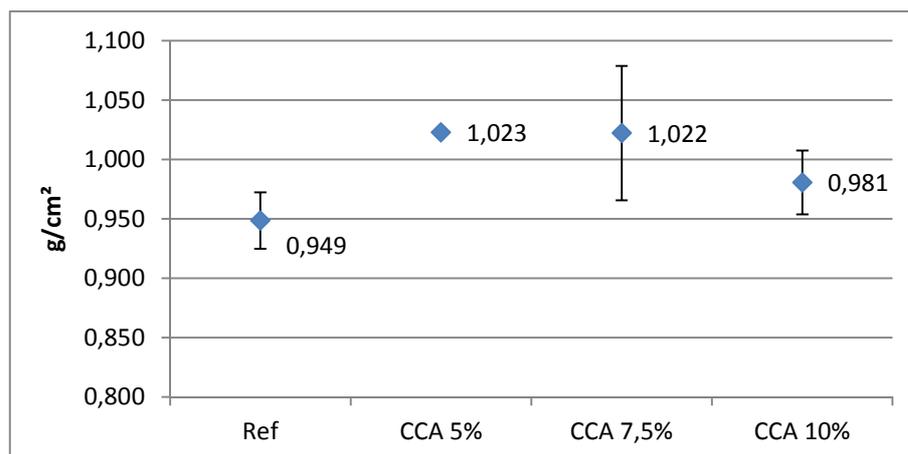
Com o objetivo de também demonstrar a absorção total das argamassas ao término do ensaio, no período de tempo de 120 h, a Figura 46 e apresenta os resultados de absorção, para as argamassas com finos.



**Figura 46 - Absorção total das argamassas com FB.**

A absorção no período de 120 h resultou para todos os traços com finos em valores maiores que o observado na referência. A maior elevação foi obtida para o traço com 10%, com uma absorção 8% maior que a referência.

Os valores de absorção total das argamassas com CCA estão apresentados na Figura 47.



**Figura 47 - Absorção total das argamassas com CCA.**

Apesar das argamassas com CCA apresentarem acréscimo na resistência à compressão e diminuição na taxa de absorção capilar, o uso da CCA resultou em argamassas de maior absorção em comparação com a referência. Estes resultados são coerentes com outros trabalhos realizados com esta CCA, como os realizados por Fedumentì, (2013), Cecconello (2013) e Sartori (2013).

As propriedades analisadas a partir do ensaio de absorção por capilaridade estão resumidas na Tabela 29, onde os resultados podem ser consultados nos apêndices, como o ponto de saturação (tempo no qual ocorre a mudança do regime de absorção para o regime de saturação), a massa de água absorvida neste ponto, a porosidade total; e a porosidade efetiva (porosidade no instante que ocorre a mudança no regime de absorção para saturação).

**Tabela 29 – Resumo dos resultados de absorção de água por capilaridade.**

Propriedade	Ref	5% FB	10% FB	15% FB	5% CCA	7,5% CCA	10% CCA
Taxa de absorção (g/cm <sup>2</sup> .h <sup>1/2</sup> )	0,185	0,184	0,200	0,162	0,165	0,143	0,127
Absorção Total (120 h) (g/cm <sup>2</sup> )	0,949	0,959	1,024	0,972	1,023	1,022	0,981
Ponto de saturação (min)	21,67	24,33	23,16	30,07	36,32	46,58	53,37
Massa absorvida no ponto de saturação (g)	16,34	17,37	18,65	17,14	18,97	18,93	18,17
Porosidade total (%)	18,62	18,83	19,93	18,72	19,56	19,39	19,05
Porosidade efetiva (%)	16,67	17,43	18,18	16,67	18,70	18,49	17,97

O teor de finos que resultou nos melhores resultados foi o teor de 15%. Algumas propriedades, especialmente as referentes às medições ao término do ensaio (absorção total e porosidade total), demonstraram melhor resultado para o traço referência, mesmo

comportamento observado nos traços com CCA. O uso de CCA resultou em melhor teor para a quantidade de 10%, com exceção das medidas de absorção total e porosidade total, que também foram superadas pelo traço referência. Os melhores traços quanto à absorção de água vão de encontro com os resultados obtidos para a massa específica, resistência à compressão e tração.

#### 4.1.6 Porosimetria por Intrusão de Mercúrio (PIM)

Os resultados de porosimetria realizado aos 28 dias, em um exemplar para cada traço para as argamassas com FB, estão apresentados na Figura 48 para o volume total de intrusão de mercúrio, podendo também ser considerado como a porosidade da amostra, e na Figura 49 para a distribuição do volume de intrusão.

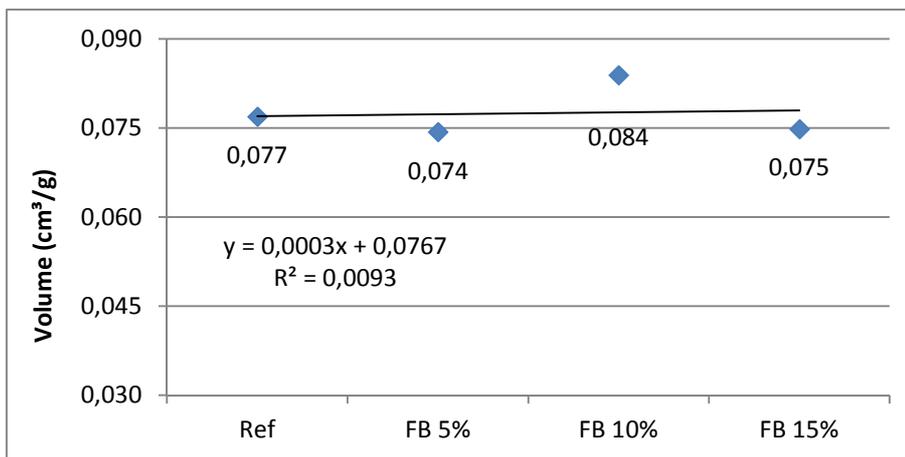


Figura 48 – Volume total de intrusão de mercúrio nas argamassas com FB.

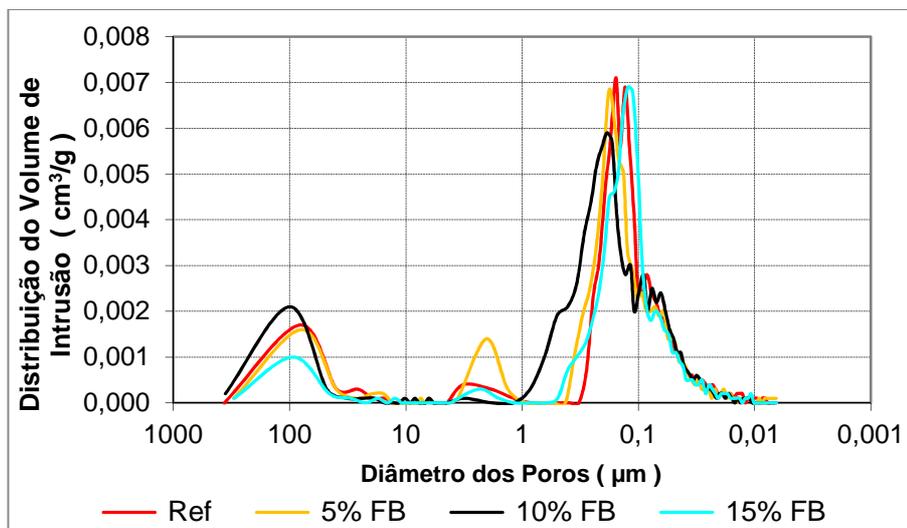


Figura 49 - Distribuição do volume de mercúrio intrudido nas argamassas com FB.

A incorporação de fino de basalto nas argamassas resultou em leve diminuição da porosidade, com exceção do teor de 10%, com um aumento em relação à referência de 9%, enquanto que os teores de 5 e 15%, resultaram na diminuição da quantidade de poros de apenas 4 e 3% respectivamente.

Observa-se que a adição de 15% de FB resulta em menor quantidade de poros na faixa de 10 a 300  $\mu\text{m}$  e no deslocamento da curva na faixa de 0,01 a 1  $\mu\text{m}$  para a direita, ou seja, em uma diminuição nos poros desta dimensão.

Na Figura 50 e Figura 51 estão expostos os resultados da PIM para as argamassas com CCA.

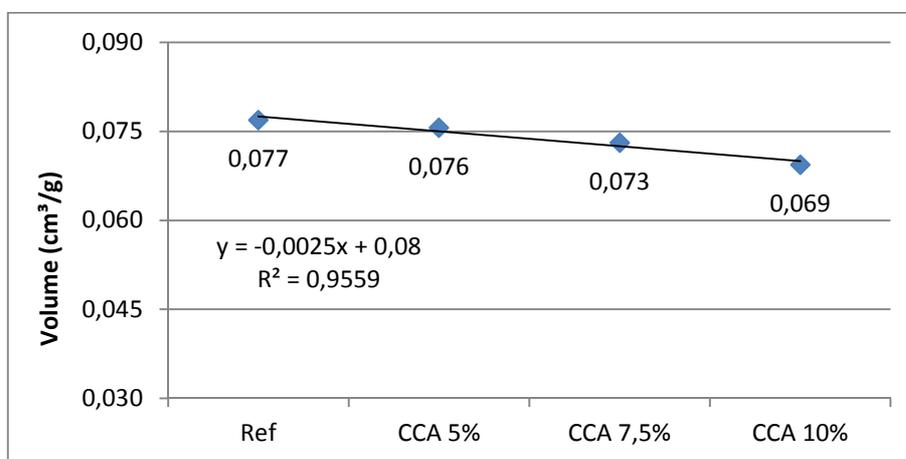


Figura 50 - Volume total de intrusão de mercúrio nas argamassas com CCA.

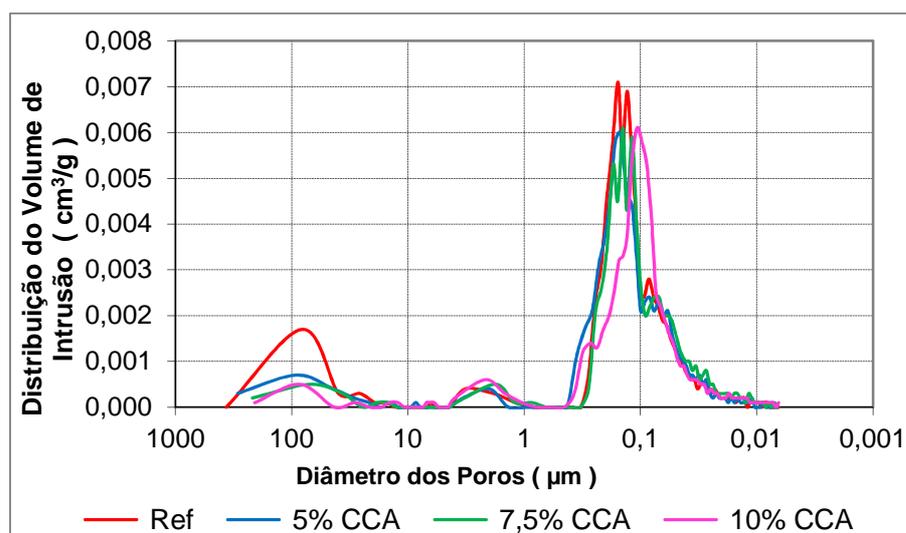


Figura 51 - Distribuição do volume de mercúrio intrudido nas argamassas com CCA.

Observa-se que em todos os traços houve diminuição no volume de poros total em relação à referência, destacando-se o teor de 10% de CCA. Estes valores justificam o

comportamento da resistência à compressão, massa específica e absorção de água da argamassa com CCA.

#### **4.1.7 Consideração sobre as propriedades das argamassas**

As propriedades analisadas demonstraram que a utilização de finos não resultou em grandes benefícios às propriedades analisadas, com exceção do teor de 15%, que resultou nos melhores resultados com o uso de FB. Este comportamento pode ser explicado pelo maior teor de microfino, com maior refinamento de poros, além de ter sido o único traço que necessitou da utilização de aditivo superplastificante para alcançar a consistência por espalhamento.

A CCA resultou em elevadas melhoras para todas as propriedades, com muitas vezes o menor teor (5%) sendo superior ao teor máximo de finos de basalto. Os teores utilizados para a CCA também exibiram uma tendência linear na elevação das propriedades, com o teor máximo utilizado (10%) sempre resultando no melhor desempenho.

A melhora nas propriedades com o uso da CCA em comparação com os finos de basalto era previamente esperada, principalmente pela reação pozolânica que esta provocou, reagindo com o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  e formando novos produtos de hidratação (C-S-H secundário), mas também pelo fato de o FB não possuir uma grande quantidade de partículas de tamanho inferior às partículas de cimento.

Todo este comportamento observado nos resultados macroestruturais é comprovado e explicado pelos resultados da porosimetria, que demonstrou que as adições utilizadas resultaram numa melhora da microestrutura das argamassas, através da diminuição da quantidade e do tamanho de poros. Mesmo esta técnica sendo extremamente útil na validação dos resultados, ainda continuam lacunas a serem exploradas, especialmente em interfaces entre duas argamassas, que se formam em concretos com ARC. A utilização do módulo de elasticidade pela técnica de nanoindentação buscou preencher esta lacuna, pela diferenciação do módulo de elasticidade numa região de interface pequena, podendo ser considerado como a ZT, e uma região de interface maior, englobando uma maior quantidade de pasta. Desta forma a técnica utilizada poderá identificar diferenças nas extensões de interface, revelando se ocorre melhora na interface e se esta decorre por um fortalecimento da pasta, da zona de transição, ou de ambas.

## 4.2 MÓDULO DE ELASTICIDADE NA INTERFACE

Neste subcapítulo, são apresentados os resultados de módulo de elasticidade medidos na interface entre as argamassas de concreto para cada metodologia de análise proposta, enquanto que os resultados de cada medida estão expostos nos apêndices.

### 4.2.1 Resultados do Método 1: Comparação entre os módulos de elasticidade nas argamassas novas com os diferentes tipos de adição

As medidas realizadas apenas nas argamassas novas tiveram por objetivo a análise da elasticidade da pasta pela média aritmética de todos os valores de indentação medidos, e pela análise dos valores abaixo de 45 GPa.

Os resultados obtidos para os traços com finos estão expostos na Figura 52.

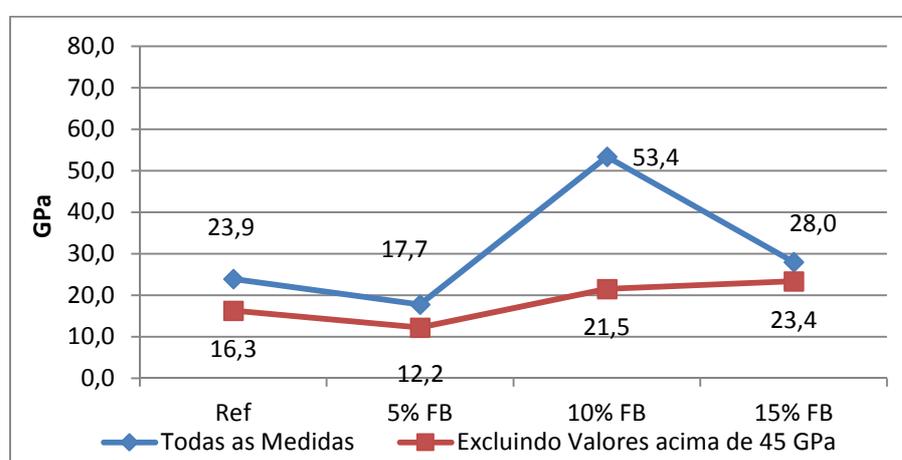


Figura 52 - Média aritmética do módulo de elasticidade na região das argamassas novas com FB.

A análise considerando todos os valores apresentou resultados não conclusivos, devido a alta variabilidade destas medidas e pela diferença de quantidade de medidas desta natureza em cada traço.

A segunda análise realizada considerou apenas os valores de indentação abaixo de 45 GPa.

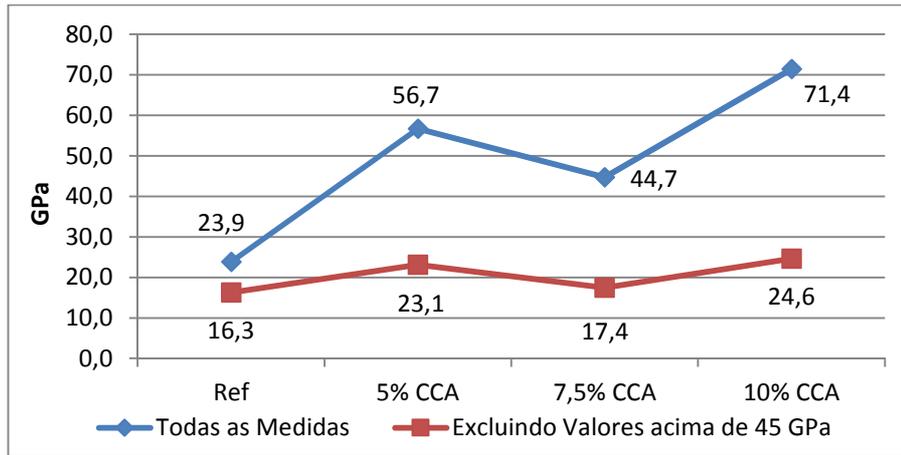
Observou-se uma tendência ao aumento do módulo de elasticidade ao se aumentar o teor de adição de FB. Entretanto a análise estatística, realizada por ANOVA e exposta na Tabela 30, demonstra que não houve significância estatística na variação dos resultados.

**Tabela 30 - ANOVA argamassas novas com FB – Valores inferiores a 45 GPa.**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Significância
Entre grupos	573,8198	3	191,2733	2,071684	0,130622	3,008787	Não
Dentro dos grupos	2215,858	24	92,32742				
Total	2789,678	27					

Onde: SQ = soma quadrada; GL = graus de liberdade; MQ = média quadrada.

Os traços que fizeram uso de CCA têm seus resultados apresentados Figura 53.

**Figura 53 - Média aritmética na região das argamassas novas com CCA.**

Da mesma maneira que as argamassas com finos, a utilização de todos os valores de indentação na m dia para os traços com CCA não permitiu qualquer conclusão sobre o comportamento das argamassas.

Pela análise das médias, considerando apenas os valores abaixo de 45 GPa, os resultados apresentaram comportamento mais coerente e uniforme com os ensaios macroestruturais.

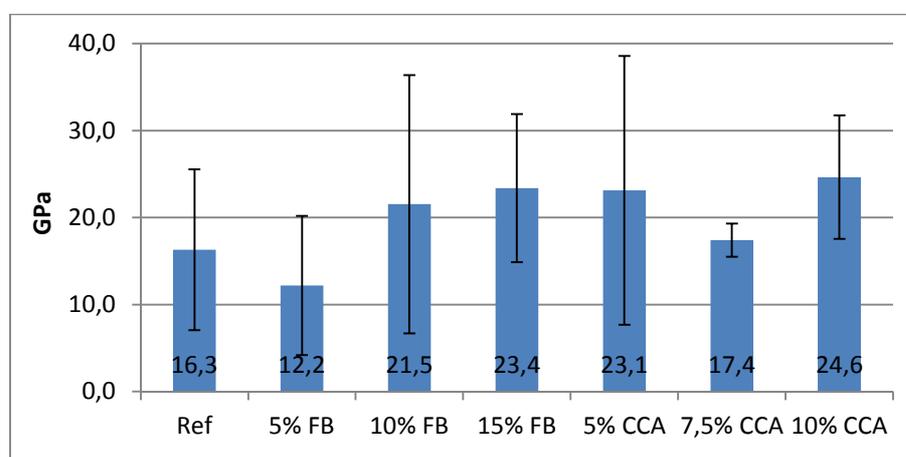
Embora haja uma tendência ao aumento do módulo de elasticidade com o uso da CCA, a ANOVA realizada para os traços com CCA, conforme Tabela 31, demonstrou que não houve significância estatística na altera o do módulo de elasticidade da argamassa nova com o uso da CCA.

**Tabela 31 - ANOVA argamassas novas com CCA - Valores inferiores a 45 GPa.**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Significância
Entre grupos	337,5078	3	112,5026	1,171266	0,355838	3,343889	Não
Dentro dos grupos	1344,73	14	96,05217				
Total	1682,238	17					

Onde: SQ = soma quadrada; GL = graus de liberdade; MQ = média quadrada.

A partir dos resultados obtidos verifica-se que a análise considerando-se a média de todos os valores de indentação apresentou grande variação de resultado, não permitindo uma relação entre ela e as demais propriedades medidas. Ao se considerar abaixo de 45 GPa, há considerável melhora nos resultados, com uma tendência ao aumento do valor do módulo de elasticidade à medida em que se aumenta o teor de adição das argamassas, conforme visualizado na Figura 54.

**Figura 54 - Média aritmética na região das argamassas novas – Valores abaixo de 45 GPa.**

Observa-se que a adição de FB em teores superiores a 5% gera uma matriz com maior módulo de elasticidade, superior ao observado na análise macroestrutural.

Já o uso da CCA resultou numa matriz de maior módulo, o que no caso de adição de 10% de CCA chega a um aumento de 51%, o que colabora com os resultados observados na resistência à compressão.

#### 4.2.2 Resultados do Método 2: Média aritmética geral das interfaces nas argamassas

Este método tem como proposta a análise da interface, em diferentes espessuras, pela média aritmética das medidas realizadas, excluindo-se os resultados acima de 45 GPa.

Os resultados das médias das medidas realizadas na interface estão apresentados na Tabela 32, para cada traço e espessura de interface, juntamente com seus respectivos desvios-padrão, quantidade e percentual de medidas válidas (medidas abaixo de 45 GPa) em relação ao total de medidas realizadas.

Tabela 32 - Resultados das médias aritméticas gerais.

Interface	Valores	Ref	5% FB	10% FB	15% FB	5% CCA	7,5% CCA	10% CCA
75 $\mu\text{m}$	Média	16,9	15,3	18,2	23	23,2	20	25,6
	DP (GPa)	7,3	5,9	9,5	8,5	8,6	5,5	5,4
	n Válidos	13	15	13	9	12	12	11
	% n Válidos	81	94	81	56	75	75	69
100 $\mu\text{m}$	Média	17,7	18,5	17,4	23,1	24,4	21,7	28,3
	DP (GPa)	8,5	9,9	9,6	8,0	11,2	7,8	8,7
	n Válidos	16	18	14	10	15	14	13
	% n Válidos	84	95	74	53	79	74	68
150 $\mu\text{m}$	Média	18,0	17,3	17,4	22,2	23,2	21,3	28,1
	DP (GPa)	9,4	10,1	9,6	7,7	11,8	7,4	8,4
	n Válidos	19	21	14	13	16	16	14
	% n Válidos	86	95	64	59	73	73	64
200 $\mu\text{m}$	Média	17,6	18,0	17,7	21,9	22,8	21,8	26,8
	DP (GPa)	9,0	9,8	9,1	7,4	11,8	7,4	9,6
	n Válidos	22	24	16	15	18	16	15
	% n Válidos	88	96	64	60	72	64	60

n = quantidade de medidas, excluindo os valores maiores que 45 GPa.

A Figura 55 demonstra as médias para cada espessura.

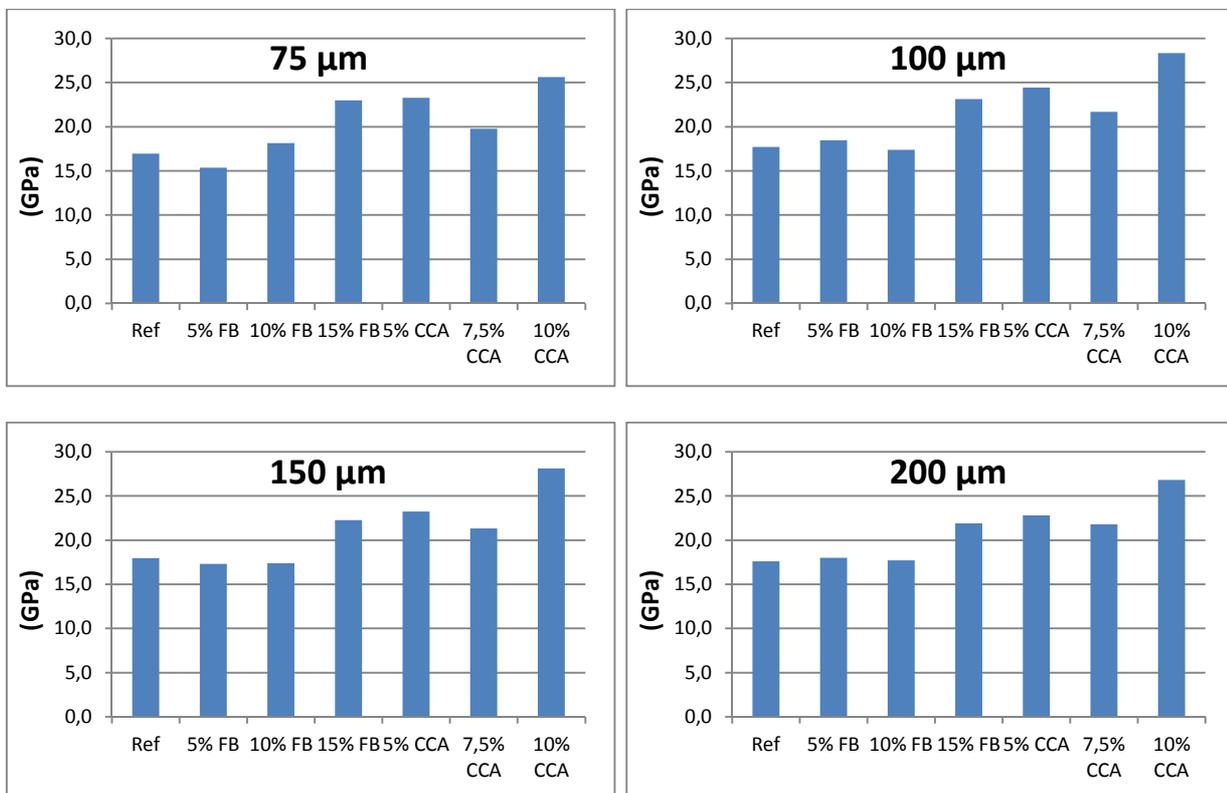


Figura 55 - Resultados das médias aritméticas gerais.

Pelos resultados das médias é possível identificar uma melhora na região de interface entre a argamassa velha e nova com a utilização dos diferentes teores de adição. Para o uso de finos de basalto apenas o teor de 15% demonstrou uma maior rigidez em relação à referência para todas as espessuras, enquanto que os teores de 5 e 10% resultaram em valores variáveis, para as diferentes espessuras analisadas.

Já para o uso de CCA, em todas as espessuras de interface, e para todos os teores de utilização, foi observado maior rigidez na região, com o teor de 10% de utilização resultando nos melhores resultados. Apenas o teor de 7,5% resultou em comportamento diferente do esperado, com valores inferiores ao teor de 5% de CCA.

Realizaram-se ANOVAS para as espessuras de 75 e 200  $\mu\text{m}$  nas diferentes adições, expostas na Tabela 33 e Tabela 34 para a extensão de leitura de 75  $\mu\text{m}$  e na Tabela 35 e Tabela 36 para a extensão de leitura de 200  $\mu\text{m}$ .

**Tabela 33 - ANOVA interfaces 75  $\mu\text{m}$  argamassas com FB - Metodologia 2.**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Significância
Entre grupos	344,2503	3	114,7501	1,885958	0,145182	2,806845	Não
Dentro dos grupos	2798,845	46	60,84447				
Total	3143,096	49					

Onde: SQ = soma quadrada; GL = graus de liberdade; MQ = média quadrada.

**Tabela 34 - ANOVA interfaces 75  $\mu\text{m}$  argamassas com CCA – Metodologia 2.**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Significância
Entre grupos	527,9999	3	176	3,672806	0,019069	2,816466	Não
Dentro dos grupos	2108,469	44	47,91976				
Total	2636,469	47					

Onde: SQ = soma quadrada; GL = graus de liberdade; MQ = média quadrada.

**Tabela 35 - ANOVA interfaces 200  $\mu\text{m}$  argamassas com FB - Metodologia 2.**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Significância
Entre grupos	206,5036	3	68,83453	0,848969	0,4716	2,730019	Não
Dentro dos grupos	5918,853	73	81,08018				
Total	6125,357	76					

Onde: SQ = soma quadrada; GL = graus de liberdade; MQ = média quadrada.

Tabela 36 - ANOVA interfaces 200  $\mu\text{m}$  argamassas com CCA - Metodologia 2.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Significância
Entre grupos	783,9086	3	261,3029	2,832226	0,044703	2,739502	Sim
Dentro dos grupos	6273,721	68	92,26061				
Total	7057,63	71					

Onde: SQ = soma quadrada; GL = graus de liberdade; MQ = média quadrada.

O uso de finos não resultou em significância estatística para ambas as espessuras. Já a ANOVA para os traços com CCA resultaram em significância estatística nas duas espessuras, demonstrando que há influência significativa na interface com a utilização de CCA.

A Figura 56 demonstra os resultados de módulo de elasticidade médio para as argamassas com finos basálticos em função da extensão da região de análise.

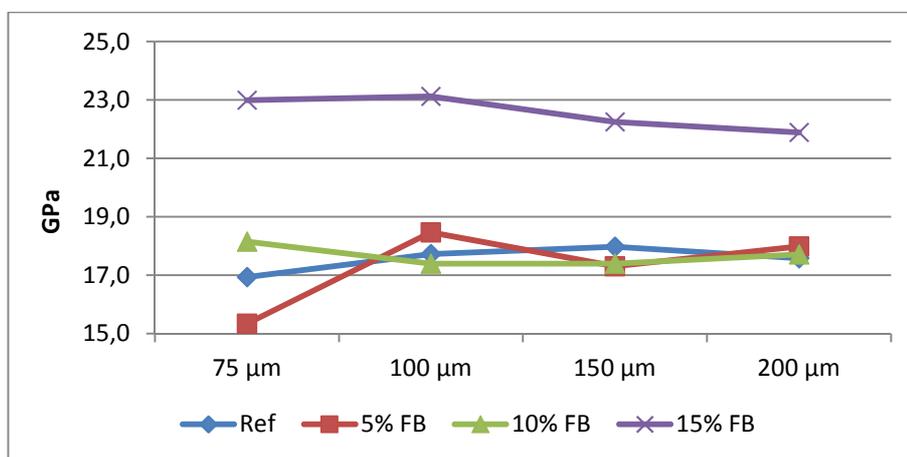
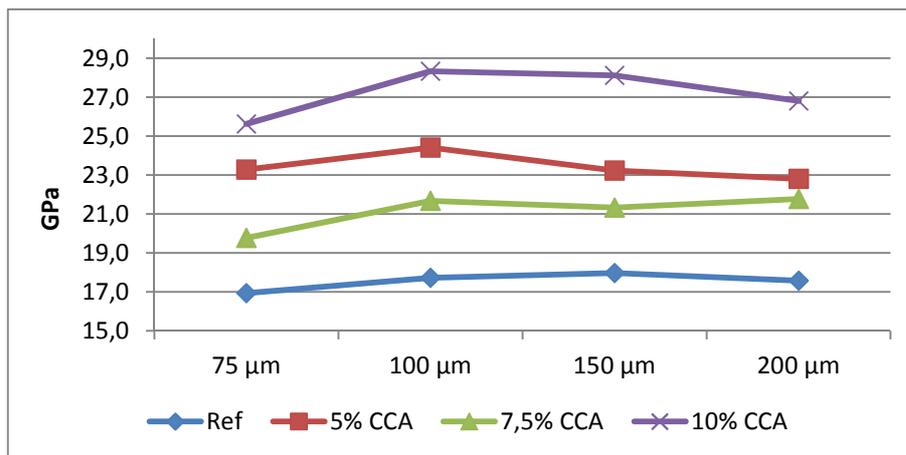


Figura 56 - Variação das médias aritméticas gerais por extensão da região de análise para os traços com FB.

O teor de 15% de FB destacou-se dos demais traços pelos maiores resultados, enquanto que os demais traços além de apresentarem módulos de elasticidade menores e muito próximos entre si.

Os resultados por traço das argamassas com CCA em função da extensão da região de análise estão apresentados na Figura 57.



**Figura 57 - Variação das médias aritméticas gerais por extensão da região de análise para os traços com CCA.**

Diferentemente do observado nas argamassas com FB, todas as argamassas com CCA apresentaram independentemente da espessura, valores superiores à referência, comprovando a eficiência da CCA como adição. E um aumento do módulo de elasticidade na região de interface em relação à argamassa de referência.

Comparando-se os valores de módulo de elasticidade para cada extensão da região em análise não é possível se identificar uma extensão de análise com valores inferiores às demais, que permitiriam a identificação de uma região de maior porosidade, típica de zona de transição.

#### **4.2.3 Resultados do Método 3: Análise por faixas de variação do módulo de elasticidade nas argamassas**

A proposta teve por princípio a divisão dos resultados medidos, com base em valores dos compostos de hidratação do cimento pelos resultados de diferentes trabalhos apresentados na revisão teórica.

A Tabela 37 apresenta o quantitativo de medidas em cada faixa de valores.

Tabela 37 - Quantitativo de medidas em cada faixa de valores.

Espessura	Faixa de Valores	Ref	5% FB	10% FB	15% FB	5% CCA	7,5% CCA	10% CCA
75 $\mu\text{m}$	n > 45 GPa	3	1	3	7	4	4	5
	35 < n $\leq$ 45 GPa	0	0	1	1	1	0	0
	15 < n $\leq$ 35 GPa	7	9	6	6	10	10	10
	n $\leq$ 15	6	6	6	2	1	2	1
100 $\mu\text{m}$	n > 45 GPa	3	1	5	9	4	5	6
	35 < n $\leq$ 45 GPa	0	2	1	1	3	1	2
	15 < n $\leq$ 35 GPa	9	10	6	7	10	11	10
	n $\leq$ 15	7	6	7	2	2	2	1
150 $\mu\text{m}$	n > 45 GPa	3	1	8	9	6	6	8
	35 < n $\leq$ 45 GPa	1	2	1	1	3	1	2
	15 < n $\leq$ 35 GPa	10	11	6	9	10	13	11
	n $\leq$ 15	8	8	7	3	3	2	1
200 $\mu\text{m}$	n > 45 GPa	3	1	9	10	7	8	10
	35 < n $\leq$ 45 GPa	1	2	1	1	3	1	2
	15 < n $\leq$ 35 GPa	11	13	8	10	11	14	11
	n $\leq$ 15	10	9	7	4	4	2	2

n = quantidade de medidas.

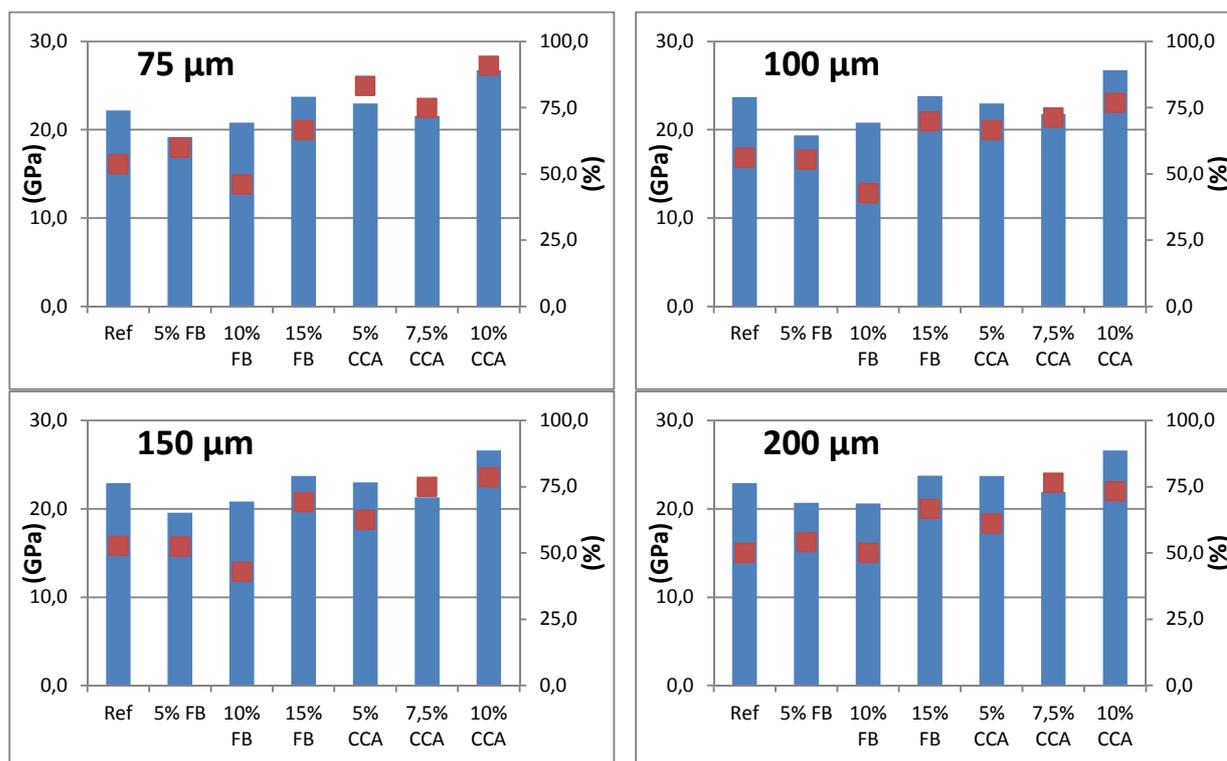
### Análise dos Valores entre 15 e 35 GPa

A Tabela 38 e a Figura 58 apresentam os valores médios de módulo de elasticidade, para os valores situados entre 15 e 35 GPa, juntamente com o desvio-padrão e o percentual de medidas situadas nesta faixa de valores, em relação à quantidade de medidas válidas (abaixo de 45 GPa).

Tabela 38 - Valores de módulo de elasticidade situados entre 15 e 35 GPa.

Espessura	Valores	Ref	5% FB	10% FB	15% FB	5% CCA	7,5% CCA	10% CCA
75 $\mu\text{m}$	Média (GPa)	22,2	19,2	20,8	23,7	23,0	21,6	26,7
	DP (GPa)	5,3	2,1	4,7	4,6	3,9	5,5	4,3
	% n	53,8	60,0	46,2	66,7	83,3	75,0	90,9
100 $\mu\text{m}$	Média (GPa)	23,7	19,4	20,8	23,8	23,0	21,8	26,7
	DP (GPa)	5,8	2,1	4,7	4,2	3,9	5,2	4,3
	% n	56,3	55,6	42,9	70,0	66,7	71,4	76,9
150 $\mu\text{m}$	Média (GPa)	22,9	19,6	20,8	23,7	23,0	21,3	26,6
	DP (GPa)	6,0	2,1	4,7	3,7	3,9	4,8	4,1
	% n	52,6	52,4	42,9	69,2	62,5	75,0	78,6
200 $\mu\text{m}$	Média (GPa)	22,9	20,7	20,6	23,7	23,7	21,9	26,6
	DP (GPa)	5,7	3,4	4,5	3,5	4,4	5,1	4,1
	% n	50,0	54,2	50,0	66,7	61,1	76,5	73,3

Onde: DP = desvio-padrão; %n = percentual de medidas em relação às medidas válidas.



■ Média de Valores entre 15 e 35 GPa ■ Percentual de medidas situadas entre 15 e 35 GPa

Figura 58 - Resultados dos valores situados entre 15 e 35 GPa.

A análise considerando-se apenas os valores de módulo de elasticidade inferiores a 35 GPa, excluindo-se agregados (> 45 GPa) e  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (entre 35 e 45 GPa), e superiores a 15 GPa, também demonstra alteração no comportamento da interface. Pelos resultados, o

traço referência resultou numa interface com valores superiores aos obtidos nas argamassas com FB, o que não é demonstrado pelo resultados macroestruturais.

Quanto à utilização de CCA, esta foi de encontro aos resultados macroestruturais, tanto pelos maiores valores nos resultados, quanto pela maior quantidade de medidas, com o maior teor de utilização, 10%, resultando nos maiores valores.

As ANOVAS de fator único, realizadas para os finos e CCA, utilizando apenas as medidas válidas estão expostas na Tabela 39 e Tabela 40 para a extensão de leitura de 75  $\mu\text{m}$  e na Tabela 41 e Tabela 42 para a espessura de 200  $\mu\text{m}$ .

**Tabela 39 - ANOVA interfaces 75  $\mu\text{m}$  argamassas com FB - Valores entre 15 e 35 GPa.**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Significância
Entre grupos	81,97387	3	27,32462	1,544796	0,228652	3,008787	Não
Dentro dos grupos	424,5164	24	17,68818				
Total	506,4903	27					

Onde: SQ = soma quadrada; GL = graus de liberdade; MQ = média quadrada.

**Tabela 40 - ANOVA interfaces 75  $\mu\text{m}$  argamassas com CCA - Valores entre 15 e 35 GPa**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Significância
Entre grupos	152,2933	3	50,76443	2,28385	0,097782	2,90112	Não
Dentro dos grupos	711,2822	32	22,22757				
Total	863,5755	35					

Onde: SQ = soma quadrada; GL = graus de liberdade; MQ = média quadrada.

**Tabela 41 - ANOVA interfaces 200  $\mu\text{m}$  argamassas com FB - Valores entre 15 e 35 GPa.**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Significância
Entre grupos	77,84964	3	25,94988	1,391966	0,260053	2,851741	Não
Dentro dos grupos	708,4192	38	18,64261				
Total	786,2688	41					

Onde: SQ = soma quadrada; GL = graus de liberdade; MQ = média quadrada.

**Tabela 42 - ANOVA interfaces 200  $\mu\text{m}$  argamassas com CCA - Valores entre 15 e 35 Gpa.**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Significância
Entre grupos	141,7958	3	47,26526	1,991654	0,129852	2,827049	Não
Dentro dos grupos	996,7297	42	23,73166				
Total	1138,525	45					

Onde: SQ = soma quadrada; GL = graus de liberdade; MQ = média quadrada.

Os resultados das ANOVAS realizadas para as diferentes adições e nas duas extensões de leitura não demonstraram variação significativa para os diferentes teores utilizados.

A Figura 59 demonstra a variação por traço com FB em cada extensão de leitura, tanto para as médias dos resultados, quanto para o percentual de medidas situadas nesta faixa de variação.

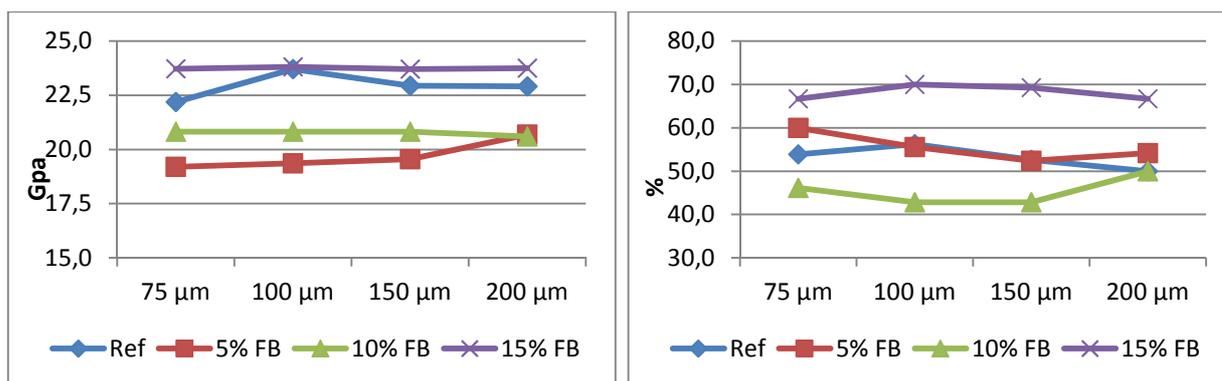


Figura 59 - Variação das médias e percentual para os traços com FB dos valores entre 15 e 35 GPa.

Os resultados das argamassas com FB também expressam um comportamento de melhora na interface apenas para o traço com 15% de finos, sendo este comportamento observado tanto pela média de valores, quanto pelo percentual de medidas situadas nesta faixa. De maneira geral, através dos resultados das médias não se evidenciou uma forte tendência de variação do comportamento ao longo das espessuras.

Os resultados para as argamassas com CCA estão apresentadas na Figura 60.

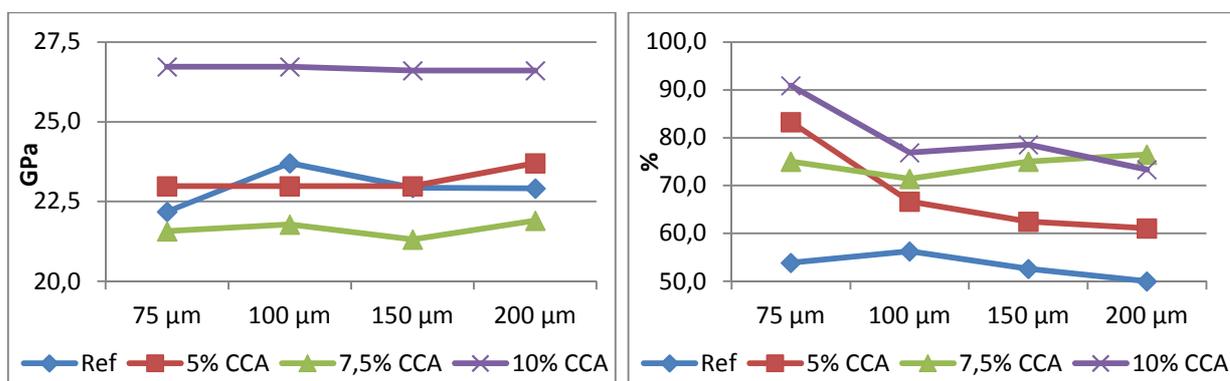


Figura 60 - Variação das médias e percentual para os traços com CCA dos valores entre 15 e 35 GPa.

O único traço que atendeu o comportamento previamente esperado foi o traço com 10% de CCA, com grande elevação nos resultados em relação à referência e demais teores. Pela

alta variabilidade dos resultados não foi possível afirmar para os demais traços se houve influência pela adição de CCA, ao contrário do teor de 10%, que destoou dos demais, demonstrando a existência de dois grupos distintos. Pelos resultados para o traço com 10% de CCA também pode ser afirmado que houve um comportamento de melhora na região da ZT, pois não houve melhora nos resultados com o aumento da quantidade de medidas realizadas na pasta.

Ao se levar em consideração os resultados de percentual de medidas situadas na faixa entre 15 e 35 GPa, a CCA resultou em maiores valores, para todas as espessuras, em relação à referência. Porém o aumento da extensão de leitura levou a uma tendência de diminuição destes compostos, o que possivelmente ocorreu pelo fato da argamassa antiga estar no estado seco quando a nova argamassa foi adicionada, o que resultou em uma ZT de elevada qualidade.

Os resultados corroboram com os trabalhos realizados por Xiao et al. (2013b) e Kong et al. (2010), em que a utilização de adições em concretos com ARC resulta num fortalecimento da região pela maior quantidade de compostos desta natureza.

#### **Análise dos Valores Abaixo de 15 GPa**

Além dos valores situados entre 15 e 35 GPa, a análise dos resultados situados abaixo de 15 GPa também pode auxiliar na interpretação dos resultados, demonstrando uma região mais fraca entre as argamassas produzidas. A Tabela 43 e a Figura 61 demonstram os resultados desta análise.

**Tabela 43 - Resultados dos valores situados abaixo de 15 GPa.**

<b>Espessura</b>	<b>Valores</b>	<b>Ref</b>	<b>5% FB</b>	<b>10% FB</b>	<b>15% FB</b>	<b>5% CCA</b>	<b>7,5% CCA</b>	<b>10% CCA</b>
<b>75 µm</b>	<b>Média (GPa)</b>	10,8	9,6	11,3	12,8	6,4	14,7	14,7
	<b>DP (GPa)</b>	3,4	5,0	2,1	1,6	-	0	-
	<b>% n</b>	46,2	40,0	46,2	22,2	8,3	16,7	9,1
<b>100 µm</b>	<b>Média (GPa)</b>	10,0	9,6	10,8	12,8	5,9	14,7	14,7
	<b>DP (GPa)</b>	3,7	5,0	2,4	1,6	0,8	0	-
	<b>% n</b>	43,8	33,3	50,0	20,0	13,3	14,3	7,7
<b>150 µm</b>	<b>Média (GPa)</b>	9,5	8,4	10,8	12,3	5,8	14,7	14,7
	<b>DP (GPa)</b>	3,8	4,8	2,4	1,5	0,6	0,0	-
	<b>% n</b>	42,1	38,1	50,0	23,1	18,8	12,5	7,1
<b>200 µm</b>	<b>Média (GPa)</b>	9,9	9,0	10,8	13,0	6,3	14,7	11,5
	<b>DP (GPa)</b>	3,8	4,9	2,4	1,8	1,2	0,0	4,6
	<b>% n</b>	45,5	37,5	43,8	26,7	22,2	11,8	13,3

Onde: DP = desvio-padrão; %n = percentual de medidas em relação às medidas válidas.

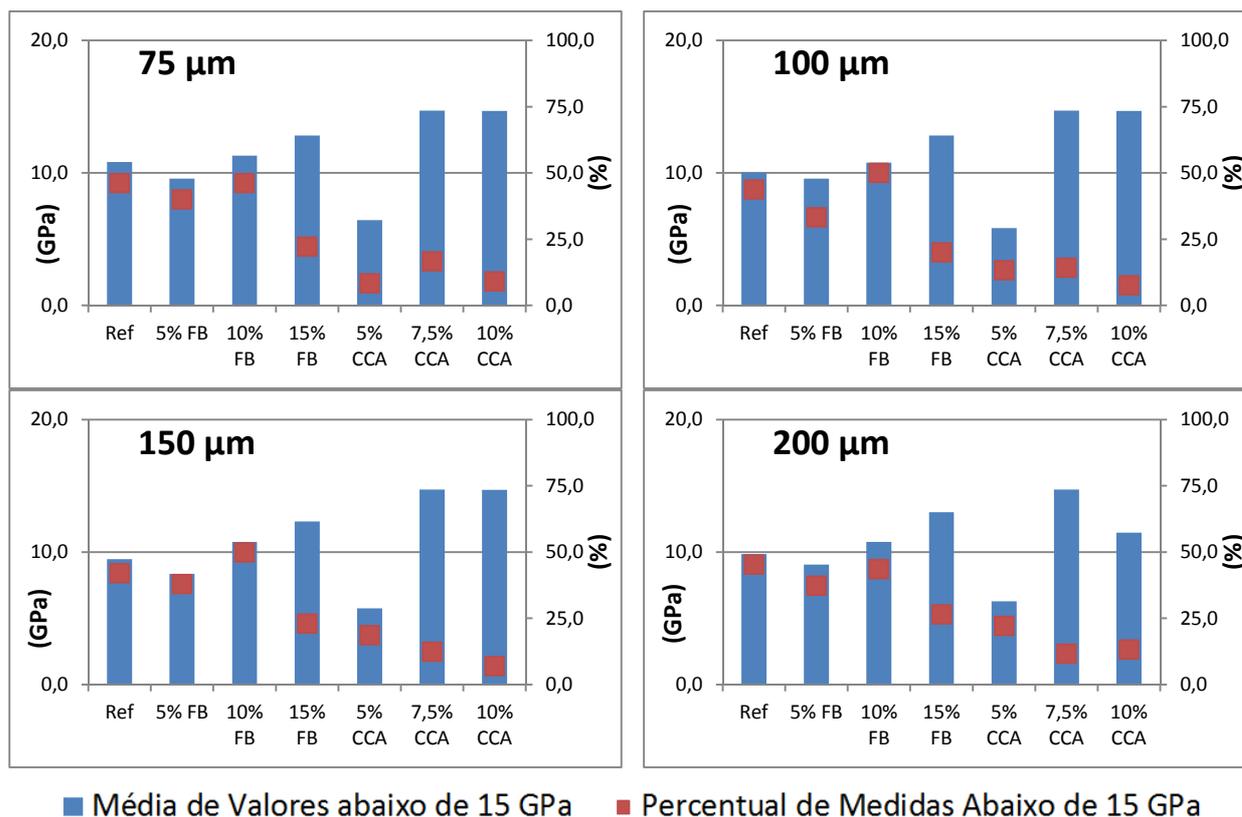


Figura 61 - Resultados dos valores situados abaixo de 15 GPa.

Pelos resultados obtidos, e da mesma maneira que os demais resultados com CCA, estes resultaram em valores maiores nas médias de módulo de elasticidade, com exceção também do traço com teor de 7,5%, enquanto que os traços com finos de basalto demonstraram tendência de comportamento mais linear.

As medidas situadas nesta faixa de valores foram categorizadas como medidas não desejáveis, pois podem representar poros e vazios, a análise pela quantidade de medidas situadas nesta faixa. Desta maneira, para ambos os traços, ficou demonstrado clara diminuição da quantidade de medidas nesta situação, destoando apenas o traço com 10% de FB, com as maiores quantidades de medidas. Os demais teores de FB resultaram em diminuição da quantidade de medidas em relação à referência com o aumento da quantidade de fino de basalto. Assim como a CCA, que como nas demais análises, resultou nos melhores resultados, com grande redução no percentual destas medidas, como o teor de 10%, resultando, na espessura de 200  $\mu\text{m}$ , numa diminuição em relação à referência de 71%.

Pelos resultados das quatro extensões de interface nota-se claramente a existência de dois grupos de resultados, o primeiro com maior quantidade de medidas abaixo de 15 GPa (referência, 5 e 10% FB), e o segundo com a argamassa com 15% de finos de basalto e todas

com CCA que resultaram em pequena quantidade de medidas desta natureza. Estes dois grupos de resultados vão de encontro com os resultados obtidos na análise macroestrutural, com o teor de 15% de FB tendo os melhores valores para esta adição, situando-se próximo aos resultados das argamassas com CCA.

As ANOVAS realizadas para os traços com finos e CCA, conforme Tabela 44 e Tabela 45 para a extensão de leitura de 75  $\mu\text{m}$  e na Tabela 46 e Tabela 47, demonstraram apenas efeito significativo no aumento das médias de módulo de elasticidade abaixo de 15 GPa para o uso da CCA na espessura de 200  $\mu\text{m}$ .

**Tabela 44 - ANOVA interfaces 75  $\mu\text{m}$  argamassas com FB - Valores abaixo de 15 GPa.**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Significância
Entre grupos	18,94956	3	6,31652	0,490148	0,694025	3,238872	Não
Dentro dos grupos	206,1913	16	12,88695				
Total	225,1408	19					

Onde: SQ = soma quadrada; GL = graus de liberdade; MQ = média quadrada.

**Tabela 45 - ANOVA interfaces 75  $\mu\text{m}$  argamassas com CCA - Valores abaixo de 15 GPa.**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Significância
Entre grupos	63,17619	3	21,05873	2,556593	0,13827	4,346831	Não
Dentro dos grupos	57,65919	7	8,237027				
Total	120,8354	10					

Onde: SQ = soma quadrada; GL = graus de liberdade; MQ = média quadrada.

**Tabela 46 - ANOVA interfaces 200  $\mu\text{m}$  argamassas com FB - Valores abaixo de 15 GPa.**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Significância
Entre grupos	46,75494	3	15,58498	1,098222	0,367585	2,975154	Não
Dentro dos grupos	368,9687	26	14,1911				
Total	415,7236	29					

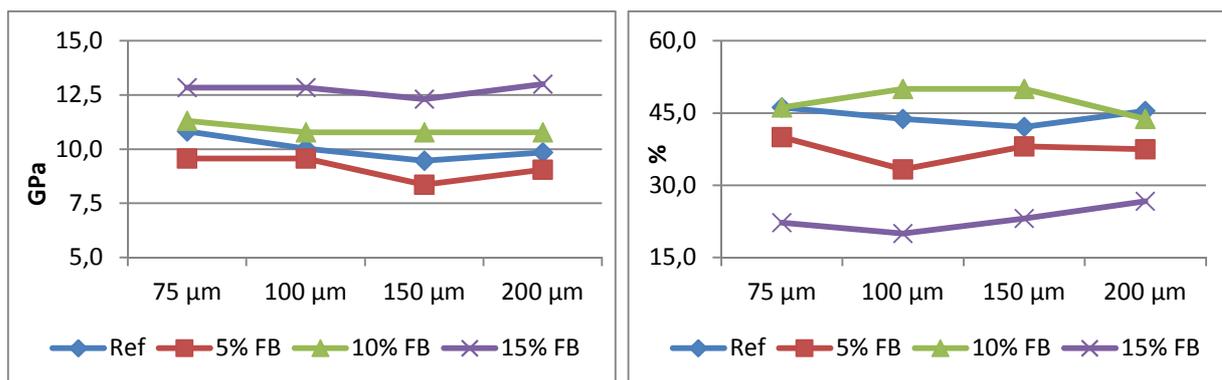
Onde: SQ = soma quadrada; GL = graus de liberdade; MQ = média quadrada.

**Tabela 47 - ANOVA interfaces 200  $\mu\text{m}$  argamassas com CCA - Valores abaixo de 15 GPa.**

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico	Significância
Entre grupos	117,7516	3	39,25053	3,756654	0,034088	3,287382	Sim
Dentro dos grupos	156,724	15	10,44827				
Total	274,4756	18					

Onde: SQ = soma quadrada; GL = graus de liberdade; MQ = média quadrada.

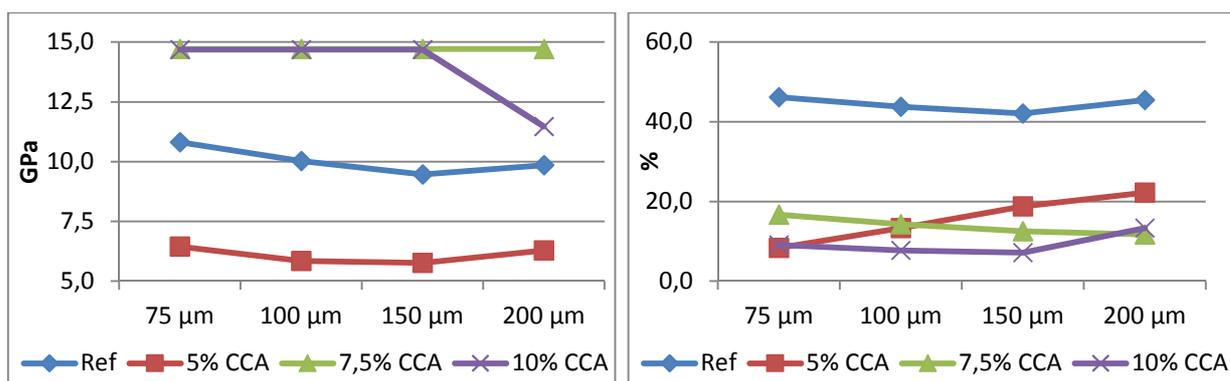
A variação por traço com FB em cada extensão de leitura, tanto para as médias dos resultados, quanto para o percentual de medidas situadas nesta faixa de variação estão na Figura 62.



**Figura 62 - Variação das médias e percentual para os traços com FB dos valores abaixo de 15 GPa.**

Assim como observado na análise dos valores entre 15 e 35 GPa, os resultados de médias demonstram também a divisão dos resultados em dois grupos, o primeiro contendo a referência e os teores de 5 e 10% de FB, o outro com os maiores resultados, apenas com o teor de 15%. Independentemente da pequena variação entre as extensões de leitura, e da alta variabilidade não pôde se afirmar uma alteração na ZT em relação à pasta, pois para todas as espessuras os valores ficaram muito próximos entre si, principalmente no traço com 15%. O percentual de valores, também comprovou o melhor desempenho com o uso do teor de 15%, pois mesmo para uma quantidade de medidas limitadas e com a grande variabilidade existente, foi possível observar uma menor quantidade desta medida em relação aos demais traços.

Os traços com CCA têm seus resultados apresentados para as médias e percentual de medidas na faixa abaixo de 15 GPa na Figura 63.



**Figura 63 - Variação das médias e percentual para os traços com CCA dos valores abaixo de 15 GPa.**

Os resultados das médias demonstram, com exceção do teor de 5%, elevação no módulo de elasticidade com a CCA, em relação à referência, em todas as espessuras. Com os teores de 7,5 e 10% exibindo resultados muito próximos e sem variação, exceto para o teor de 10% na espessura de 200 μm.

Como observado na Figura 63, a análise baseada somente pela média não seja suficiente na interpretação deste resultado, pois além dela, a quantidade destas medidas na região é muito importante. Desta forma os resultados de percentuais destas medidas, indicam um comportamento mais esperado, com todas as argamassas com CCA com resultados melhores que a referência. Também pelos percentuais destes valores, devido à quantidade de medidas realizadas e a alta variabilidade nos resultados de módulo de elasticidade, intrínseca aos diferentes compostos presentes, não é possível afirmar que a quantidade de CCA alterou a região da interface, pois em todos os teores foram observados valores muito próximos.

#### **4.2.4 Consideração sobre o Módulo de Elasticidade nas Interfaces**

A determinação do módulo de elasticidade das argamassas e regiões de interface pela técnica da nanoindentação permitiu a identificação de alterações na região estudada, por meio de cada um dos três métodos de análise de dados utilizados. Nos três métodos foi possível identificar a existência de dois grupos de resultados, um primeiro formado pela argamassa de referência e os teores de 5 e 10% de FB, e outro formado pelos exemplares com o teor de 15% de FB e as argamassas com CCA, que apresentou os maiores valores de módulo de elasticidade (com exceção do teor de 7,5% de CCA, que não resultou na melhora esperada). Não foi possível definir o melhor método de análise, pois em verdade os resultados de cada método se complementaram, primeiro para a constatação de alterações das propriedades da região da pasta em função das adições, seguido pela análise da interface pela média com todos os valores abaixo de 45 GPa, e por último pela individualização por faixas de valores de módulo de elasticidade.

Pela análise dos resultados por diferentes extensões de leitura ficou evidenciado que não há diferenças entre a zona de transição, melhor identificada na menor extensão de espessura (75  $\mu\text{m}$ ) e a respectiva matriz, onde foi realizada uma maior quantidade de pontos nas maiores espessuras analisadas. Este comportamento possivelmente tenha ocorrido pela forma de produção dos exemplares, cuja condição de umidade do ARC-M (exemplares no estado seco) favoreceu a diminuição da porosidade e o desenvolvimento de produtos de hidratação na zona de transição, indo ao encontro da teoria de Poon, Shui e Lam (2004) de que a zona de transição pode ter a porosidade diminuída, resultando em maior densidade e menor espessura, pela migração de água para o interior da argamassa velha. A argamassa nova foi uma argamassa com elevada fluidez, gerada pela alta relação a/c, o que favoreceu o transporte de produtos de hidratação do cimento e, quando utilizadas, das adições. Com a presença destes produtos na zona de transição e na argamassa velha, foi obtida uma zona de transição quase imperceptível e similar à matriz, o que pôde ser observado nas análises das interfaces.

## 5 CONCLUSÃO

Neste capítulo são apresentadas as conclusões deste trabalho a partir dos objetivos propostos, da revisão teórica e do programa experimental realizado. Também são apresentadas sugestões para trabalhos futuros, que em função de questionamentos surgidos durante a pesquisa, ou pela necessidade de maior tempo de estudo não puderam ser contemplados no escopo do trabalho.

### 5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A necessidade de um maior aprofundamento quanto ao uso de agregados reciclados de concretos, especialmente em relação à microestrutura destes concretos, e a continuidade de pesquisas sobre o tema pelo grupo de pesquisa, foram os balizadores da escolha do tema voltado à análise da interface entre duas argamassas de concreto.

De modo mais específico, **os resultados obtidos nas propriedades mecânicas** demonstraram que o uso da CCA resultou em melhor desempenho que as argamassas com FB, sendo este comportamento esperado em função das características da CCA, como a alta pozolanicidade e menor dimensão das partículas. Porém o uso de FB também se mostrou positivo em relação à referência, especialmente o teor de 15% de adição, que resultou em melhora em todas as propriedades.

**A durabilidade das argamassas**, avaliada através da taxa de absorção capilar, foi superior nas misturas com CCA, em comparação com o FB. Para esta propriedade foi observado em cada adição uma tendência de queda proporcional ao aumento do teor de adição. Todas as adições apresentaram aumento da absorção de água total em comparação com o traço de referência. A menor taxa de absorção nas argamassas com FB foi obtida com 15% de FB, que também são as argamassas com maior massa específica com esta adição. Este comportamento deve ser decorrente do efeito fíler do FB e do uso do aditivo plastificante.

A partir do resultados macroestruturais, o melhor comportamento para o teor de 15% nas argamassas com FB, pôde ser explicado pela maior quantidade de FB, com conseqüente efeito fíler, além deste traço ter sido o único que fez uso de aditivo superplastificante. Já os resultados macroestruturais das argamassas com CCA demonstram as vantagens de utilização desta adição. Pode ser destacado o maior teor utilizado, de 10%, e o teor de 7,5%, que resultou em propriedades próximas ao teor de 10%.

**As propriedades microestruturais**, avaliadas através da PIM, realizada nas argamassas, e da nanoindentação nas interfaces comprovaram a influência do uso das adições. Pela porosimetria foi possível explicar os resultados macroestruturais obtidos, pela melhora na microestrutura, e diminuição da porosidade. Por esta técnica não é possível estudar regiões de interfaces e zona de transição, o que fez com que tais regiões fossem analisadas por nanoindentação.

**A técnica de nanoindentação**, através do resultado do comportamento elástico da medida, permitiu a identificação de alterações na interface entre argamassas com a utilização das adições em função dos diferentes teores de adição. Pela técnica foi possível comprovar que as adições resultaram em melhora na interface, em comparação com o traço referência, nas argamassas que utilizaram CCA, e também para o traço de 15% de FB. Os resultados obtidos não identificaram uma região de menor módulo de elasticidade na interface entre as argamassas velha e novas, o que indica a existência de uma zona de transição com características similares à da argamassa, com maior quantidade de compostos de hidratação e menor porosidade, que uma ZT convencional. Possivelmente o fenômeno ocorreu porque a argamassa velha estava seca no momento da moldagem da argamassa nova, absorvendo água e proporcionando uma migração de grãos de cimento e adição até a região de interface.

Um dos objetivos deste trabalho foi a proposição de métodos de análise dos resultados obtidos na nanoindentação. Se propôs três métodos diferentes, que consideram a existência de grande variabilidade dois resultados individuais, inerentes ao uso da técnica em materiais cimentícios.

**Quanto ao método de análise pelas medidas realizadas apenas na argamassa nova (argamassas com adições)**. Esta análise objetivou a comparação entre as sete diferentes argamassas moldadas, considerando-se a média de todos os valores de indentação dos compostos, e considerando-se a média dos valores abaixo de 45 GPa. Concluiu-se que a exclusão dos valores acima de 45 GPa é acertada, e que há uma elevação nos valores de módulo de elasticidade com a utilização das adições, em especial nas argamassas com o maior teor de CCA.

**Quanto ao método de análise pela média aritmética geral das regiões de interface**. A determinação da média aritmética em diferentes extensões de leitura permitiu a identificação de alterações entre as argamassas, com maiores módulos de elasticidade nas argamassas que fizeram uso da CCA e da argamassa com 15% de FB. O método, aplicado à

diferentes extensões de leitura, demonstrou que não há diferenças de módulo na região de interface que permita identificar uma ZT nos exemplares estudados.

**Quanto ao método de análise por faixas de variação do módulo de elasticidade.** Como exposto na revisão teórica, os diferentes compostos de hidratação do cimento resultam em diferentes ordens de valores quanto ao módulo de elasticidade, como as que representam poros, C-S-H e  $\text{Ca(OH)}_2$ , que neste trabalho tiveram seus valores considerados de respectivamente abaixo de 15 GPa, entre 15 e 35 GPa, e entre 35 e 45 GPa.. A análise da faixa de valores situada entre 15 e 35 GPa e da faixa abaixo de 15 GPa, permitiu identificar alterações na região de interface nos diferentes traços utilizados. Estas análises também foram de encontro aos resultados esperados e obtidos na análise macroestrutural e também com o método pela média aritmética geral (método 2), sendo que o aumento dos teores de adições resultou em melhora na interface, com a CCA apresentando melhores resultados que os finos basálticos.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante a realização desta pesquisa surgiram questionamentos que não puderam ser esclarecidos, em virtude do prazo e da disponibilidade de realização de outros ensaios. Objetivando a continuidade desta pesquisa, focada à microestrutura de argamassas de concreto, que teve por objetivo a representação da situação que ocorre com a utilização de agregados reciclados de concretos em novos concretos, apresentam-se as seguintes sugestões:

- Realização de ensaios macroestruturais em concretos com AGRC, utilizando as adições e teores, para comprovar as melhoras obtidas nas argamassas e interface obtidas neste trabalho;
- Utilização de um agregado miúdo natural sem os grãos de menores dimensões, facilitando as medidas na pasta de cimento;
- Análise da influência do estado de umidade da argamassa velha (saturada, seca, ou saturada com superfície seca) no momento da aplicação da argamassa nova;
- Realização de mais medidas de nanoindentação na interface, para um completo mapeamento da região;

- Utilização de outras técnicas de microestrutura voltadas à análise da interface, como MEV, microtomografia computadorizada e Microscopia de Força Atômica (AFM);
- Adição de outros materiais, que possam ter sua migração facilmente identificada pela técnica de EDS do MEV;
- Realização de ensaios na interface entre uma argamassa de concreto e agregado natural, com o objetivo de comparação entre as duas zonas de transição que se formam em concretos com agregados reciclados de concreto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRELA, F. et al. Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 10, p. 3950–3955, 2011.

AJDUKIEWICZ, A.; KLISZCZEWICZ, A. Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. **Cement and Concrete Composites**, v. 24, n. 2, p. 269–279, 2002.

AKÇAOĞLU, T.; TOKYAY, M.; ÇELİK, T. Effect of coarse aggregate size and matrix quality on ITZ and failure behavior of concrete under uniaxial compression. **Cement & Concrete Composites**, v. 26, p. 633–638, 2004.

ÂNGULO, S. C. et al. On the classification of mixed construction and demolition waste aggregate by porosity and its impact on the mechanical performance of concrete. **Materials and Structures**, v. 43, n. 4, p. 519–528, 2010.

ÂNGULO, S. C. **Variabilidade de agregados graúdos de construção e demolição de reciclados**. 2000. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) -- Escola Politécnica – Departamento de Engenharia de Construção Civil. Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, SP, 2000.

ÂNGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos**. 2005. 167 f. Tese (Doutorado em Engenharia) -- Escola Politécnica - Departamento de Engenharia de Construção Civil. Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, SP, 2005.

ANN, K. Y. et al. Durability of recycled aggregate concrete using pozzolanic materials. **Waste Management**, v. 28, n. 6, p. 993–999, 2008.

ARNOLD, DAIANA CRISTINA METZ. **Análise da influência da forma dos grãos nas propriedades das argamassas**. 2011. 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo, RS, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15116**. Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7211**. Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

BAIRAGI, N. K.; RAVANDE, K.; PAREEK, V. K. Behaviour of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 9, n. 1–2, p. 109–126, 1993.

BAIRAGI, N. K.; VIDYADHARA, H. S.; RAVANDE, K. Mix design procedure for recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 4, n. 4, p. 188–193, 1993

BASHEER, L.; BASHEER, P. A. M.; LONG, A. E. Influence of coarse aggregate on the permeation, durability and the microstructure characteristics of ordinary Portland cement concrete. **Construction and Building Materials**, v. 19, p. 682–690, 2005.

BEDERINA, M.; MAKHLOUFI, Z.; BOUZIANI, T. Effect of limestone fillers the physic-mechanical properties of limestone concrete. **Physics Procedia**, v. 21, p. 28-34, 2011.

BENETTI, JOANA KIRCHNER. **Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico de concreto produzido com agregado graúdo reciclado de concreto**. 2012. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo, RS, 2012.

BENTZ, D. P. Influence of internal curing using lightweight aggregates on interfacial transition zone percolation and chloride ingress in mortars. **Cement & Concrete Composites**, v. 31, p. 285-289, 2009.

BHUTTA, M. et al. Properties of porous concrete from waste crushed concrete (recycled aggregate). **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 1243–1248, 2013.

BLANDO, E. **Estudo, desenvolvimento e caracterização de revestimentos do tipo super-rede de dureza**. 2005. 137 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFGRS, Porto Alegre, 2005.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia - MME. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. **Plano Nacional de Mineração 2030: geologia, mineração e transformação mineral**. Brasília, DF, 2011.

BUEST, G. T.; SILVA, N. G.; CAMPITELI, V. C. Dosagem de finos em concretos com agregados miúdos e graúdos britados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC, 47., 2005, Recife. **Anais eletrônicos...** São Paulo: IBRACON, 2005.

BUTTLER, A. M. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto – influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados**. 2003. 187 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) -- Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo - USP, São Carlos, SP, 2003.

BUTTLER, A. M. **Uso de agregados reciclados de concreto em blocos de alvenaria estrutural**. 2007. 499 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) -- Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo - USP, São Carlos, SP, 2007.

CABRAL, A. E. B. et al. Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 4, p. 421–430, 2010.

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. 2007. 248 f. Tese (Doutorado em Engenharia) -- Escola de Engenharia

de São Carlos – Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental, Universidade de São Paulo - USP, São Carlos, SP, 2007.

CALLISTER, W. **Ciência e Engenharia dos Materiais: uma introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002

CAMPITELI, V. C. Porosidade do concreto. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**, São Paulo, 1987.

CARDE, C.; FRANÇOIS, R. Effect of ITZ leaching on durability of cement-based materials. **Cement and Concrete Research**, v. 27, nº 7, p. 971–978, 1997.

CARRIJO, P. M. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. 2005. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) -- Escola Politécnica - Departamento de Engenharia de Construção Civil. Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, SP, 2005.

CAVALHEIRO, A. P. **Contribuição para a implementação de agregado reciclado de concreto em uma empresa de pré-fabricados de concreto**. 2011. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo, RS, 2011.

CECCONELLO, V. **Avaliação de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto e cinza de casca de arroz, com ênfase na retração**. 2013. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo, RS, 2013.

CEZAR, D. S. **Características de durabilidade de concretos com cinza volante e cinza de casca de arroz com e sem beneficiamento**. 2011. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Construção Civil e Preservação Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria, RS, 2011.

ÇELIK, T.; MARAR, K. Effects of crushed stone dust on some properties of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 7, p. 1121–1130, 1996.

CHAKRADHARA RAO, M.; BHATTACHARYYA, S. K.; BARAI, S. V. Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. **Materials and Structures**, v. 44, n. 1, p. 205–220, 2011.

CHINDAPRASIRT, P., et al. Influence of fly ash fineness on the chloride penetration of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 21, p. 356–361, 2007.

CONSTANTINIDES, G.; ULM, F. J. The effect of two types of C-S-H on the elasticity of cement-based materials: Results from nanoindentation and micromechanical modeling. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 67–80, 2004.

CONSTANTINIDES, G.; ULM, F. J. The nanogranular nature of C–S–H. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, v. 55, p. 64-90, 2007.

CORINALDESI, V. Mechanical and elastic behaviour of concretes made of recycled-concrete coarse aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 9, p. 1616–1620, 2010.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais. In: ISAIA, G. C. (org.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. cap. 08, p. 261-309.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições minerais para concreto estrutural. In: ISAIA, G. C. (org.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. cap. 12, p. 345-379.

DAMO, G. F. **Avaliação do desempenho de diferentes agregados miúdos de britagem em concretos de Cimento Portland**. 2011. 230 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, SC, 2011.

DE JUAN, M. S. **Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural**. 2004. 514 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) -- Departamento de Engenharia Civil: Construção, Universidade Politécnica de Madri, Madri, 2004.

DE JUAN, M. S. DE; GUTIÉRREZ, P. A. Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 872–877, 2009.

DELLA, V. P.; KÜHN I.; HOTZA, D. Reciclagem de Resíduos Agro-Industriais: Cinza de Casca de Arroz como Fonte Alternativa de Sílica. **Cerâmica Industrial**, v. 10, n. 2, p. 22–25, 2005.

DIAMOND, S.; HUANG, J. The ITZ in concrete - a different view based on image analysis and SEM observations. **Cement & Concrete Composites**, v. 23, p. 179-188, 2001.

DOMINGO-CABO, A. et al. Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 7, p. 2545–2553, 2009.

DUAN, P. et al. Effects of metakaolin, silica fume and slag on pore structure, interfacial transition zone and compressive strength of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 1–6, 2013.

DUAN, Z. H.; KOU, S. C.; POON, C. S. Prediction of compressive strength of recycled aggregate concrete using artificial neural networks. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 1200–1206, 2013.

DUAN, Z. H., POON, C. S. Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars. **Materials and Design**, v. 58, p. 19–29, 2014.

DUART, M. A. **Estudo da microestrutura do concreto com adição de cinza de casca de arroz residual sem beneficiamento**. 2008. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Materiais de Construção Civil, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria, RS, 2008.

ELSHARIEF, A.; COHEN, M. D.; OLEK, J. Influence of aggregate size, water cement ratio and age on the microstructure of the interfacial transition zone. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 11, p. 1837–1849, 2003.

ERHART, R. L. **Influência do chapisco com cinza de casca de arroz na aderência de argamassa em substratos cerâmicos com diferentes porosidades**. 2014. 205 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo, RS, 2014.

ETXEERRIA, M. et al. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 5, p. 735–742, 2007.

ETXEERRIA, M.; VÁZQUEZ, E.; MARÍ, A. Microstructure analysis of hardened recycled aggregate concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 58, n. 10, p. 683–690, 2006.

EVANGELISTA, L., et al. Physical, chemical and mineralogical properties of fine recycled aggregates made from concrete waste. *Construction and Building Materials*, v. 86, p. 178-188, 2015.

EVANGELISTA, L.; BRITO, J. DE. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 29, n. 5, p. 397–401, 2007.

EVANGELISTA, L.; BRITO, J. DE. Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 1, p. 9–14, 2010.

FARIAS, M. M.; PALMEIRA, E. M. Agregados para a construção civil. In: ISAIA, G. C. (org.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2010. cap. 16, p. 485-525.

FEDUMENTI, M. B. **Avaliação da influência da cinza da casca de arroz no comportamento de concretos com agregado reciclado de concreto em relação a propriedades mecânicas e de durabilidade, com ênfase no transporte de íons cloretos**. 2013. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo, RS, 2013.

FOLINO, P.; XARGAY, H. Recycled aggregate concrete - Mechanical behavior under uniaxial and triaxial compression. **Construction and Building Materials**, v. 56, p. 21–31, 2014.

FONSECA, N.; BRITO, J. DE; EVANGELISTA, L. The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with recycled concrete waste. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 6, p. 637–643, 2011.

GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. Rice husk ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 1675–1683, 2008.

GAO, J. M. et al. ITZ microstructure of concrete containing GGBS. **Cement and Concrete Research**, v. 35, p. 1299–1304, 2005.

GAO, Y., et al. The ITZ microstructure, thickness and porosity in blended cementitious composite: Effects of curing age, water to binder ratio and aggregate content. **Composites: Part B**, v. 60, p. 1-13, 2014.

GENG, J.; SUN, J. Characteristics of the carbonation resistance of recycled fine aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 49, p. 814–820, 2013

GOLDMAN, A.; BENTUR, A. The influence of microfillers on enhancement of concrete strength. **Cement and Concrete Research**, v. 23, n. 4, p. 962–972, 1993.

GÓMEZ-SOBERÓN, J. M.. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 8, p. 1301–1311, 2002.

GONÇALVES, J. P. et al. Absortividade de concretos contendo agregados reciclados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC, 49., 2007, Recife. **Anais eletrônicos...** São Paulo: IBRACON, 2007.

GONÇALVES, M. S. **Análise da viabilidade técnica de utilização de resíduos de concreto oriundos da pré-fabricação como agregado graúdo para a produção de novos concretos.** 2011. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo, RS, 2011.

GONÇALVES, R. D. C. **Agregados reciclados de resíduos de concreto: Um novo material para dosagens estruturais.** 2001. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) -- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo - USP, São Carlos, SP, 2001.

GONZÁLEZ-FONTEBOA, B. et al. Effect of recycled coarse aggregate on damage of recycled concrete. **Materials and Structures**, v. 44, n. 10, p. 1759–1771, 2011.

GRUBBA, D. C. R. P. **Estudo do comportamento mecânico de um agregado reciclado de concreto para utilização na construção rodoviária.** 2009. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo - USP, São Carlos, SP, 2009.

GUJEL, D. A. **Avaliação do comportamento elástico de concretos produzidos com substituição parcial dos agregados graúdos naturais por reciclados de concreto a partir de ensaios estático e dinâmico.** 2014. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo, RS, 2014.

HANSEN, T. C. Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945–1985. **Materials and Structures**, v. 19, n. 3, p. 201–246, 1986.

HEINECK, S. **Desempenho de argamassas de revestimento com incorporação da fração miúda da britagem de concreto.** 2012. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) --

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo, RS, 2012.

HOPPE, A. E. **Carbonatação em concreto com cinza de casca de arroz sem moagem**. 2008. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Santa Maria, RS, 2008.

HOPPE, T. F. **Resistividade elétrica de concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz**. 2005. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Santa Maria, RS, 2005.

HU, C.; LI, Z. Property investigation of individual phases in cementitious composites containing silica fume and fly ash. **Cement & Concrete Composites**, v. 57, p. 17-26, 2015.

HUSSIN, A.; POOLE, C. Petrography evidence of interfacial transition zone (ITZ) in the normal strength concrete containing granitic and limestone aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 2298–2303, 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO): **ISO 14577-1: Metallic Materials - Instrumented indentation test for hardness and materials parameters - Part 1**. Geneva, 2002.

ISMAIL, S.; RAMLI, M. Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 464–476, 2013.

JACINTHO, A. E. P. G. A.; GIONGO, J. S. Resistência mecânica do concreto. In: ISAIA, G. C. (org.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. cap. 20, p. 605-632.

JAMIL, M. et al. Pozzolanic contribution of rice husk ash in cementitious system. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 588-593, 2013.

JENNINGS, H. M. et al. A multi-technique investigation of the nanoporosity of cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 329–336, 2007.

Jl, T. et al. Effect of moisture state of recycled fine aggregate on the cracking resistibility of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 726–733, 2013.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. 2000. 102 f. Tese (Livre Docência) -- Escola Politécnica, Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, SP, 2000.

JONES, C. A.; GRASLEY, Z. C. Short-term creep of cement paste during nanoindentation. **Cement & Concrete Composites**, v. 33, p. 12-18, 2011.

KATZ, A. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 5, p. 703–711, 2003.

KE, Y. et al. Identification of microstructural characteristics in lightweight aggregates concrete by micromechanical modelling including the interfacial transition zone. **Cement and Concrete Research**, v. 40, p. 1590–1600, 2010.

KHATIB, J. M. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 4, p. 763–769, 2005.

KHOSHKENARI, A. G. et al. The role of 0-2 mm fine recycled concrete aggregate on the compressive and splitting tensile strengths of recycled concrete aggregate concrete. **Material and Design**, v. 64, p. 345–354, 2014.

KIELING, A. G. **Influência da segregação no desempenho de cinzas de casca de arroz como pozolanas e material adsorvente**. 2009. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo, RS, 2009.

KONG, D. et al. Effect and mechanism of surface-coating pozzalanic materials around aggregate on properties and ITZ microstructure of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 5, p. 701–708, 2010.

KOU, S.; POON, C.; AGRELA, F. Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 8, p. 788–795, 2011.

KOU, S.; POON, C. Effect of the quality of parent concrete on the properties of high performance recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 77, p. 501-508, 2015.

KOU, S. C.; POON, C. S. Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 69–76, 2012.

KOU, S.-C.; POON, C.-S. Properties of concrete prepared with crushed fine stone, furnace bottom ash and fine recycled aggregate as fine aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 8, p. 2877–2886, 2009.

KOU, S.-C.; POON, C.-S. Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash. **Cement and Concrete Composites**, v. 37, p. 12–19, 2013.

KULAIIF, Y. Brita e Cascalho. **Sumário Mineral 2013**, Brasília, DF, ed. 33, 2013.

KWAN, W. H. et al. Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. **Construction and Building Materials**, v. 26, n. 1, p. 565–573, 2012.

LAGERBLAD, B.; GRAM, H. E.; WESTERHOLM, M. Evaluation of the quality of fine materials and filler from crushed rocks in concrete production. **Construction and Building Materials**, v. 67, p. 121-126, 2014.

LEE, G. C.; CHOI, H. B. Study on interfacial transition zone properties of recycled aggregate by micro-hardness test. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 455–460, 2013.

LEEMANN, A., LOSER, R.; MÜNCH, B. Influence of cement type on ITZ porosity and chloride resistance of self-compacting concrete. **Cement & Concrete Composites**, v. 32, p. 116–120, 2010.

LEITE, M. B. **Avaliação das propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2001. 270 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, RS, 2001.

LEVY, S. M.; HELENE, P. Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 11, p. 1975–1980, 2004.

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. 2001. 194 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - EPUSP, São Paulo, 2001.

LI, L. G.; KWAN, A. K. H. Adding limestone fines as cementitious paste replacement to improve tensile strength, stiffness and durability of concrete. **Cement & Concrete Composites**, v. 60, p. 17-24, 2015.

LI, W. et al. Interfacial transition zones in recycled aggregate concrete with different mixing approaches. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 1045–1055, 2012.

LIMA, C. et al. Physical properties and mechanical behaviour of concrete made with recycled aggregates and fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 47, p. 547–559, 2013.

LIMA, J. A. R. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos**. 1999. 240 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo)-- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo - USP, São Carlos, SP, 1999.

LIMBACHIYA, M. C.; MARROCCHINO, E.; KOULOURIS, A. Chemical–mineralogical characterisation of coarse recycled concrete aggregate. **Waste Management**, v. 27, n. 2, p. 201–208, 2007.

LIMBACHIYA, M.; MEDDAH, M. S.; OUCHAGOUR, Y. Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete. **Construction and Building Materials**, v. 27, n. 1, p. 439–449, 2012.

LIU, Q.; XIAO, J.; SUN, Z. Experimental study on the failure mechanism of recycled concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 10, p. 1050–1057, 2011.

LIZARAZO-MARRIAGA, J. L.; HIGUERA, C.; CLAISSE, P. Measuring the effect of the ITZ on the transport related properties of mortar using electrochemical impedance. **Construction and Building Materials**, v. 52, p. 9–16, 2014.

LOPES, L. R. **Avaliação da interferência dos finos no desempenho de concretos com resíduos de construção e demolição**. 2005. 148 f. Mestrado (Mestrado em Engenharia) -- Universidade Estadual de Londrina, Londrina, PR, 2005.

LÓPEZ-GAYARRE, F. et al. Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria on recycled concrete properties. **Waste Management**, v. 29, n. 12, p. 3022–3028, 2009.

LÓPEZ-GAYARRE, F. et al. Assessment of properties of recycled concrete by means of a highly fractioned factorial design of experiment. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 10, p. 3802–3809, 2011.

LOVATO, P. S. **Verificação dos parâmetros de controle de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto**. 2007. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, RS, 2007.

MÁLIA, M.; BRITO, J.; BRAVO, M. Indicadores de resíduos de construção e demolição para construções residenciais novas. **Ambiente Construído**, v. 11, n. 3, p. 117–130, 2011.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E DO ABASTECIMENTO. **Arroz**. Disponível em: < <http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/arroz>>. Acesso em: 20 de Maio 2013.

MASSARDO, S. B. **Nanoindentação em vitrocerâmicas de dissilicato de lítio–fractografia e propriedades mecânicas**. 2011. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, do Setor de Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná - UFP, Curitiba, PR, 2011.

MARINKOVIĆ, S. et al. Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. **Waste Management**, v. 30, n. 11, p. 2255–2264, 2010.

MATIAS, D. et al. Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates – Influence of the use of superplasticizers. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 101–109, 2013.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MIGLIORINI, T. L. Areia para construção. **Sumário Mineral 2013**, Brasília, DF, ed. 33, 2013.

MIRANDA, L. F. R.; SELMO, S. M. S. CDW recycled aggregate renderings: Part II – Analysis of the effect of materials finer than 75  $\mu\text{m}$  under accelerated aging performance. **Construction and Building Materials**, v. 20, n. 9, p. 625–633, 2006.

MOHAMMED, M. K.; DAWSON, A. R.; THOM, N. H. Macro/micro-pore structure characteristics and the chloride penetration of self-compacting concrete incorporating different types of filler and mineral admixture. **Construction and Building Materials**, v. 72, p. 83–93, 2014.

MONTEIRO, P. J. M.; MASO, J. C.; OLLIVIER, J. P. The aggregate-mortar interface. **Cement and Concrete Research**, v. 15, p. 953–958, 1985.

MORAIS, T. A. **Estudo do uso do agregado miúdo reciclado de concreto na produção de argamassa de revestimento vertical**. 2011. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará - UFC, Fortaleza, CE, 2011.

MOREIRA, L. H. H. **Avaliação da influência da origem e do tratamento dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto estrutural**. 2010. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Escola Politécnica – Departamento de Engenharia de Construção Civil. Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, SP, 2010.

MOREIRA, L. H. H.; FIGUEIREDO, A. D. Influência da origem e do tratamento dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto estrutural. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**, São Paulo, 2010.

MUKHARJEE, B. B.; BARAI, S. V. Influence of incorporation of nano-silica and recycled aggregates on compressive strength and microstructure of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 71, p. 570-578, 2014.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Propriedades do concreto**. 2ª ed. São Paulo: Pini, 2013.  
NEŽERKA, V., et al. Investigation of crushed brick-matrix interface in lime-based ancient mortar by microscopy and nanoindentation. **Cement & Concrete Composites**, v. 55, p. 122-128, 2015.

NILI, M.; EHSANI, A. Investigating the effect of the cement paste and transition zone on strength development of concrete containing nanosilica and silica fume. **Material and Design**, v. 75, p. 174–183, 2015.

NIXON, P. J. Recycled concrete as an aggregate for concrete—a review. **Matériaux et Constructions**, v. 11, n. 5, p. 371–378, 1978.

OLLIVIER, J. P.; MASO, J. C.; BOURDETTE, B. Interfacial Transition Zone in Concrete. **Advanced Cement Based Materials**, v. 02, p. 30-38, 1995.

Olivier W.C.; Pharr G. M. An Improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. **J. Mater. Res.**, v.7, p.1564-1583, 1992.

OLORUNSOGO, F. T.; PADAYACHEE, N. Performance of recycled aggregate concrete monitored by durability indexes. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 2, p. 179–185, 2002.

PADMINI, A. K.; RAMAMURTHY, K.; MATHEWS, M. S. Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 829–836, 2009.

PADOVAN, R. G. **Influência da pré-molhagem nas propriedades de concretos produzidos com agregados reciclados de concreto.** 2013. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo, RS, 2013.

PAULON, V. A. A microestrutura do concreto convencional. In: ISAIA, G. C. (org.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações.** São Paulo: IBRACON, 2005. cap. 19, p. 582-604.

PAULON, V.; KIRCHHEIM, A. P. Nanoestrutura e Microestrutura do Concreto Endurecido. In: ISAIA, G. C. (org.). **Concreto: Ciência e Tecnologia.** São Paulo: IBRACON, 2011. cap. 16, p. 585-614.

PEDRO, D.; BRITO, J.; EVANGELISTA, L. Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete. **Construction and Building Materials**, v. 71, p. 141-151, 2014.

PEDROZO, R. F. E. **Influência da substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado fino em propriedades de argamassas e concretos.** 2008. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina - UFS, Florianópolis, SC, 2008.

PEREIRA, P.; EVANGELISTA, L.; BRITO, J. de. The effect of superplasticisers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 722-729, 2012.

PEREIRA, P. S. B. **Betões com a incorporação de agregados finos reciclados de betão - Influência de superplastificantes.** 2010. 243 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2010.

PINTO, T. P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana.** 1999. 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia) -- Escola Politécnica, Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, SP, 1999.

POON, C. .; SHUI, Z. .; LAM, L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 18, n. 6, p. 461-468, 2004.

POON, C. S. et al. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 1, p. 31-36, 2004.

PRADO, D. M. **Propriedades físicas e mecânicas de blocos estruturais produzidos com agregados reciclados de concreto.** 2006. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) -- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo - USP, São Carlos, SP, 2006.

PROKOPSKI, G.; HALBINIAK, J. Interfacial transition zone in cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p. 579-583, 2000.

RAHAL, K. Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. **Building and Environment**, v. 42, n. 1, p. 407–415, 2007.

RAVINDRARAJAH, R. S.; TAM, C. T. Recycling concrete as fine aggregate in concrete. **International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete**, v. 9, n. 4, p. 235–241, 1987.

RODRIGUES, C. R. S. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo da construção civil**. 2011. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco, Recife, PE, 2011.

ROSA, M. **Análise do efeito do teor de microfinos nas propriedades de argamassas de revestimento com utilização de areia de britagem basáltica**. 2013. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo, RS, 2013.

ROSSIGNOLO, J. A. Interfacial interactions in concretes with silicafume and SBR latex. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 817–821, 2009.

SAGOE-CRENTSIL, K. K.; BROWN, T.; TAYLOR, A. H. Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 5, p. 707–712, 2001.

SANCHES, F.; SOBOLEV, K. Nanotechnology in concrete - A review. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 2060–2071, 2010.

SANI, D. et al. Leaching and mechanical behaviour of concrete manufactured with recycled aggregates. **Waste Management**, v. 25, n. 2, p. 177–182, 2005.

SANTOS, L. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto**. 2006. 178 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília – UnB, Brasília, DF, 2006.

SARTORI, B. R. C. **Estudo da carbonatação em concretos com agregado graúdo reciclado de concreto e cinza de casca de arroz**. 2013. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo, RS, 2013.

SILVA, F. G. S. et al. Influência dos efeitos pozolânico e microfiller na resistência à compressão do concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC, 47., 2005, Recife. **Anais eletrônicos...** São Paulo: IBRACON, 2005.

SILVA, W. R. L.; NĚMEČEK, J.; ŠTEMBERK, P. Methodology for nanoindentation-assisted prediction of macroscale elastic properties of high performance cementitious composites. **Cement & Concrete Composites**, v. 45, p. 57–68, 2014.

SICAT, E., et al. Experimental investigation of the deformational behavior of the interfacial transition zone (ITZ) in concrete during freezing and thawing cycles. **Construction and Building Materials**, v. 65, p. 122-131, 2014.

SIDOROVA, A., et al. Study of the recycled aggregates nature's influence on the aggregate-cement paste interface and ITZ. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 677-684, 2014.

SILVEIRA, A. A. **Contribuição ao estudo do efeito da incorporação de cinza de casca de arroz em concretos submetidos à reação alcali-agregado**. 2007. 227 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFGRS, Porto Alegre, 2007.

SOARES, D., et al. Use of coarse recycled aggregates from precast concrete rejects: Mechanical and durability performance. **Construction and Building Materials**, v. 71, p. 263-272, 2014.

SOARES, L. W. O. et al. The effect of rice husk ash as pozzolan in addition to cement Portland class G for oil well cementing. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 113, p. 80-85, 2015.

SOKOLOVICZ, B. C. **Microestrutura e durabilidade a cloretos de protótipos de concreto com cinza de arroz com e sem moagem prévia**. 2013. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria, RS, 2013.

SORELLI, L., et al. The nano-mechanical signature of Ultra High Performance Concrete by statistical nanoindentation techniques. **Cement and Concrete Research**, v. 38, p. 1447-1456, 2008.

SOROKA, I.; STERN, N. Calcareous fillers and the compressive strength of portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 6, n. 3, p. 367-376, 1976.

SOUZA, L. M. S. **Estudo de hidratação e nanoindentação de pastas de cinza da casca de arroz e cinza do bagaço de cana-de-açúcar com hidróxido de cálcio**. 2011. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2011.

SOUZA, V. C. G. **Influência das características mineralógicas, físicas e químicas dos clínques de cimento Portland sobre sua moabilidade**. 2007. 396 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFGRS, Porto Alegre, 2007.

SOUZA, C. A. **Utilização de resíduo de concreto como agregado miúdo para argamassa de concretos estruturais convencionais**. 2006. 101 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte, MG, 2006.

SUN, X., et al. Investigation of internal curing effects on microstructure and permeability of interface transition zones in cement mortar with SEM imaging, transport simulation and

hydration modeling techniques. **Construction and Building Materials**, v. 76, p. 366-379, 2015.

TABSH, S. W.; ABDELFAH, A. S. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 1163–1167, 2009.

TAM, V. W. Y.; GAO, X. F.; TAM, C. M. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 6, p. 1195–1203, 2005.

TAM, V. W. Y.; TAM, C. M. Diversifying two-stage mixing approach (TSMA) for recycled aggregate concrete: TSMAs and TSMAsc. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 10, p. 2068–2077, 2008.

TAM, V. W. Y.; TAM, C. M.; LE, K. N. Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 50, n. 1, p. 82–101, 2007.

TAM, V. W. Y.; TAM, C. M.; WANG, Y. Optimization on proportion for recycled aggregate in concrete using two-stage mixing approach. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 10, p. 1928–1939, 2007.

TEGGUER, A. D. Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach. **Construction and Building Materials**, v. 27, n. 1, p. 112–116, 2012.

THOMAS, C. et al. Durability of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 1054–1065, 2013.

TOPÇU, İ. B.; ŞENGEL, S. Properties of concretes produced with waste concrete aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 8, p. 1307–1312, 2004.

TOPÇU, İ. B.; UĞURLU, A. Effect of the use of mineral filler on the properties of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 7, p. 1071–1075, 2003.

TRTIK, P.; MÜNCH, B., LURA, P. A critical examination os statistical nanoindentation on model materials and hardened cement pastesbased on virtual experiments. **Cement & Concrete Composites**, v. 31, p. 705–714, 2009.

TROIAN, ALINE. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto frente à penetração de íons cloreto**. 2010. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo, RS, 2010.

UNION EUROPÉENE DES PRODUCTEURS DE GRANULATS - UEPG. European economic development. **Annual Review 2011-2012**, Bélgica, 2012.

ULM, F. J., et al. Does microstructure matter for statistical nanoindentation techniques? **Cement & Concrete Composites**, v. 32, p. 92-99, 2010.

ULSEN, C. et al. Production of recycled sand from construction and demolition waste. **Construction and Building Materials**, v. 40, p. 1168–1173, 2013a.

ULSEN, C. **Caracterização tecnológica de resíduos de construção e demolição**. 2006. 171 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) -- Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, 2006.

ULSEN, C. **Caracterização e separabilidade de agregados miúdos produzidos a partir de resíduos de construção e demolição**. 2011. 222 f. Tese (Doutorado em Engenharia) -- Escola Politécnica, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, 2011.

VELEZ, K. et al. Determination by nanoindentation of elastic modulus and hardness of pte constituents os Portland cement clinker. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 555–561, 2001.

VENKOVIC, N.; SORELLI, L.; MARTIRENA, F. Nanoindentation study of calcium silicate hydrates in concrete produced with effective microorganisms-based bioplasticizer. **Cement & Concrete Composites**, v. 49, p. 127–139, 2014.

VIEIRA, G. L. **Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons cloretos em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 2003. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, RS, 2003.

WANG, X. H. et al. Application of nanoindentation testing to study of the interfacial transition zone in steel fiber reinforced mortar. **Cement and Concrete Research**, v. 39, p. 701–715, 2009.

WEIDMANN, D. F. **Contribuição ao estudo da influência da forma e da composição granulométrica de agregados miúdos de britagem nas propriedades do concreto de cimento portland**. 2008. 295 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, SC, 2008.

WERLE, A. P. **Determinação de propriedades de concretos com agregados reciclados de concreto com ênfase na carbonatação**. 2010. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS, São Leopoldo, RS, 2010.

WERLE, A. P.; KAZMIERCZAK, C. S.; KULAKOWSKI, M. P. Carbonatação em concretos com agregados reciclados de concreto. **Ambiente Construído**, v. 11, n. 2, p. 213–228, 2011.

XIAO, J. et al. An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996–2011). **Construction and Building Materials**, v. 31, p. 364–383, 2012.

XIAO, J. et al. Compressive behavior of recycled aggregate concrete under impact loading. **Cement and Concrete Research**, v. 71, p. 46–55, 2015.

XIAO, J. et al. Effects of interfacial transition zones on the stress–strain behavior of modeled recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 52, p. 82–99, 2013a.

XIAO, J. et al. Properties of interfacial transition zones in recycled aggregate concrete tested by nanoindentation. **Cement and Concrete Composites**, v. 37, p. 276–292, 2013b.

XIE, Y., et al. Experimental study of the interfacial transition zone (ITZ) of model rock-filled concrete (RFC). **Cement & Concrete Composites**, v. 55, p. 223–231, 2015.

XU, W. et al. Effect of rice husk ash fineness on porosity and hydration reaction of blended cement paste. **Construction and Building Materials**, v. 89, p. 90–101, 2015.

YOUNIS, K. H.; PILAKOUTAS, K. Strength prediction model and methods for improving recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 49, p. 688–701, 2013.

ZAHARIEVA, R. et al. Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, n. 2, p. 223–232, 2003.

ZEGA, C. J.; MAIO, Á. A. DI. Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements. **Waste Management**, v. 31, n. 11, p. 2336–2340, 2011.

ZERBINO, R. et al. Alkali–silica reaction in mortars and concretes incorporating natural rice husk ash. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 796–806, 2012.

ZHAO, Z. et al. Evaluation of pre-coated recycled aggregate for concrete and mortar. **Construction and Building Materials**, v. 43, p. 191–196, 2013.

ZHAO, Z., et al. Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars. **Construction and Building Materials**, v. 81, p. 179–186, 2015.

ZHU, W., et al. Nanoindentation mapping of mechanical properties of cement paste and natural rocks. **Materials Characterization**, v. 58, p. 1189–1198, 2007.

ZORDAN, S. E. **A utilização de entulho como agregado, na confecção do concreto**. 1997. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) -- Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, SP, 1997.

ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. Metodologia de avaliação do potencial de reciclagem de resíduos. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**, São Paulo, 2004.

## APÊNDICE A

### Resultado Granulometria à Laser

Dimensão ( $\mu\text{m}$ )	Cimento		FB		CCA	
	Retida	Passante	Retida	Passante	Retida	Passante
209,3	-	-	-	-	-	-
176	-	-	0,38	100	-	-
148	0,21	100	0,66	99,62	-	-
124,4	0,54	99,79	1,19	98,96	-	-
104,6	0,85	99,25	2,17	97,77	-	-
87,99	1,35	98,4	3,92	95,6	-	-
73,99	2,14	97,05	6,88	91,68	0,18	100
62,22	3,3	94,91	10,75	84,8	0,67	99,82
52,32	4,9	91,61	13,65	74,05	1,17	99,15
44	6,87	86,71	13,58	60,4	1,84	97,98
37	8,86	79,84	11,02	46,82	2,65	96,14
31,11	10,36	70,98	8,12	35,8	3,56	93,49
26,16	10,79	60,62	6,17	27,68	4,54	89,93
22	10,18	49,83	5,08	21,51	5,44	85,39
18,5	8,71	39,65	4,34	16,43	6,08	79,95
15,55	7,08	30,94	3,55	12,09	6,29	73,87
13,08	5,7	23,86	2,67	8,54	6,17	67,58
11	4,64	18,16	1,87	5,87	6,07	61,41
9,25	3,77	13,52	1,29	4	6,25	55,34
7,78	2,96	9,75	0,93	2,71	6,73	49,09
6,54	2,19	6,79	0,69	1,78	7,27	42,36
5,5	1,52	4,6	0,52	1,09	7,38	35,09
4,62	1,04	3,08	0,4	0,57	7,34	27,71
3,89	0,73	2,04	0,17	0,17	6,67	20,37
3,27	0,54	1,31	0	0	5,53	13,7
2,75	0,42	0,77	-	-	3,99	8,17
2,312	0,35	0,35	-	-	2,41	4,18
1,944	0	0	-	-	1,23	1,77
1,635	-	-	-	-	0,54	0,54
1,375	-	-	-	-	0	0
1,156	-	-	-	-	-	-

## APÊNDICE B

### Massa Específica

	Valor	Média	DesvPad	Var %	CV (%)
Ref	2181,5	2182,7	20,00	0,06	0,92
	2163,4			0,89	
	2203,3			-0,93	
FB 5%	2163,0	2184,7	18,83	1,00	0,86
	2196,7			-0,55	
	2194,3			-0,44	
FB 10%	2182,2	2185,3	9,49	0,14	0,43
	2177,7			0,35	
	2196,0			-0,48	
FB 15%	2180,7	2194,7	12,40	0,64	0,56
	2199,1			-0,20	
	2204,3			-0,44	
CCA 5%	2198,2	2204,4	5,96	0,28	0,27
	2210,1			-0,26	
	2205,0			-0,03	
CCA 7,5%	2197,8	2202,0	10,44	0,19	0,47
	2194,4			0,35	
	2213,9			-0,54	
CCA 10%	2236,8	2225,8	12,53	-0,49	0,56
	2212,1			0,62	
	2228,4			-0,12	

**Módulo de Elasticidade Dinâmico**

	Valor	Média	DesvPad	Var %	CV (%)
Ref	27,27	27,7	0,56	1,63	2,01
	27,53			0,66	
	28,34			-2,21	
FB 5%	28,45	27,9	0,53	-1,78	1,89
	27,98			-0,15	
	27,39			2,00	
FB 10%	27,78	27,8	0,84	0,20	3,00
	27,03			2,98	
	28,69			-3,00	
FB 15%	26,99	27,9	0,78	3,34	2,80
	28,37			-1,67	
	28,33			-1,52	
CCA 5%	25,39	27,4	1,76	7,99	6,40
	28,44			-3,59	
	28,42			-3,55	
CCA 7,5%	27,2	27,9	1,39	2,66	4,98
	29,5			-5,43	
	27,0			3,26	
CCA 10%	28,34	28,2	0,52	-0,34	1,85
	27,68			2,04	
	28,71			-1,63	

**Resistência à Compressão**

	Valor	Média	DesvPad	Var %	CV (%)
Ref	19,13	21,8	3,66	14,07	16,77
	25,98			-16,03	
	20,34			7,25	
MFB 5%	18,36	22,2	3,32	20,90	14,97
	24,09			-7,86	
	24,14			-8,05	
MFB 10%	26,60	23,0	3,14	-13,48	13,66
	20,74			10,97	
	21,70			6,04	
MFB 15%	27,67	27,3	1,35	-1,48	4,96
	28,36			-3,88	
	25,75			5,86	
CCA 5%	31,74	32,3	0,51	1,79	1,59
	32,45			-0,44	
	32,73			-1,30	
CCA 7,5%	35,37	34,9	3,51	-1,35	10,07
	31,17			11,96	
	38,15			-8,53	
CCA 10%	34,18	35,2	4,36	3,01	12,38
	39,99			-11,95	
	31,46			11,93	

**Resistência à Tração por Compressão Diametral**

	Valor	Média	DesvPad	Var %	CV (%)
Ref	2,41	2,2	0,63	-8,39	28,62
	1,50			47,22	
	2,71			-18,64	
MFB 5%	2,41	2,7	0,27	10,30	10,02
	2,63			1,26	
	2,94			-9,57	
MFB 10%	3,15	2,7	0,41	-14,84	15,28
	2,51			6,73	
	2,38			12,51	
MFB 15%	3,41	2,6	0,71	-22,64	26,80
	2,02			30,46	
	2,48			6,29	
CCA 5%	3,29	2,7	0,68	-17,61	25,13
	2,89			-5,95	
	1,96			38,30	
CCA 7,5%	2,42	3,2	0,71	33,52	22,04
	3,75			-13,91	
	3,52			-8,22	
CCA 10%	2,39	3,4	0,92	41,28	27,09
	3,55			-4,71	
	4,20			-19,53	

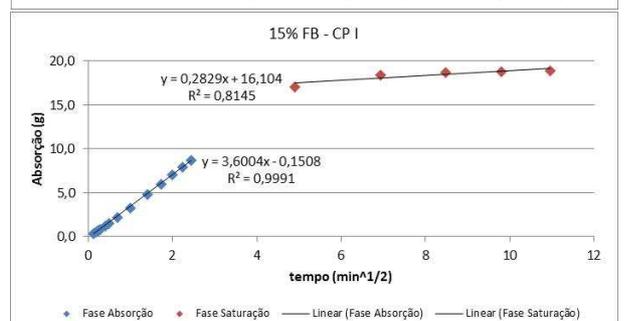
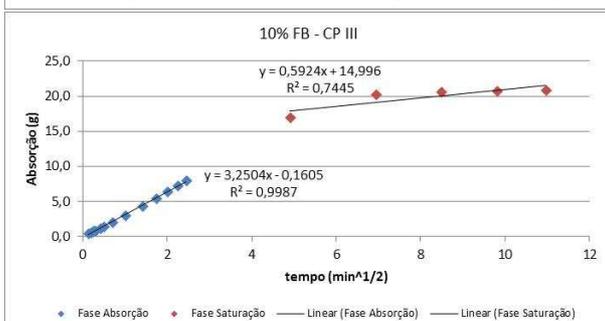
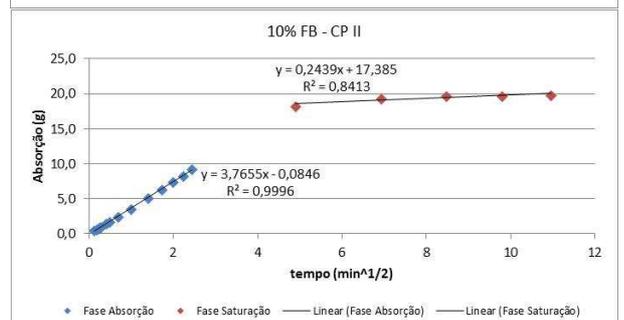
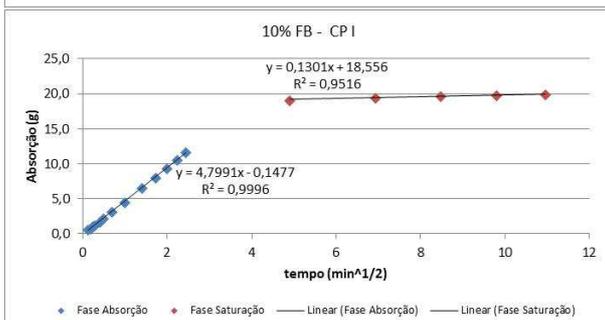
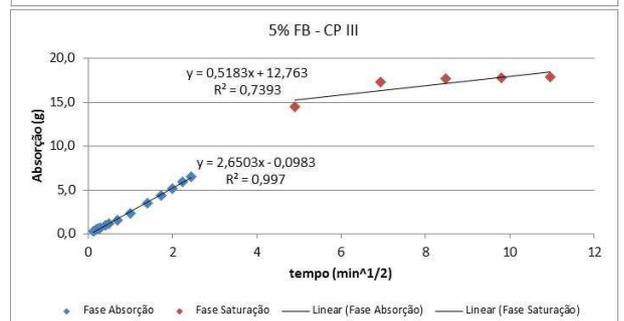
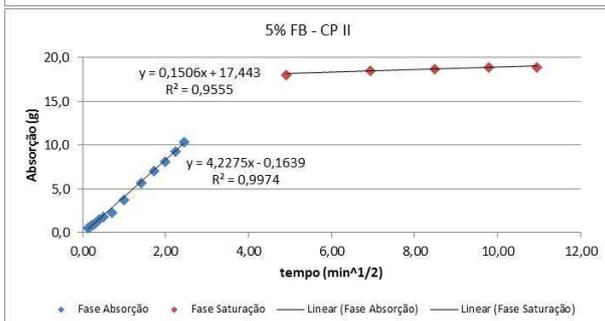
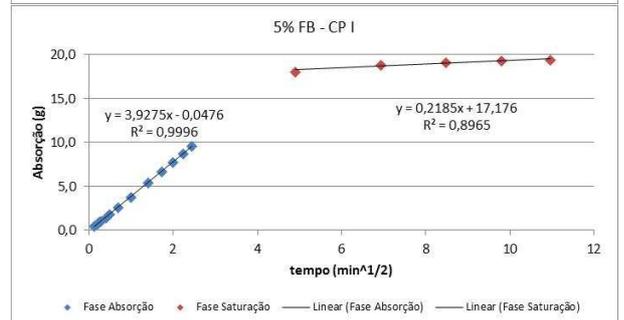
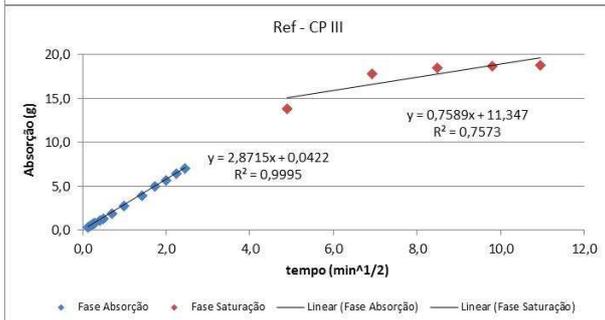
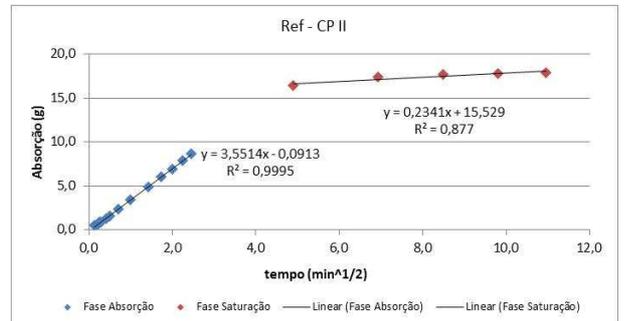
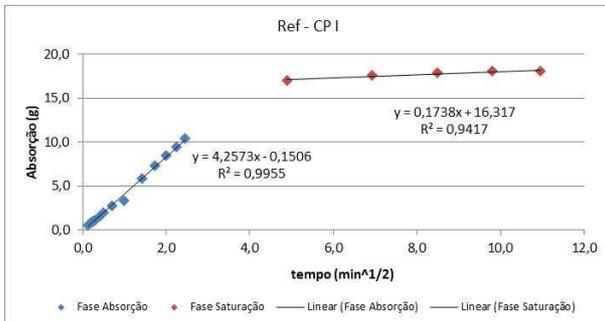
### Resultados da Absorção por Capilaridade

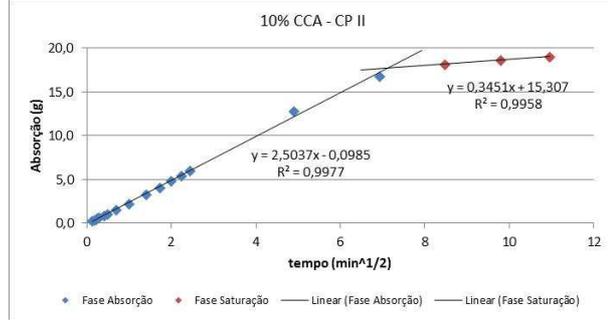
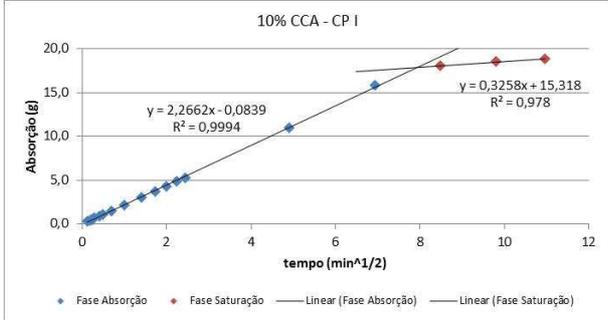
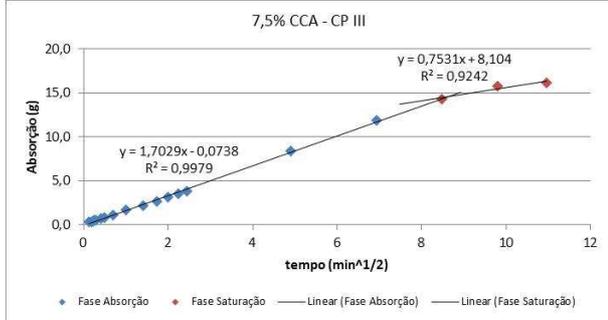
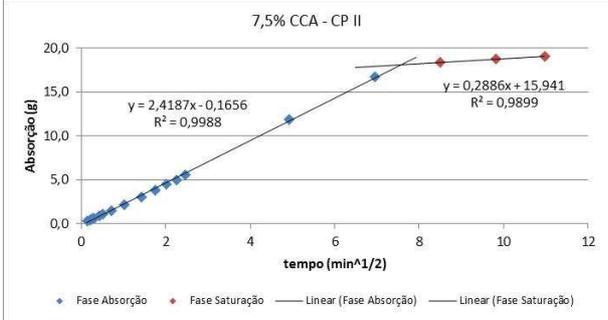
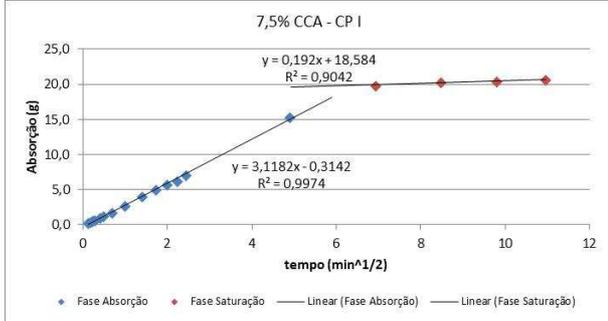
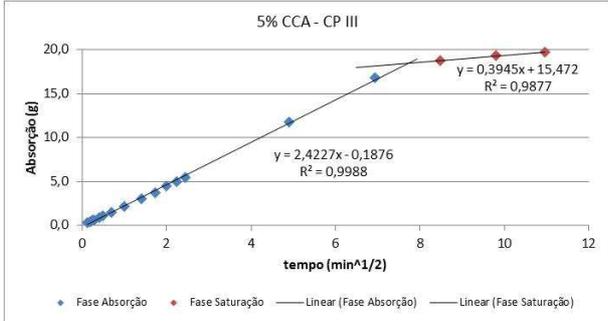
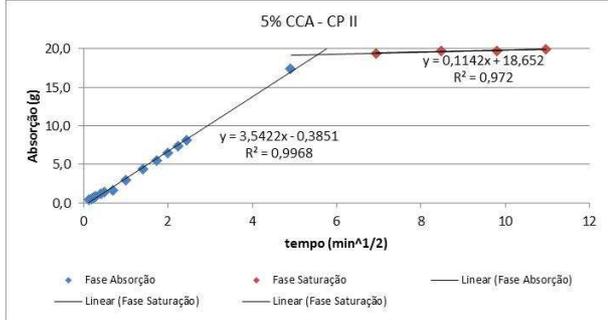
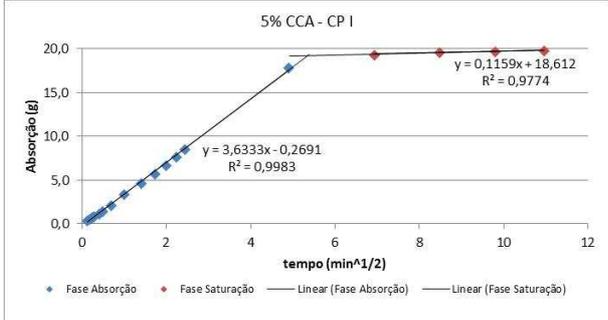
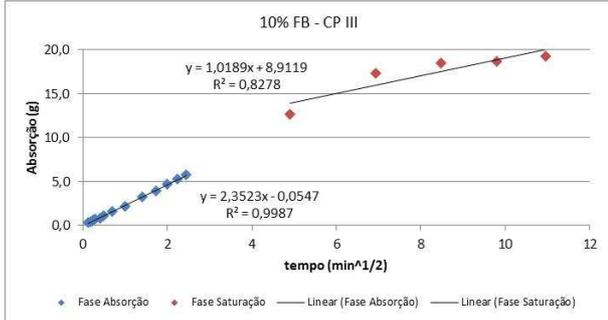
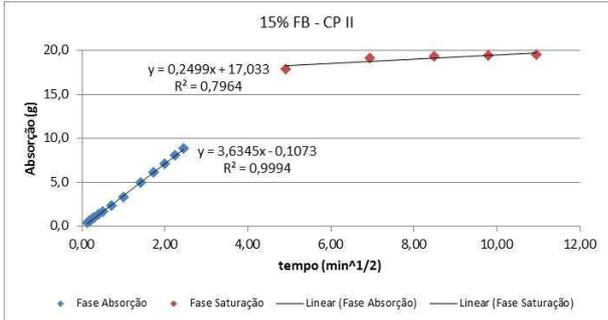
	Referência			5% FB			10% FB			15% FB		
	CP I	CP II	CP III	CP I	CP II	CP III	CP I	CP II	CP III	CP I	CP II	CP III
Altura média (cm)	4,99	5,01	5,28	5,07	5,08	5,12	5,13	5,24	5,24	5,22	5,20	5,16
Área média (cm <sup>2</sup> )	19,28	19,24	19,30	19,76	19,42	19,56	19,50	19,88	19,86	19,97	19,47	19,98
Volume (cm <sup>3</sup> )	96,25	96,44	101,86	100,26	98,54	100,20	99,95	104,07	103,98	104,30	101,29	103,01
Tempo (min)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0 (seco)	194,88	196,42	203,62	203,86	197,26	201,17	199,16	206,90	204,31	206,45	203,98	204,24
1	195,44	196,90	204,06	204,42	197,83	201,53	199,75	207,40	204,72	206,91	204,44	204,59
2	195,65	197,03	204,24	204,59	198,01	201,68	199,96	207,55	204,86	207,04	204,59	204,65
3	195,79	197,15	204,35	204,72	198,17	201,76	200,12	207,69	204,94	207,16	204,73	204,76
4	195,91	197,29	204,39	204,83	198,26	201,81	200,30	207,81	205,02	207,27	204,85	204,84
5	196,02	197,35	204,56	204,97	198,39	201,90	200,41	207,92	205,09	207,36	204,95	204,91
10	196,49	197,74	204,82	205,38	198,82	202,12	200,92	208,34	205,44	207,73	205,33	205,03
15	196,83	197,99	205,06	205,76	199,14	202,31	201,36	208,63	205,68	207,99	205,64	205,33
30	197,63	198,79	205,60	206,48	199,60	202,77	202,31	209,42	206,32	208,71	206,36	205,80
60	198,19	199,81	206,48	207,65	201,11	203,52	203,69	210,49	207,24	209,75	207,35	206,45
120	200,76	201,33	207,66	209,33	203,03	204,68	205,74	212,08	208,65	211,35	208,96	207,44
180	202,17	202,49	208,67	210,58	204,40	205,58	207,26	213,28	209,72	212,50	210,13	208,18
240	203,32	203,37	209,34	211,65	205,49	206,37	208,60	214,34	210,69	213,53	211,15	208,90
300	204,30	204,28	210,12	212,60	206,64	207,10	209,81	215,25	211,46	214,40	212,03	209,50
360	205,31	205,13	210,77	213,55	207,65	207,73	210,87	216,16	212,24	215,20	212,88	210,04
1440	211,94	212,87	217,54	221,91	215,36	215,65	218,28	225,20	221,28	223,58	221,90	216,91
2880	212,50	213,79	221,50	222,76	215,82	218,46	218,68	226,27	224,48	224,92	223,13	221,58
4320	212,76	214,14	222,16	223,02	216,05	218,86	218,90	226,57	224,91	225,19	223,34	222,70
5760	212,93	214,23	222,35	223,19	216,20	218,93	218,98	226,65	225,02	225,30	223,45	222,90
7200	212,99	214,33	222,45	223,27	216,27	219,05	219,08	226,75	225,17	225,40	223,51	223,51

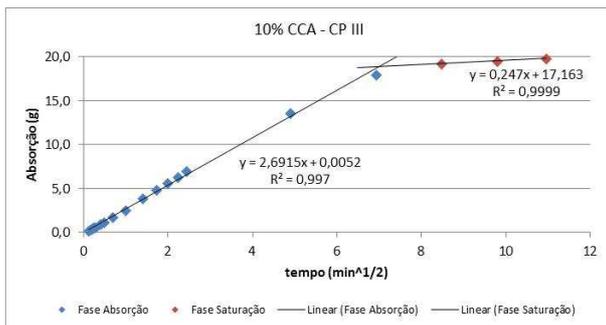
### Resultados da Absorção por Capilaridade

	5% CCA			7,5% CCA			10% CCA		
	CP I	CP II	CP III	CP I	CP II	CP III	CP I	CP II	CP III
Altura média (cm)	5,12	5,23	5,34	5,33	5,21	5,29	5,21	5,10	5,14
Área média (cm <sup>2</sup> )	19,40	19,46	19,34	19,41	19,42	19,86	19,49	19,80	19,64
Volume (cm <sup>3</sup> )	99,30	101,87	103,30	103,46	101,27	105,14	101,59	100,94	100,90
Tempo (min)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0 (seco)	204,23	207,80	213,53	214,49	209,21	210,99	203,72	204,04	209,13
1	204,65	208,17	213,83	214,82	209,53	211,27	204,03	204,37	209,39
2	204,81	208,31	213,93	214,91	209,65	211,35	204,14	204,48	209,53
3	204,93	208,41	214,01	214,98	209,71	211,42	204,24	204,55	209,60
4	205,04	208,51	214,10	215,08	209,78	211,46	204,28	204,64	209,70
5	205,13	208,63	214,15	215,18	209,85	211,48	204,40	204,71	209,79
10	205,44	208,94	214,41	215,48	210,09	211,69	204,62	204,91	210,09
15	205,72	209,20	214,61	215,72	210,30	211,81	204,78	205,13	210,34
30	206,36	209,40	214,98	216,28	210,72	212,12	205,20	205,60	210,92
60	207,63	210,81	215,72	217,25	211,42	212,64	205,87	206,34	211,73
120	208,88	212,20	216,59	218,48	212,24	213,20	206,76	207,34	213,03
180	209,98	213,29	217,30	219,46	213,02	213,66	207,44	208,17	213,98
240	210,97	214,32	218,05	220,25	213,67	214,13	208,04	208,91	214,77
300	211,90	215,19	218,55	220,70	214,24	214,49	208,57	209,50	215,50
360	212,80	215,92	219,04	221,63	214,78	214,84	209,04	210,10	216,12
1440	222,13	225,20	225,31	229,88	221,12	219,39	214,69	216,92	222,80
2880	223,62	227,22	230,33	234,31	225,92	222,89	219,54	220,88	227,12
4320	223,87	227,47	232,32	234,85	227,58	225,34	221,77	222,26	228,39
5760	223,97	227,55	232,93	234,97	228,02	226,78	222,30	222,76	228,71
7200	224,10	227,70	233,29	235,11	228,29	227,18	222,57	223,11	229,00

## Gráficos Absorção por Capilaridade

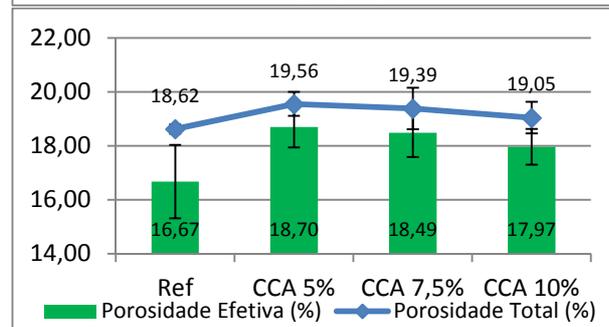
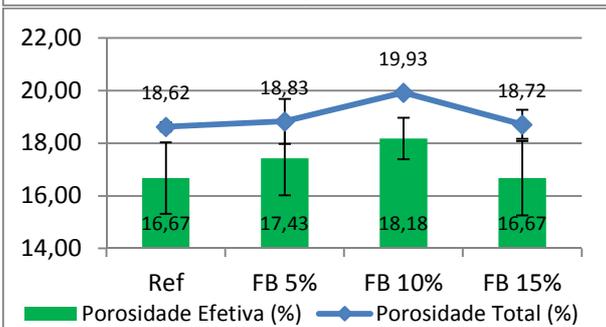
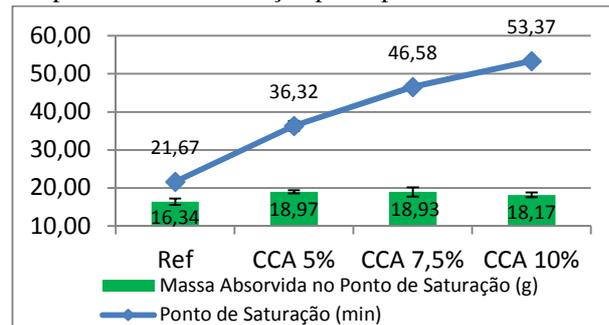
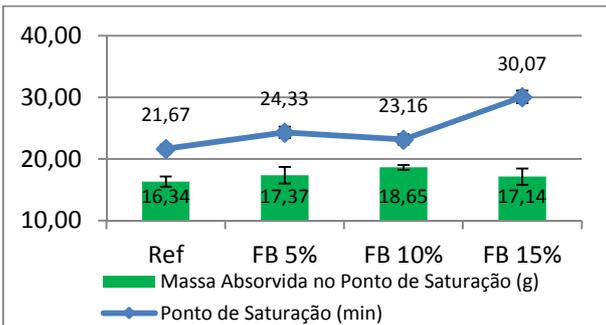






Obs.: Em função do alto coeficiente de variação, o exemplar III do traço 7,5% CCA, foi excluído das análises.

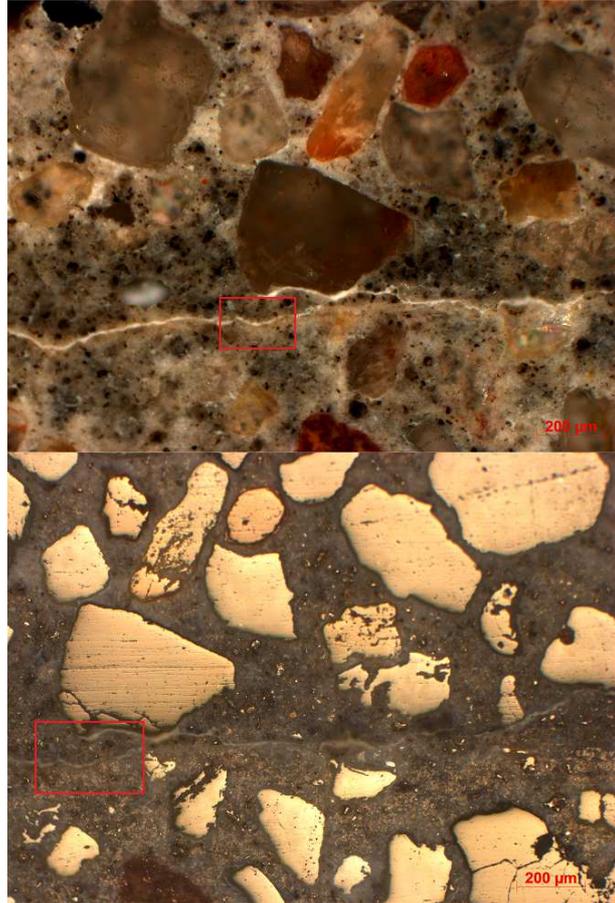
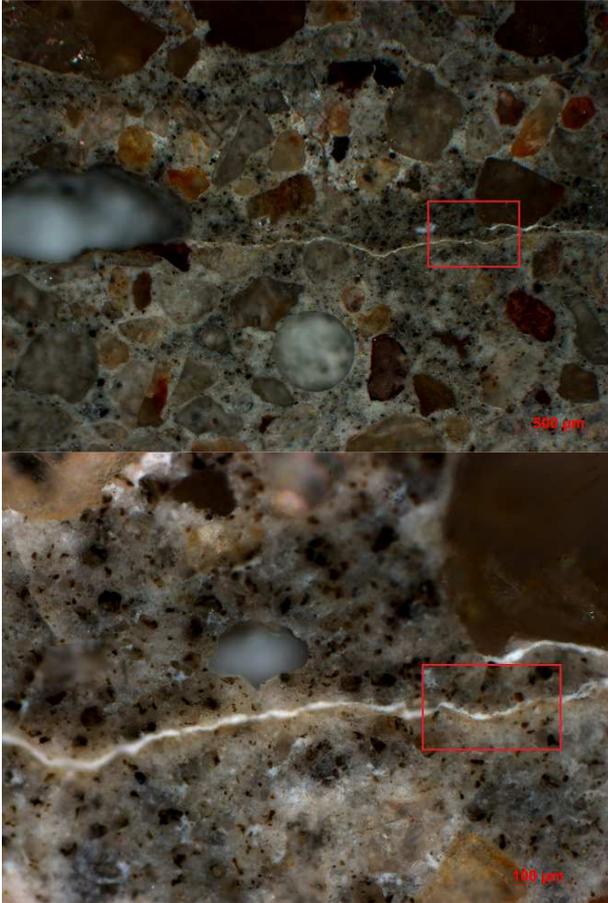
Análises através das médias dos resultados obtidos pelo ensaio de absorção por capilaridade



# APÊNDICE C

## Microscopias

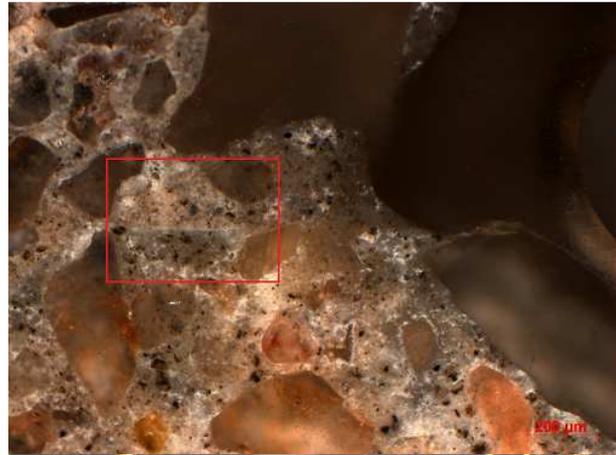
### Referência



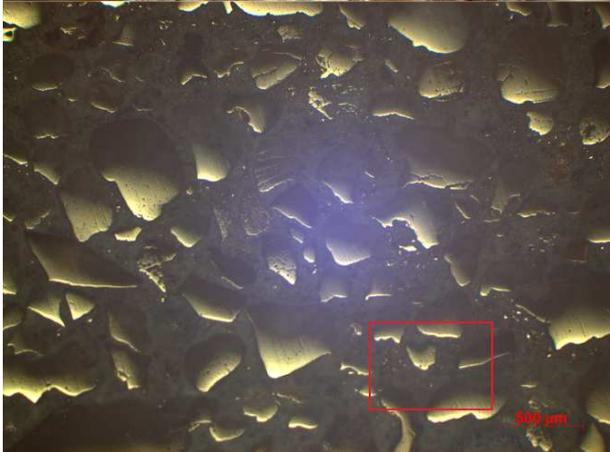
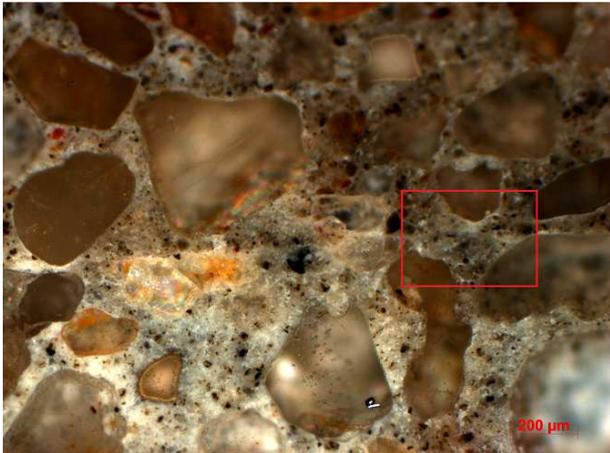
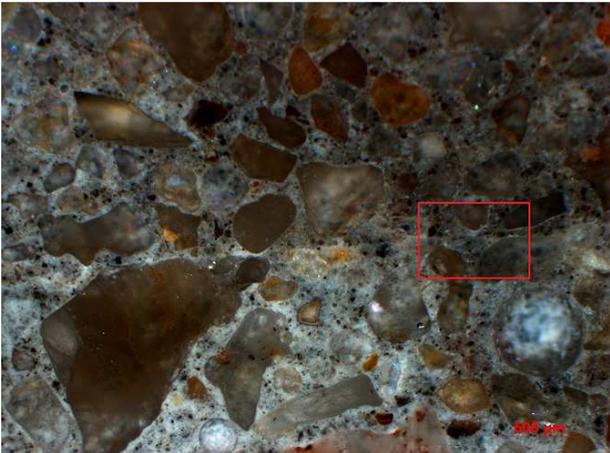
5% FB



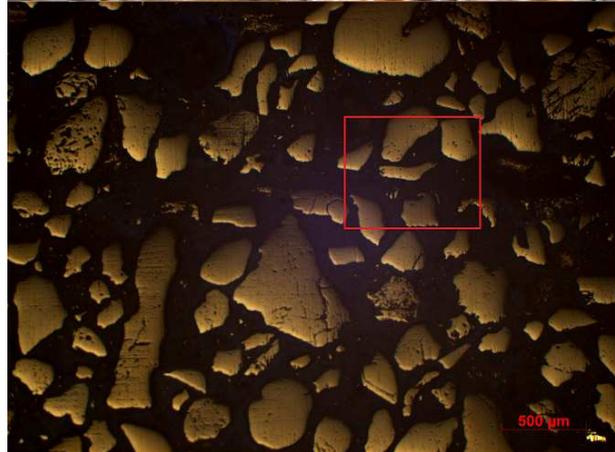
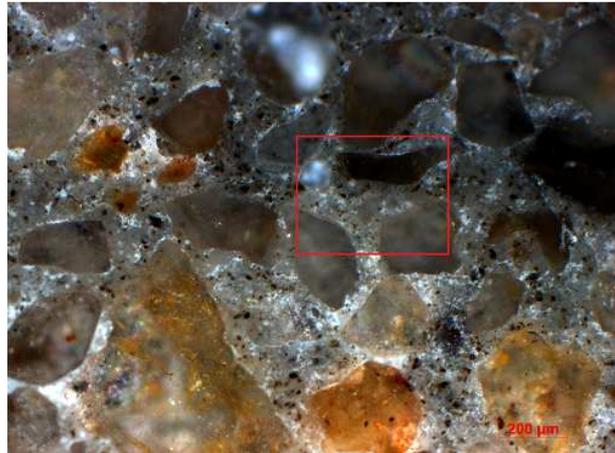
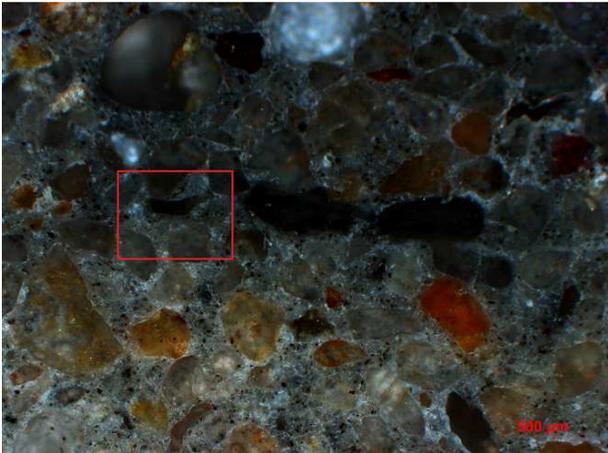
10% FB



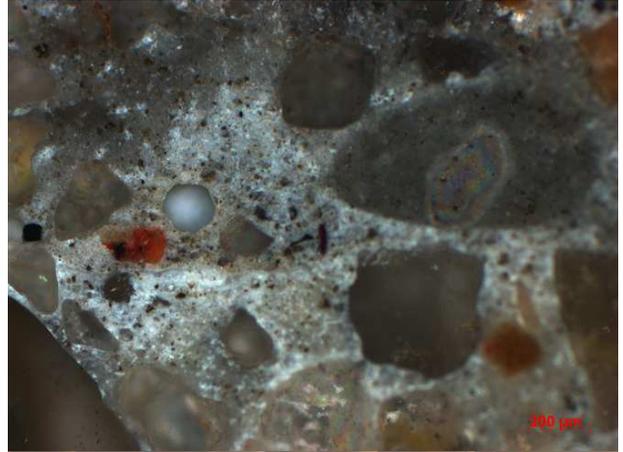
15% FB



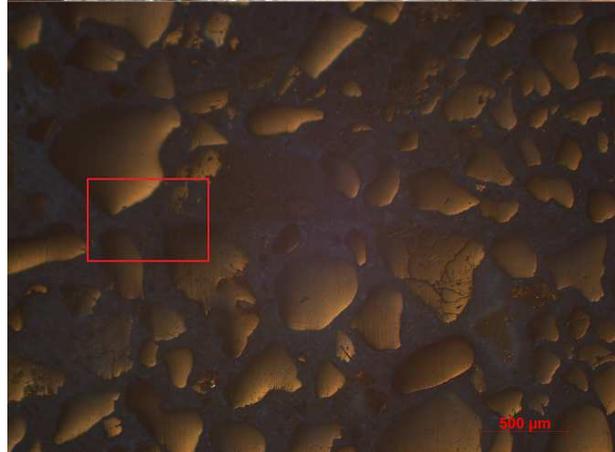
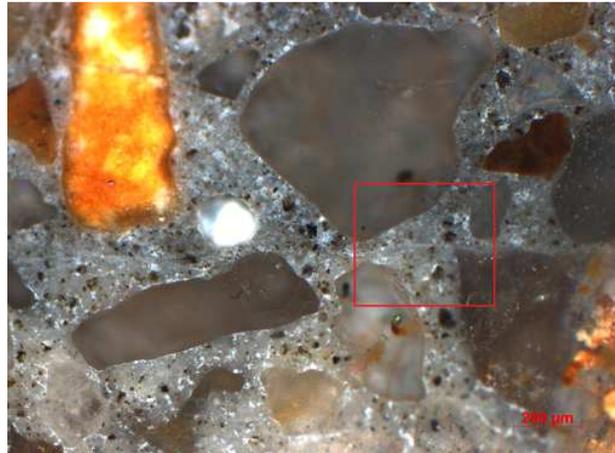
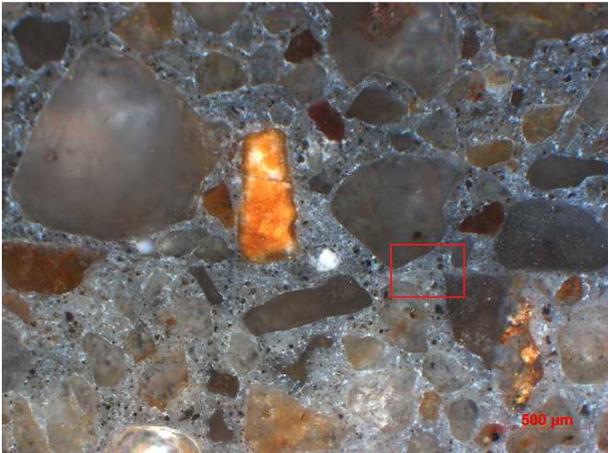
5% CCA



7,5% CCA



10% CCA



## APÊNDICE D

### Resultados Nanoindentação

Referência							
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Linha 1	22,65	32,74	31,95	17,90	14,59	11,27	16,02
Linha 2	14,89	25,31	27,05	7,17	11,52	21,18	36,38
Linha 3	7,88	5,26	19,39	6,44	13,93	84,36	5,59
				20,26			
				17,57			
				80,24			
				87,55			
5% FB							
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Linha 1	14,53	36,61	21,07	18,01	20,79	5,84	5,31
Linha 2	27,96	44,86	14,97	21,93	62,01	19,78	21,49
Linha 3	25,81	20,80	12,83	5,30	16,01	4,15	4,21
				20,83			
				16,77			
				17,60			
				14,31			
10% FB							
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Linha 1	23,65	80,04	12,92	91,10	13,95	94,27	94,65
Linha 2	16,27	7,56	22,39	11,03	18,55	43,25	81,19
Linha 3	86,04	50,36	7,83	11,73	10,39	66,76	57,47
				16,64			
				18,10			
				29,58			
				19,61			
15% FB							
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Linha 1	95,60	78,61	75,30	64,66	13,96	22,27	11,25
Linha 2	15,09	56,94	57,59	87,45	64,85	27,31	22,48
Linha 3	24,12	24,31	26,34	51,98	38,92	26,69	24,18
				24,67			
				78,36			
				15,09			
				11,71			

5% CCA							
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Linha 1	7,88	5,26	22,32	6,44	24,15	84,36	5,59
Linha 2	30,87	37,89	19,68	80,67	59,68	76,59	99,71
Linha 3	101,46	43,67	19,67	19,91	19,73	43,05	97,13
				23,66			
				29,58			
				29,85			
				21,33			
7,5% CCA							
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Linha 1	53,29	23,76	94,86	21,38	19,17	16,41	19,64
Linha 2	62,33	42,32	31,77	14,74	87,08	16,39	18,19
Linha 3	29,01	97,82	29,42	106,12	14,69	101,99	108,57
				21,71			
				18,44			
				19,41			
				13,79			
10% CCA							
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Linha 1	8,24	109,07	94,86	90,63	87,08	129,31	120,07
Linha 2	72,13	36,51	31,77	21,38	14,69	27,04	25,42
Linha 3	85,60	49,93	29,42	23,55	31,44	107,23	100,46
				21,71			
				31,44			
				27,41			
				22,07			