



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, n 83 CEP 05508-900 São Paulo SP
tel.: 55-(0)11- 3091-5359 / 5442 fax: 55-(0)11-3091-5544 www.poli.usp.br

Departamento de Engenharia de Construção Civil

Relatório Final

Natureza do trabalho: Estudo da influência do *MetacaulimHP* como adição de alta eficiência em concretos de cimento Portland.
Interessado: METACULIM do Brasil Indústria e Comércio Ltda.
Eng. Marco Rabello
Relatório Final: Resultados obtidos até Dezembro de 2003

Sumário

1	INTRODUÇÃO	7
2	PROGRAMA DO EXPERIMENTO	8
2.1	Variáveis Independentes	8
2.2	Variáveis Dependentes	9
3	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	10
3.1	Caracterização tecnológica do MetacaulimHP	10
3.1.1	Análise Química	10
3.1.2	Análise de Tamanho de Partículas	10
3.1.3	Análise da área de superfície específica pelo método BET	11
3.1.4	Análise por Difractometria de Raios-x	11
3.1.5	Determinação de atividade pozolânica - método de Chapelle modificado	12
3.1.6	Determinação da inibição da reação álcali-agregado	12
3.1.7	Determinação da resistência ao ataque por sulfatos	13
3.2	Cimento	14
3.3	Concretos estudados	15
3.4	Resistência à Compressão	16
3.5	Resistência à Tração por Compressão Diametral	17
3.6	Módulo de Elasticidade	20
3.7	Resistência à Penetração de Íons Cloreto	23
3.8	Absorção de Água por Imersão e Índice de Vazios	24
3.9	Permeabilidade a Água sob Pressão	25
3.10	Resistividade Elétrica	26
3.11	Retração por secagem	27
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS	29
4.1	Diagramas de dosagem	29
4.2	Resistência à compressão	31
4.3	Resistência à tração por compressão diametral	34
4.4	Módulo de elasticidade	35
4.5	Resistência à penetração de íons cloreto	36
4.6	Absorção de água por imersão e índice de vazios	38



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, n 83 CEP 05508-900 São Paulo SP
tel.: 55-(0)11- 3091-5359 / 5442 fax: 55-(0)11-3091-5544 www.polit.usp.br

Departamento de Engenharia de Construção Civil

Relatório Final

4.7	Permeabilidade de água sob pressão	40
4.8	Resistividade elétrica	41
4.9	Retração por secagem	42
4.10	Inibição da reação álcali-agregado	44
4.11	Resistência ao ataque por sulfatos	45
5	OUTROS ESTUDOS	47
5.1	CONCRETO PROJETADO POR VIA SECA (CPVS)	47
5.1.1	Objetivo	47
5.1.2	Introdução	47
5.1.3	Metodologia	47
5.1.4	Resultados	50
5.1.5	Análise dos resultados	51
5.1.5.1	Consistência e reflexão	51
5.1.5.2	Resistência inicial	52
5.1.5.3	Resistência à compressão	53
5.1.5.4	Avaliação da dosagem	54
5.1.5.5	Índices de compacidade	56
5.1.6	Conclusões	57
5.2	REATIVIDADE ALCALI-AGREGADOS	58
5.2.1	Procedimento de ensaio	58
5.2.2	Material utilizado	58
5.2.3	Apresentação dos resultados	59
5.2.4	Conclusões	60
5.3	MÓDULO DE ELASTICIDADE	60
5.3.1	Programação do experimento	61
5.3.2	Resultados e discussão	61
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	63



Lista de Tabelas

<i>Tabela 2.1 - Variáveis dependentes do estudo.</i>	<i>9</i>
<i>Tabela 3.1 - Resultados em % de óxidos, base calcinada, normalizados a 100%.</i>	<i>10</i>
<i>Tabela 3.2 - Análise de tamanho de partículas.</i>	<i>11</i>
<i>Tabela 3.3 - Análise da área superficial específica pelo método BET.</i>	<i>11</i>
<i>Tabela 3.4 - Análise por difratometria de raios-x.</i>	<i>12</i>
<i>Tabela 3.5 - Resultado de atividade pozolânica.</i>	<i>12</i>
<i>Tabela 3.6 - Composição granulométrica do agregado reativo (vidro pyrex) empregado no ensaio de inibição da reação álcali-agregado.</i>	<i>13</i>
<i>Tabela 3.7 - Composição dos materiais empregados para os estudo quanto a reação álcali-agregado.</i>	<i>13</i>
<i>Tabela 3.8 - Resultado de variação dimensional de corpos-de-prova confeccionados com o agregado reativo vidro Pyrex.</i>	<i>13</i>
<i>Tabela 3.9 - Resultado de variação dimensional de corpos-de-prova submetidos ao ensaio de resistência ao ataque por sulfatos.</i>	<i>14</i>
<i>Tabela 3.10 - Características físicas do cimento utilizado no estudo.</i>	<i>14</i>
<i>Tabela 3.11 - Resistência à compressão do cimento utilizado no estudo.</i>	<i>15</i>
<i>Tabela 3.12 - Síntese dos traços estudados para concretos com “slump” de 80 mm e substituição de 8% de cimento por MetacaulimHP.</i>	<i>15</i>
<i>Tabela 3.13 - Síntese dos traços estudados para concretos com “slump” de 80 mm e substituição de 10% de cimento por MetacaulimHP.</i>	<i>16</i>
<i>Tabela 3.14 - Resistência à compressão relativa a 1, 7, 28, 63, 91 e 182 dias de cura úmida, para “slump” de 80 mm.</i>	<i>17</i>
<i>Tabela 3.15 - Resistência à tração por compressão diametral relativa a 7 e 28 dias de cura úmida, para “slump” de 80 mm.</i>	<i>19</i>
<i>Tabela 3.16 - Resistência à tração por compressão diametral relativa a 63, 91 e 182 dias de cura úmida, para “slump” de 80 mm.</i>	<i>19</i>
<i>Tabela 3.17 - Módulo de elasticidade tangente inicial relativo a 7 e 28 dias de cura úmida, para “slump” de 80 mm.</i>	<i>22</i>
<i>Tabela 3.18 - Módulo de elasticidade tangente inicial relativo a 91 e 182 dias de cura úmida, para “slump” de 80 mm.</i>	<i>22</i>
<i>Tabela 3.19 - Resistência à penetração de cloretos relativa a 28, 63 e 91 dias de cura úmida, para “slump” de 80 mm.</i>	<i>24</i>
<i>Tabela 3.20 - Absorção de água e índice de vazios a 28, 63 e 91 dias de cura úmida, para concretos com “slump” de 80 mm.</i>	<i>25</i>
<i>Tabela 3.21 - Permeabilidade a água sob pressão a 28 dias de cura úmida, para concretos com “slump” de 80 mm.</i>	<i>26</i>
<i>Tabela 3.22 - Resistividade elétrica para concretos com “slump” de 80 mm.</i>	<i>27</i>
<i>Tabela 3.23 - Retração por secagem dos concretos após a cura úmida por 28 dias.</i>	<i>28</i>
<i>Tabela 4.1 - Resistência à compressão, aos 28 dias de cura úmida, para uma mesma relação água/aglomerantes (relativo aos concretos com 8% de adição).</i>	<i>31</i>
<i>Tabela 4.2 - Resistência à compressão, aos 28 dias de cura úmida, para uma mesma relação água/aglomerantes (relativo aos concretos com 10% de adição).</i>	<i>31</i>



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, n 83 CEP 05508-900 São Paulo SP
tel.: 55-(0)11- 3091-5359 / 5442 fax: 55-(0)11-3091-5544 www.poli.usp.br

Departamento de Engenharia de Construção Civil

Relatório Final

<i>Tabela 4.3 - Resistência à compressão, aos 28 dias de cura úmida, para um mesmo consumo de cimento (relativo aos concretos com 8% de adição).</i>	34
<i>Tabela 4.4 - Resistência à compressão, aos 28 dias de cura úmida, para um mesmo consumo de cimento (relativo aos concretos com 10% de adição).</i>	34
<i>Tabela 5.1 - Materiais utilizados no estudo.</i>	48
<i>Tabela 5.2 - Traços utilizados para as moldagens de placas.</i>	48
<i>Tabela 5.3 - Resultados obtidos para a consistência (NBR 14278) e reflexão do concreto projetado medida em placas (NBR 13354).</i>	50
<i>Tabela 5.4 - Resultados obtidos para a evolução de resistência inicial.</i>	50
<i>Tabela 5.5 - Resultados obtidos para a resistência à compressão (NBR 5739) do concreto projetado via seca a partir de testemunhos cilíndricos extraídos das placas (NBR 7680).</i>	51
<i>Tabela 5.6 - Resultados obtidos para massa específica, absorção por imersão e fervura e volume de vazios permeáveis (ASTM C642), aos 35 dias de idade.</i>	51
<i>Tabela 5.7 - Resultados utilizados para a dosagem do concreto projetado via seca.</i>	55
<i>Tabela 5.8 - Resultados obtidos na regressão pelo método dos mínimos quadrados para a dosagem dos CPVS com os diversos teores de Metacaulim.</i>	55
<i>Tabela 5.9 Consumos de cimento obtidos.</i>	56
<i>Tabela 5.10 - Materiais empregados e sua respectiva procedência.</i>	58
<i>Tabela 5.11 - Resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade medido no ensaio e estimado de acordo os valores de resistência à compressão do concreto.</i>	62
<i>Tabela 6.1 - Propriedades dos concretos para um mesmo f_{c28d} (8% de adição).</i>	63
<i>Tabela 6.2 - Propriedades dos concretos para um mesmo f_{c28d} (10% de adição).</i>	64



Lista de Figuras

<i>Figura 1-1 – Ilustração da abrangência do estudo desenvolvido.</i>	<i>7</i>
<i>Figura 3-1 - Distribuição granulométrica das partículas do MetacaulimHP.</i>	<i>11</i>
<i>Figura 3-2 – Comparação ilustrativa da diferença de densidade do cimento, com relação ao MetacaulimHP e da sílica ativa (amostras de 150 g de material seco do MetacaulimHP, sílica ativa e cimento CP V – ARI PLUS RS, respectivamente).</i>	<i>16</i>
<i>Figura 3-3 - Esquema simplificado do ensaio de tração por compressão diametral.</i>	<i>18</i>
<i>Figura 3-4 – Plano de carregamento Tipo 1 da NBR 8522, usado no ensaio de determinação do módulo de elasticidade.</i>	<i>21</i>
<i>Figura 3-5 – Ilustração do ensaio de permeabilidade a água sob pressão realizado nas instalações do IPT.</i>	<i>26</i>
<i>Figura 4-1 – Diagrama de dosagem dos concretos estudados para teores de adição de 8% e 10% (cura de 7 dias).</i>	<i>29</i>
<i>Figura 4-2 - Diagrama de dosagem dos concretos estudados para teores de adição de 8% e 10% (cura de 28 dias).</i>	<i>30</i>
<i>Figura 4-3 - Diagrama de dosagem dos concretos estudados para teores de adição de 8% e 10% (cura de 91 dias).</i>	<i>30</i>
<i>Figura 4-4 – Variação da resistência à compressão, aos 28 dias de cura úmida, com relação ao consumo de cimento dos concretos com 8% de adição.</i>	<i>32</i>
<i>Figura 4-5 - Variação da resistência à compressão, aos 28 dias de cura úmida, com relação ao consumo de cimento dos concretos com 10% de adição.</i>	<i>32</i>
<i>Figura 4-6 - Consumo de cimento da família de concretos com 8% de adição, para resistências à compressão fixadas.</i>	<i>33</i>
<i>Figura 4-7 – Consumo de cimento da família de concretos com 10% de adição, para resistências à compressão fixadas.</i>	<i>33</i>
<i>Figura 4-8 – Variação da resistência à tração por compressão diametral, aos 28 dias de cura úmida, com relação ao consumo de cimento dos concretos com 8% de adição.</i>	<i>35</i>
<i>Figura 4-9 - Variação da resistência à tração por compressão diametral, aos 28 dias de cura úmida, com relação ao consumo de cimento dos concretos com 10% de adição.</i>	<i>35</i>
<i>Figura 4-10 – Variação do módulo de elasticidade, aos 28 dias de cura úmida, com relação ao consumo de cimento dos concretos com 8% de adição.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 4-11 - Variação do módulo de elasticidade, aos 28 dias de cura úmida, com relação ao consumo de cimento dos concretos com 10% de adição.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 4-12 – Resistência à penetração de cloretos à 28 dias de cura úmida, para 8% e 10% de adição.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 4-13 - Variação da carga passante, aos 28 dias de cura úmida, com relação ao consumo de cimento dos concretos com 8% de adição.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 4-14 - Variação da carga passante, aos 28 dias de cura úmida, com relação ao consumo de cimento dos concretos com 10% de adição.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 4-15 – Variação da absorção de água por imersão, aos 28 dias de cura úmida, com relação ao consumo de cimento dos concretos com 8% de adição.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 4-16 - Variação da absorção de água por imersão, aos 28 dias de cura úmida, com relação ao consumo de cimento dos concretos com 10% de adição.</i>	<i>39</i>
<i>Figura 4-17 - Variação do índice de vazios, aos 28 dias de cura úmida, com relação ao consumo de cimento dos concretos com 8% de adição.</i>	<i>39</i>
<i>Figura 4-18 - Variação do índice de vazios, aos 28 dias de cura úmida, com relação ao consumo de cimento dos concretos com 10% de adição.</i>	<i>40</i>



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, n 83 CEP 05508-900 São Paulo SP
tel.: 55-(0)11- 3091-5359 / 5442 fax: 55-(0)11-3091-5544 www.polit.usp.br

Departamento de Engenharia de Construção Civil

Relatório Final

<i>Figura 4-19 - Variação da permeabilidade a água sob pressão, aos 28 dias de cura úmida, com relação ao consumo de cimento dos concretos com 10% de adição.</i>	40
<i>Figura 4-20 - Variação da altura de penetração de água, aos 28 dias de cura úmida, com relação ao consumo de cimento dos concretos com 10% de adição.</i>	41
<i>Figura 4-21 - Variação da resistividade elétrica superficial, aos 28 dias de cura úmida, com relação ao consumo de cimento dos concretos com 8% de adição.</i>	41
<i>Figura 4-22 - Variação da resistividade elétrica superficial, aos 28 dias de cura úmida, com relação ao consumo de cimento dos concretos com 10% de adição.</i>	42
<i>Figura 4-23 – Retração por secagem dos concretos com 10% de adição.</i>	43
<i>Figura 4-24 - Variação da retração por secagem referente a 182 dias de estocagem em câmara seca, para corpos-de-prova com 28 dias de cura úmida, com relação ao consumo de cimento dos concretos com 10% de adição.</i>	43
<i>Figura 4-25 - Variação da retração por secagem com relação a resistência à compressão, para corpos-de-prova com 28 dias de cura úmida (10% de adição).</i>	44
<i>Figura 4-26 – Curva de variação dimensional dos corpos-de-prova ao longo do tempo (10% de adição).</i>	45
<i>Figura 4-27 – Variação dimensional com o tempo para os corpos-de-prova de argamassa submetidos ao ensaio de resistência ao ataque por sulfatos (10% de adição).</i>	46
<i>Figura 5-1 – Montagem utilizada para a moldagem das placas.</i>	48
<i>Figura 5-2 – Máquina de projeção via seca utilizada no procedimento experimental.</i>	49
<i>Figura 5-3 – Realização do ensaio com o penetrômetro de profundidade constante para determinação da evolução de resistência inicial.</i>	50
<i>Figura 5-4 – Correlação entre a reflexão relativa do CPVS medida em placas com o teor de metacaulim.</i>	52
<i>Figura 5-5 – Evolução da resistência inicial para as placas com consumo de aglomerantes de 300 Kg/m³.</i>	52
<i>Figura 5-6 - – Evolução da resistência inicial para as placas com consumo de aglomerantes de 400 Kg/m³.</i>	53
<i>Figura 5-7 – Evolução da resistência à compressão para os concretos com consumo de aglomerantes de 300 Kg/m³.</i>	54
<i>Figura 5-8 - Evolução da resistência à compressão para os concretos com consumo de aglomerantes de 400 Kg/m³.</i>	54
<i>Figura 5-9 – Gráfico de dosagem para os teores de metacaulim estudados (0%, 5% e 10%).</i>	55
<i>Figura 5-10 – Relação entre os índices de absorção por imersão e fervura e o teor de metacaulim utilizado no CPVS.</i>	57
<i>Figura 5-11 – Comparação da expansão ao longo do tempo para argamassa com cimento CII-F (referência), CII-F + 8% de Sílica ativa e CII-F + 8 % de MetacaulimHP.</i>	59
<i>Figura 5-12 - Comparação da expansão ao longo do tempo para argamassa com cimento CII-F (referência) e CII-F + diferentes teores de MetacaulimHP.</i>	60



1 INTRODUÇÃO

Atendendo à solicitação do Interessado, procedeu-se em princípios de 2002 ao início dos estudos de avaliação da influência do *MetacaulimHP* como adição de alta eficiência em concretos de cimento Portland. Inicialmente procedeu-se o estudo direcionando a atenção para uma faixa de resistência a compressão de 40 a 70 MPa. Com o sucesso e repercussão do estudo, ficou acordado o prosseguimento das atividades, desta vez voltando os esforços para concretos localizados em uma faixa de resistência mais alta (60 a 95 MPa).

A Figura 1-1 ilustra muito bem a abrangência do estudo, ilustrando as duas faixas de resistência à compressão aos 28 dias que foram varridas no trabalho aqui apresentado.

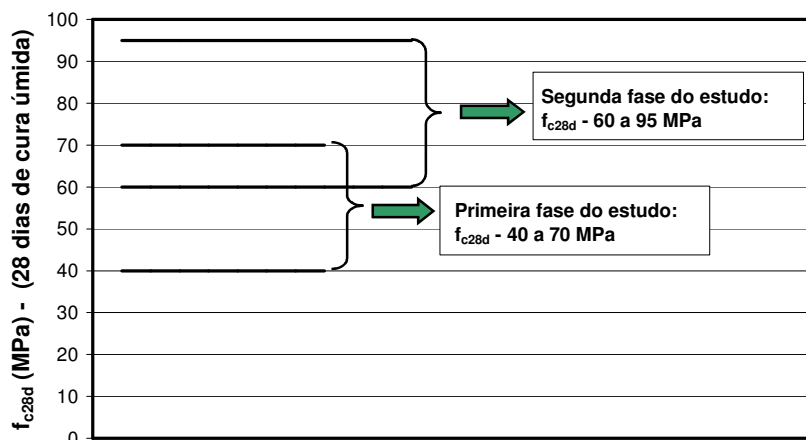


Figura 1-1 – Ilustração da abrangência do estudo desenvolvido.

Este relatório foi elaborado sob a supervisão do Professor Dr. Paulo Helene com o auxílio e colaboração do Eng. M.Sc. Marcelo Medeiros. O documento apresenta os dados e conclusões que foram produzidas no programa de estudo cujos ensaios foram realizados nas dependências dos Laboratórios da EPUSP (Escola Politécnica da Universidade de São Paulo), do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) e ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland). O objetivo foi a avaliação qualitativa e quantitativa da contribuição da adição de *MetacaulimHP* às propriedades dos concretos nacionais.

Segundo o Interessado, a Metacaulim do Brasil Ltda é a primeira empresa brasileira a produzir e comercializar o *MetacaulimHP* em escala industrial, sendo este um produto derivado da calcinação criteriosa de argilas cauliníticas cuidadosamente selecionadas. O *MetacaulimHP* está sendo elaborado pelo Interessado para alcançar a máxima reatividade e desempenho em concretos de cimento Portland.

O Produto *MetacaulimHP* é constituído principalmente por compostos à base de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) na fase amorfa (vítrea), proporcionando alta reatividade com o hidróxido de cálcio presente no concreto. Este produto é recomendado para uso indiscriminado em concretos de cimento Portland devido às suas características físicas e químicas que melhoram as propriedades mecânicas dos concretos de cimento Portland. Sendo um silicato de alumínio, o *MetacaulimHP* é ainda recomendado em diversas aplicações na indústria de refratários, cerâmica, siderurgia, química e outras.



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, n 83 CEP 05508-900 São Paulo SP
tel.: 55-(0)11- 3091-5359 / 5442 fax: 55-(0)11-3091-5544 www.poli.usp.br

Departamento de Engenharia de Construção Civil

Relatório Final

2 PROGRAMA DO EXPERIMENTO

Tendo em vista a avaliação do comportamento do *MetacaulimHP* como adição para concretos de alto desempenho, procedeu-se a elaboração do programa de estudos descrito neste capítulo. Os trabalhos de laboratório foram realizados parte com a coordenação do Eng. Charles Lacerda (teor de 8% de adição) e parte coordenado pelo Eng. M.Sc. Marcelo Medeiros (teor de 10% de adição), sendo todo o trabalho submetido a supervisão e orientação do Professor Dr. Paulo Helene.

Como ponto de partida do estudo, foram escolhidos seis diferentes traços de concreto, sendo as proporções entre aglomerantes e agregados em massa de materiais secos iguais a 1:3,0; 1:4,0 e 1:5,0 (com 8% de adição) e 1:2,8; 1:3,6 e 1:4,4 (com 10% de adição). Além disso, adotou-se uma substituição de 8% e 10% em massa de cimento por *MetacaulimHP*.

Foi incorporado o aditivo denominado Polifuncional 395 N, da Master Builders Technology (MBT), nos concretos com 8% de adição e o aditivo Glenium 54, também da Master Builders Technology (MBT), nos concretos com 10% de adição. Esta escolha foi feita por se tratar de aditivos normalmente utilizados pelas empresas de serviços de concretagem na região da grande São Paulo. Estes aditivos podem atuar como redutor de água ou como plastificante.

Empregou-se no estudo como agregado miúdo uma areia natural (rosa) com módulo de finura de 1,21 e densidade de massa específica de 2.650 kg/m^3 . Como agregado graúdo usou-se uma brita 1 granítica de módulo de finura de 6,91 e densidade de massa específica de 2.660 kg/m^3 . Ambos os agregados atendem à ABNT NBR 7211. Toda a pedra utilizada foi lavada previamente e seca em estufa. A areia foi somente seca em estufa.

O cimento utilizado foi o CP V ARI Plus RS, da CIMINAS, escolhido por ser o mais utilizado pelas centrais de concreto da grande São Paulo, no caso de dosagem de concreto de alta resistência. A caracterização do cimento está na Tabela 3.10 e Tabela 3.11, que estão apresentadas mais adiante (item 3.2).

2.1 Variáveis Independentes

As variáveis independentes fixadas no estudo encontram-se apresentadas a seguir:

- Cimento CPV ARI PLUS RS, CIMINAS;
- Adição de *MetacaulimHP* da Metacaulim do Brasil;
- Agregados miúdos, areia quartzosa natural fina;
- Agregados graúdos, brita 1 granítica;
- Água potável da Sabesp;
- Abatimento do tronco de cone de 80 mm;
- Proporção entre o cimento e os agregados em massa de materiais secos:
 - 1:3,0; 1:4,0 e 1:5,0 (com substituição de 8% de cimento por adição);
 - 1:2,8; 1:3,6 e 1:4,4 (com substituição de 10% de cimento por adição).



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, n 83 CEP 05508-900 São Paulo SP
tel.: 55-(0)11- 3091-5359 / 5442 fax: 55-(0)11-3091-5544 www.poli.usp.br

Departamento de Engenharia de Construção Civil

Relatório Final

2.2 Variáveis Dependentes

Com o intuito de avaliar a potencialidade do *MetacaulimHP*, fez-se uso de ensaios que forneçam dados sobre o comportamento do concreto não só do ponto de vista da sua resistência mecânica como também da sua durabilidade. Na Tabela 2.1 consta uma visão geral dos ensaios empregados nesta fase do estudo, assim como as idades de sua realização.

Foram escolhidas diversas idades para ensaio de modo que se pudesse fazer um acompanhamento da evolução da atividade pozolânica do *MetacaulimHP* nos concretos estudados.

Tabela 2.1 - Variáveis dependentes do estudo.

PROPRIEDADES	MÉTODO DE ENSAIO	IDADE (DIAS)
resistência à compressão	NBR 5739 / 94	1, 7, 28, 63, 91 e 182
resistência à tração por compressão diametral	NBR 7222 / 94	1, 7, 28, 63, 91 e 182
módulo de elasticidade	NBR 8522 / 84	7, 28, 91 e 182
resistência à penetração de íons cloreto	ASTM C 1202 / 94	28, 63 e 91
absorção de água por imersão e índice de vazios	ASTM C 642 / 97	28, 63 e 91
permeabilidade de água sob pressão	NBR 10787	28 dias
resistividade elétrica do concreto	ASTM G 57 / 92	28, 63 e 91
retração por secagem	ASTM C 157 – 93	1, 3, 7, 14, 28, 56, 63, 91 e 182
inibição da reação álcali-agregado devido à adição de materiais pozolânicos	ASTM C 441 / 2002	14, 28 e 56
resistência do aglomerante ao ataque de sulfatos	NBR 13583	7, 14, 21, 28, 35, 42



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, n 83 CEP 05508-900 São Paulo SP
tel.: 55-(0)11- 3091-5359 / 5442 fax: 55-(0)11-3091-5544 www.poli.usp.br

Departamento de Engenharia de Construção Civil

Relatório Final

3 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

3.1 Caracterização tecnológica do MetacaulimHP

3.1.1 Análise Química

A análise química do *MetacaulimHP* foi realizada no Laboratório designado LACTEC, do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LAME (Laboratório de Materiais e Estruturas) pertencente a UFPR.

Os resultados encontrados no ensaio encontram-se apresentados na Tabela 3.1 e foram extraídos do documento de ensaio de registro nº 1.086.03.

Tabela 3.1 - Resultados em % de óxidos, base calcinada, normalizados a 100%.

SiO ₂	51,57
Al ₂ O ₃	40,5
Fe ₂ O ₃	2,8
CaO	---
MgO	---
SO ₃	---
Na ₂ O	0,08
K ₂ O	0,18
Umidade	0,6
PF	2,62
Total	97,8
Equivalente alcalino	0,20
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	94,87

Como se verifica pelos resultados da Tabela 3.1, o *MetacaulimHP* compõe-se principalmente de sílica, alumina e outros componentes, caracterizando-se como um típico material reativo e de características pozolânicas.

3.1.2 Análise de Tamanho de Partículas

A análise de tamanho de partículas do *MetacaulimHP* foi realizada no Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

A distribuição granulométrica determinada pela Difração de raio laser está representada graficamente na Figura 3-1, transcrita do certificado EPUSP LCT 288/02. Contudo, deve-se ter em conta que este tipo de determinação do tamanho de partículas não é a ideal para o Metacaulim, uma vez que ele é um pó cujas partículas são lamelares e não esféricas. Desse modo, pode-se considerar que o BET, apresentado no item seguinte, é o mais adequado para o caso em questão.



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, n 83 CEP 05508-900 São Paulo SP
tel.: 55-(0)11- 3091-5359 / 5442 fax: 55-(0)11-3091-5544 www.poli.usp.br

Departamento de Engenharia de Construção Civil

Relatório Final

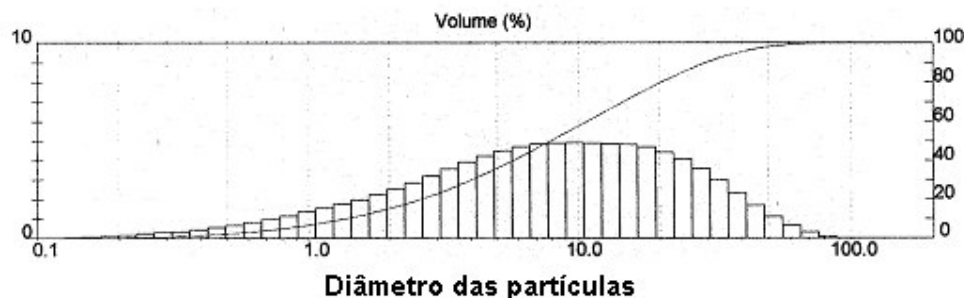


Figura 3-1 - Distribuição granulométrica das partículas do *MetacaulimHP*.

Na Tabela 3.2 observam-se os valores de diâmetro médio e a densidade obtidas com o estudo de análise de tamanho de partículas.

Tabela 3.2 - Análise de tamanho de partículas.

Diâmetro médio	12,4 μm
Densidade	2.650 kg/m^3

Como se verifica com os resultados obtidos e apresentados na Tabela 3.2, trata-se de material muito fino com finura superior à dos clínqueres moídos de cimento Portland nacionais.

3.1.3 Análise da área de superfície específica pelo método BET

A análise da área de superfície específica, do *MetacaulimHP*, foi realizada no Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. O método utilizado foi o BET e os equipamentos empregados para a preparação da amostra e análise foram, respectivamente, um forno tubular EDG5P, um VacOrep 061 e um Gemini 2375 V. 5.0. O gás utilizado na adsorção foi o nitrogênio e os ensaios foram efetuados na temperatura de 25 °C. A amostra foi submetida a vácuo e aquecida a uma temperatura de 120 °C para degaseificação e eliminação de possíveis contaminantes superficiais.

A Tabela 3.3 expressa o resultado deste tipo de ensaio para o *MetacaulimHP* empregado neste estudo. O resultado foi extraído do certificado EPUSP LCT 004/03.

Tabela 3.3 – Análise da área superficial específica pelo método BET.

Área de superfície específica (cm^2/g)
327.000

3.1.4 Análise por Difratometria de Raios-x

A análise por difratometria de raios-x, do *MetacaulimHP*, foi realizada no Laboratório de Caracterização Tecnológica do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. O método utilizado foi o do pó, mediante o emprego de difratômetro de raios-x, marca Philips, modelo MPD 1880.



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, n 83 CEP 05508-900 São Paulo SP
tel.: 55-(0)11- 3091-5359 / 5442 fax: 55-(0)11-3091-5544 www.poli.usp.br

Departamento de Engenharia de Construção Civil

Relatório Final

Através da análise do difratograma da amostra e a sua comparação com o banco de dados do ICCD – International Centre for Diffraction Data foram identificadas as fases cristalinas constantes da Tabela 3.4, transcrita do certificado EPUSP LCT 083/02.

Tabela 3.4 - Análise por difratometria de raios-x.

Nome do composto	Fórmula Química	Nome do Mineral
Sílica	SiO ₂	Quartzo
Caolinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	Caolinita
Flogopita	KMg ₃ Si ₃ AlO ₁₀ (F,OH) ₂	Flogopita
Hematita	Fe ₂ O ₃	Hematita
Ilmenita	FeTiO ₃	Ilmenita

3.1.5 Determinação de atividade pozolânica - método de Chapelle modificado

A determinação da atividade pozolânica foi realizada através do procedimento DEC-LQM-PE-041, "Determinação de atividade pozolânica - Método Chapelle modificado", baseado em diretrizes gerais da publicação "Appréciation de l'activité pouzzolanique des constituants secondaires" - 7^e. Congrès International de la Chimie des Ciments, Paris - 1980, Vol. III, IV-36/41, de autoria de Raverdy M., Brivot F., Paillere A.M., Dron R.

O resultado obtido para a amostra de *MetacaulimHP* empregado neste estudo consta da Tabela 3.5. Segundo Raverdy, o limite para se considerar um material como de baixa reatividade é 330 mg CaO/g amostra. Desse modo, como o *MetacaulimHP* apresentou um consumo de 771,2 mg CaO/g amostra, valor bem superior ao limite de 330 mg CaO/g amostra, pode-se concluir que trata-se de um material com elevada atividade pozolânica.

Tabela 3.5 - Resultado de atividade pozolânica.

Identificação da amostra	Resultado de atividade pozolânica a 90±5 °C (mg CaO/g amostra)
<i>MetacaulimHP</i> (argila caulinítica calcinada)	771,2

3.1.6 Determinação da inibição da reação álcali-agregado

O ensaio para a avaliação da capacidade de inibição da reação álcali-agregado foi conduzido de acordo com a metodologia preconizada pela ASTM C 441. Esta norma é específica para a determinação da eficiência de adições minerais na prevenção da expansão excessiva causada pela reação entre os álcalis do cimento Portland e os agregados efetivamente reativos. Neste caso foi empregado como agregado reativo o vidro pyrex com a granulometria indicada na Tabela 3.6.



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, n 83 CEP 05508-900 São Paulo SP
tel.: 55-(0)11- 3091-5359 / 5442 fax: 55-(0)11-3091-5544 www.poli.usp.br

Departamento de Engenharia de Construção Civil

Relatório Final

Tabela 3.6 – Composição granulométrica do agregado reativo (vidro pyrex) empregado no ensaio de inibição da reação álcali-agregado.

Abertura nominal das peneiras (mm)	Porcentagem retida em massa (%)
4,8 – 2,4	10
2,4 – 1,2	25
1,2 – 0,6	25
0,6 – 0,3	25
0,3 – 0,15	15

A Tabela 3.7 apresenta a composição dos materiais utilizados para a preparação dos corpos-de-prova de argamassa empregados neste tipo de ensaio.

Como se pode observar, o procedimento consistiu em compor dois aglomerantes, sendo eles, cimento CPV ARI PLUS RS puro, cimento + 10% de substituição por *MetacaulimHP*, como se pode observar na Tabela 3.7. Com estes aglomerantes, confeccionou-se corpos-de-prova de argamassa para medida de variação dimensional utilizando como agregado miúdo o vidro pyrex moído, que é um material muito susceptível a reação álcali-agregado. Feito isto, processou-se as medidas de variação dimensional dos corpos-de-prova nas idades de 14, 28 e 56 dias, cujos resultados foram extraídos do relatório de ensaio ABCP nº 25041 e estão apresentados na Tabela 3.8.

Tabela 3.7 – Composição dos materiais empregados para os estudo quanto a reação álcali-agregado.

Aglomerante		Vidro Pyrex (g)	Água* (g)	Espalhamento médio (mm)
Cimento (g)	Adição (g)			
400	0	900	207	214
360	40 (<i>MetacaulimHP</i>)	900	210	203

* Quantidade de água necessária para obter índice de consistência de argamassa de 100 a 115%, de acordo com o estabelecido pelo método ASTM C 441.

Tabela 3.8 – Resultado de variação dimensional de corpos-de-prova confeccionados com o agregado reativo vidro Pyrex.

Idade (dias)	Variação dimensional (%)	
	Cimento CP V ARI PLUS RS	Cimento CP V ARI PLUS RS + 10 % de <i>MetacaulimHP</i>
14	0,033	-0,010
28	0,077	-0,009
56	0,138	-0,010

3.1.7 Determinação da resistência ao ataque por sulfatos

O ensaio de determinação da resistência ao ataque por sulfatos foi conduzido no Laboratório da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) de modo que os resultados que seguem foram extraídos do Relatório n. 25041.

Este ensaio foi conduzido em conformidade com a NBR 13583 e consiste em manter barras de argamassa constituída de cada aglomerante em dois tipos de cura.



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, n 83 CEP 05508-900 São Paulo SP
tel.: 55-(0)11- 3091-5359 / 5442 fax: 55-(0)11-3091-5544 www.poli.usp.br

Departamento de Engenharia de Construção Civil

Relatório Final

Sendo o primeiro tipo realizado em solução de sulfato de sódio e o segundo em água saturada de cal. A diferença da variação dimensional do primeiro tipo de cura pela do segundo, fornece os valores da Tabela 3.9. Desse modo, os resultados da variação dimensional verificada nas barras de argamassa confeccionadas com os aglomerantes em estudo constam da Tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Resultado de variação dimensional de corpos-de-prova submetidos ao ensaio de resistência ao ataque por sulfatos.

Idade (dias)	Variação dimensional (%)	
	Cimento CP V ARI PLUS RS	Cimento CP V ARI PLUS RS + 10 % de MetacaulimHP
7	0,003	0,003
14	0,005	0,002
21	0,004	0,000
28	0,003	-0,003
35	0,003	-0,002
42	0,003	-0,001

3.2 Cimento

O cimento utilizado foi o CP V ARI Plus RS, da CIMINAS, caracterizado na Tabela 3.10, onde se pode ver que os limites da NBR 5733 são perfeitamente atendidos.

Tabela 3.10 - Características físicas do cimento utilizado no estudo.

Ensaio	Norma	Resultado	Limite da NBR5733
Finura – resíduo na peneira de 75µm (%)	NBR 11579/91	1,6	<6,0
Massa específica (kg/m ³)	NBR NM 23/01	3.030	-
Área específica (cm ² /g)	NBR NM 76/98	3790	>3000 cm ² /g
Água da pasta de consistência normal (%)	NBR 11580/91	31,0	-
Início de pega (h:min)	NBR 11581/91	3:25	>1h
Fim de pega (h:min)	NBR 11581/91	5:15	<10h
Expansibilidade de Le Chatelier – a quente (mm)	NBR 11582/91	0,5	<5

A resistência à compressão do cimento na argamassa padrão está indicada na Tabela 3.11, ensaio realizado segundo a NBR 7215.



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, n 83 CEP 05508-900 São Paulo SP
tel.: 55-(0)11- 3091-5359 / 5442 fax: 55-(0)11-3091-5544 www.poli.usp.br

Departamento de Engenharia de Construção Civil

Relatório Final

Tabela 3.11 - Resistência à compressão do cimento utilizado no estudo.

Resistência à compressão em MPa, segundo a NBR 7215							
Idade (dias)	Corpo-de-prova n°				Média (MPa)	Desvio relativo máximo (%)	Limite da NBR 5733 (MPa)
	1	2	3	4			
1	13,5	14,3	13,2	14,3	14	4,7	≥ 14
3	28,9	29,7	28,3	29,2	29	2,4	≥ 24
7	38,5	36,9	37,2	36,2	37	3,5	≥ 34

3.3 Concretos estudados

Na Tabela 3.12 e Tabela 3.13 encontram-se os proporcionamentos dos concretos que fizeram parte do estudo acompanhados da sua densidade no estado fresco (γ_c), ar aprisionado e consumo de aglomerante (C). A Tabela 3.12 se refere ao uso de 8% de adição e a Tabela 3.13 ao teor de 10%.

É muito importante destacar que a adição do *MetacaulimHP* resulta na redução do teor de argamassa de 48 % para 46 %. Isso se deve ao fato de que nos concretos com adição, é feita a substituição de parte de um material mais denso (cimento Portland) por um material menos denso (*MetacaulimHP*). Essa diferença de densidade é muito bem ilustrada na Figura 3-2 e é ela, juntamente com a redução da densidade no estado fresco, que resulta em uma diminuição do consumo de aglomerantes dos concretos com *MetacaulimHP* em relação aos concretos de referência.

Tabela 3.12 - Síntese dos traços estudados para concretos com “slump” de 80 mm e substituição de 8% de cimento por *MetacaulimHP*.

traço	nome	Substituição	cimento : adição : areia : brita ; a/c	γ_c (kg/m ³)	ar apris. (%)	C (Agl.) (kg/m ³)
1 : 3	R	referência (0%)	1,00 : 0,00 : 0,96 : 2,04 ; 0,31	2,412	1,7	560
	M	<i>MetacaulimHP</i> (8%)	0,92 : 0,08 : 0,96 : 2,04 ; 0,34	2,391	1,2	550
1 : 4	R	referência (0%)	1,00 : 0,00 : 1,45 : 2,55 ; 0,42	2,382	2,0	439
	M	<i>MetacaulimHP</i> (8%)	0,92 : 0,08 : 1,45 : 2,55 ; 0,46	2,361	1,3	432
1 : 5	R	referência (0%)	1,00 : 0,00 : 1,94 : 3,06 ; 0,52	2,369	1,9	363
	M	<i>MetacaulimHP</i> (8%)	0,92 : 0,08 : 1,94 : 3,06 ; 0,58	2,341	1,9	356

- (γ_c) = densidade no estado fresco
- Foi utilizado 1,0 % do aditivo polifuncional 395N da MBT em todos os concretos estudados com 8% de adição



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, n 83 CEP 05508-900 São Paulo SP
tel.: 55-(0)11- 3091-5359 / 5442 fax: 55-(0)11-3091-5544 www.poli.usp.br

Departamento de Engenharia de Construção Civil

Relatório Final

Tabela 3.13 - Síntese dos traços estudados para concretos com “slump” de 80 mm e substituição de 10% de cimento por *MetacaulimHP*.

traço	nome	substituição	cimento : adição : areia : brita ; a/c	γ_c (kg/m ³)	ar apris. (%)	C (Agl.) (kg/m ³)
1 : 2,8	R	referência (0%)	1,00 : 0,00 : 0,82 : 1,98 ; 0,24	2,424	1,5	600
	M	<i>MetacaulimHP</i> (10%)	0,90 : 0,10 : 0,75 : 2,05 ; 0,26	2,361	1,2	582
1 : 3,6	R	referência (0%)	1,00 : 0,00 : 1,21 : 2,39 ; 0,28	2,475	1,9	507
	M	<i>MetacaulimHP</i> (10%)	0,90 : 0,10 : 1,12 : 2,48 ; 0,29	2,409	1,4	492
1 : 4,4	R	referência (0%)	1,00 : 0,00 : 1,59 : 2,81 ; 0,32	2,470	2,4	432
	M	<i>MetacaulimHP</i> (10%)	0,90 : 0,10 : 1,48 : 2,92 ; 0,33	2,359	2,2	411

- (γ_c) = densidade no estado fresco
- Foi utilizado 0,65 % do aditivo superplastificante Glenium 54 da MBT em todos os concretos estudados com 10% de adição

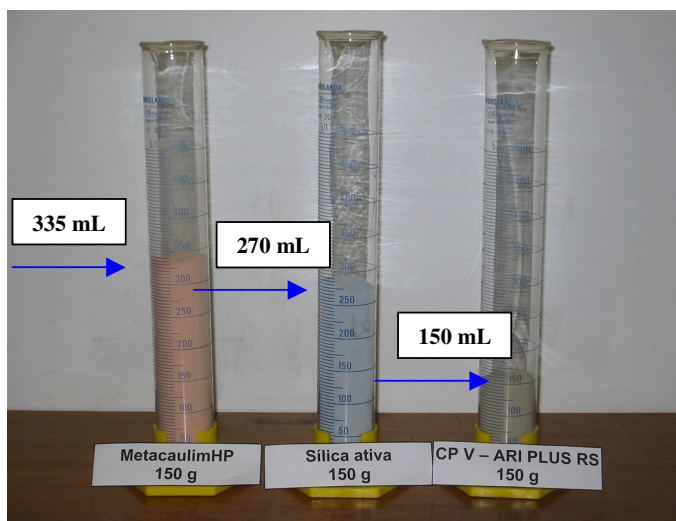


Figura 3-2 – Comparação ilustrativa da diferença de densidade do cimento, com relação ao *MetacaulimHP* e da sílica ativa (amostras de 150 g de material seco do *MetacaulimHP*, sílica ativa e cimento CP V – ARI PLUS RS, respectivamente).

Nos subitens que seguem neste capítulo estão apresentados os resultados absolutos de cada um dos ensaios que fizeram parte do estudo. Vale salientar que, é preciso levar em consideração que a interpretação dos resultados deve ser feita criteriosamente e baseando-se no diagrama de dosagem do estudo, como consta no item 4 (Análise dos Resultados). O confronto direto dos valores apresentados nos subitens deste capítulo deverá resultar em conclusões equivocadas ou pelo menos distorcidas.

3.4 Resistência à Compressão

A resistência à compressão é, sem dúvida, a propriedade do concreto mais especificada e referenciada na aplicação deste material em todo o mundo. Ainda que



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, n 83 CEP 05508-900 São Paulo SP
tel.: 55-(0)11- 3091-5359 / 5442 fax: 55-(0)11-3091-5544 www.poli.usp.br

Departamento de Engenharia de Construção Civil

Relatório Final

em certas aplicações ela possa não ser a propriedade mais importante, ela é sempre designada até mesmo para controlar indiretamente outras propriedades cuja medida seria muito complicada de ser conduzida de forma repetitiva e constante.

Os ensaios de resistência à compressão obtidos neste estudo foram executados nas instalações do Laboratório da EPUSP-PCC e conduzidos de acordo com a NBR 5739. O resumo dos resultados obtidos, para os traços de consistência plástica (80 mm), medida pelo abatimento do tronco de cone (slump), encontra-se na Tabela 3.14.

Tabela 3.14 - Resistência à compressão relativa a 1, 7, 28, 63, 91 e 182 dias de cura úmida, para “slump” de 80 mm.

traço	1 dia (MPa)	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)	63 dias (MPa)	91 dias (MPa)	182 dias (MPa)
8% de substituição de cimento por adição						
1 : 3,0 R	34,0	47,6	60,0	61,7	61,9	66,6
1 : 3,0 M	27,6	58,0	68,8	72,1	76,4	83,2
1 : 4,0 R	32,3	40,3	49,9	50,7	51,9	55,6
1 : 4,0 M	20,2	50,5	56,7	59,6	62,2	70,0
1 : 5,0 R	24,9	35,4	40,3	41,9	45,6	48,2
1 : 5,0 M	20,1	38,2	42,8	57,4	60,3	66,5
10% de substituição de cimento por adição						
1 : 2,8 R	42,1	65,4	85,2	87,5	88,9	92,6
1 : 2,8 M	39,7	75,3	96,2	102,0	104,5	110,4
1 : 3,6 R	38,5	59,0	71,5	73,2	74,8	79,5
1 : 3,6 M	38,0	65,6	79,2	84,6	87,8	97,1
1 : 4,4 R	31,5	54,4	62,5	64,8	65,8	69,8
1 : 4,4 M	30,6	60,4	72,8	77,7	81,8	92,6

3.5 Resistência à Tração por Compressão Diametral

A resistência à tração nos concretos apresenta valores imensamente menores que os de resistência à compressão, sendo a razão freqüente entre ambas da ordem de 0,07 a 0,15. Apesar de no projeto de uma estrutura de concreto armado a resistência à tração não ser considerada, esta é uma propriedade extremamente importante para que seja evitado o surgimento de fissuras, seja por tensões de origem térmica ou por retração por secagem. A questão da prevenção de fissuras tem primordial importância no que se refere a durabilidade das estruturas de concretos.

Essa baixa resistência à tração do concreto o torna um material de ruptura frágil que, segundo Mehta & Monteiro (2000), deve-se à propagação de microfissuras existentes na estrutura interna do concreto que se unem, reduzindo a área disponível de suporte de carga e, concomitantemente, promovendo um acréscimo de tensão nas extremidades dessa nova fissura maior, levando à sua ampliação até à ruptura do concreto.

Os valores medidos de resistência à tração são influenciados por vários fatores, tais como, os métodos empregados para medida (isto é, tração direta, compressão diametral ou flexão), a qualidade do concreto (concreto de baixa, média ou alta resistência), as características dos agregados e até pela influência de alguns tipos de aditivos utilizados na confecção do concreto.



A resistência à tração foi determinada por compressão diametral de acordo com a NBR 7222, onde o corpo-de-prova cilíndrico, com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, é colocado na horizontal, na prensa, apoiado em um suporte prismático de madeira, de dimensões 15 mm x 3,5 mm x 200 mm. Outro suporte de madeira é colocado sobre o corpo-de-prova onde o prato da prensa vai aplicar a carga, conforme Figura 3-3.

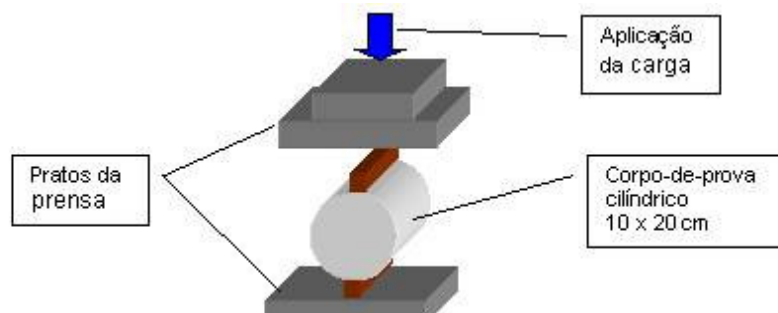


Figura 3-3 - Esquema simplificado do ensaio de tração por compressão diametral.

A Tabela 3.15 e Tabela 3.16 apresentam os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral conduzidos nas instalações do Laboratório da EPUSP-PCC. Encontram-se também nestas tabelas as colunas referentes aos valores mínimos e máximos estimados para a resistência à tração a partir dos valores de resistência à compressão obtidos segundo as equações propostas pelo CEB-FIP Model Code 1990 (CEB-Comité Euro-International du Beton, FIP-Fédération Internationale de la Précontrainte), como pode ser verificado abaixo:

$$f_{ctk.min} = 0,95 \left(\frac{f_{ck}}{f_{cko}} \right)^{2/3}$$

$$f_{ctk.max} = 1,85 \left(\frac{f_{ck}}{f_{cko}} \right)^{2/3}$$

Observa-se na Tabela 3.15 e Tabela 3.16, que os valores obtidos para resistência à tração dos concretos em estudo estão dentro dos limites previstos pelo Código Internacional [fib(CEB-FIP) 1990]. Observa-se, ainda, que os valores de resistência para os concretos de referência (R), sem adição de *MetacaulimHP*, encontram-se, em todos os traços, abaixo daqueles obtidos para os concretos com adição. Isto se deve ao fato de que as adições pozolânicas promovem reações químicas que reduzem o tamanho e a concentração de cristais de hidróxido de cálcio, na zona de transição, um dos principais pontos da fragilidade do concreto à tração, segundo Mehta & Monteiro (2000).

A resistência à tração aumenta com o tempo como pode ser notado ao se analisar a Tabela 3.15 e a Tabela 3.16. Isso se deve ao fato de as reações químicas de hidratação e, concomitantemente, as reações pozolânicas estarem ocorrendo com o tempo. À medida que o cimento do concreto se hidrata ocorre a liberação de hidróxido de cálcio que é aproveitado pelo *MetacaulimHP* que juntamente com água forma um novo composto aglomerante aumentando as ligações internas do concreto.

O aumento da resistência à tração nem sempre segue a mesma razão de crescimento da resistência à compressão. A diferente velocidade de aumento de



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, n 83 CEP 05508-900 São Paulo SP
tel.: 55-(0)11- 3091-5359 / 5442 fax: 55-(0)11-3091-5544 www.poli.usp.br

Departamento de Engenharia de Construção Civil

Relatório Final

resistência entre compressão e tração se deve não só ao fator cura do concreto mas também a fatores relacionados à mistura do concreto tais como tipo de agregado, uso de aditivos e a fatores internos tipo microfissuração.

Tabela 3.15 – Resistência à tração por compressão diametral relativa a 7 e 28 dias de cura úmida, para “slump” de 80 mm.

traço	$f_{ctk.min}$	7 dias (MPa)	$f_{ctk.max}$	$f_{ctk.min}$	28 dias (MPa)	$f_{ctk.max}$
8% de substituição de cimento por adição						
1 : 3,0 R	2,3	3,9	4,6	2,8	4,4	5,5
1 : 3,0 M	2,7	4,1	5,3	3,1	4,7	6,1
1 : 4,0 R	2,0	3,8	4,0	2,4	4,1	4,7
1 : 4,0 M	2,5	4,1	4,8	2,7	4,2	5,2
1 : 5,0 R	1,8	3,2	3,5	2,0	3,9	4,0
1 : 5,0 M	1,9	3,8	3,8	2,1	4,0	4,2
10% de substituição de cimento por adição						
1 : 2,8 R	2,6	5,8	5,1	3,7	6,4	7,2
1 : 2,8 M	2,8	6,0	5,5	4,0	6,6	7,8
1 : 3,6 R	2,5	5,1	4,9	3,2	5,9	6,3
1 : 3,6 M	2,7	5,1	5,3	3,5	6,1	6,8
1 : 4,4 R	2,4	4,4	4,6	2,9	5,7	5,7
1 : 4,4 M	2,5	4,5	4,8	3,3	5,7	6,4

* Para a estimativa de f_{ctk} empregou-se $f_{ck}=f_c-1,65 \times 5,5$

Tabela 3.16 – Resistência à tração por compressão diametral relativa a 63, 91 e 182 dias de cura úmida, para “slump” de 80 mm.

traço	$f_{ctk.min}$	63 dias (MPa)	$f_{ctk.max}$	$f_{ctk.min}$	91 dias (MPa)	$f_{ctk.max}$	$f_{ctk.min}$	182 dias (MPa)	$f_{ctk.max}$
8% de substituição de cimento por adição									
1 : 3,0 R	2,9	4,4	5,6	2,9	4,5	5,6	3,1	4,7	5,9
1 : 3,0 M	3,2	4,9	6,3	3,5	5,5	6,8	3,6	5,7	7,0
1 : 4,0 R	2,5	4,1	4,8	2,5	4,3	4,9	2,7	4,5	5,2
1 : 4,0 M	2,8	4,3	5,5	2,9	4,7	5,6	3,2	4,8	6,2
1 : 5,0 R	2,1	3,9	4,1	2,3	4,1	4,4	2,4	4,3	4,6
1 : 5,0 M	2,7	4,1	5,3	2,8	4,5	5,5	3,0	4,6	5,9
10% de substituição de cimento por adição									
1 : 2,8 R	3,8	6,4	7,3	3,8	6,4	7,4	3,9	6,8	7,6
1 : 2,8 M	4,2	6,6	8,2	4,3	6,7	8,3	4,5	7,1	8,7
1 : 3,6 R	3,3	6,0	6,4	3,3	6,3	6,5	3,5	6,7	6,8
1 : 3,6 M	3,7	6,2	7,1	3,8	6,5	7,3	4,1	6,8	7,9
1 : 4,4 R	3,0	5,6	5,8	3,0	5,7	5,9	3,2	5,9	6,2
1 : 4,4 M	3,4	5,8	6,7	3,6	5,9	6,9	3,9	6,1	7,6

* Para a estimativa de f_{ctk} empregou-se $f_{ck}=f_c-1,65 \times 5,5$



3.6 Módulo de Elasticidade

O texto do fib (CEB-FIP) Model Code 90, p.39 e seguintes, define claramente o que se deve entender por módulo de elasticidade do concreto, indicado com a notação E_{ci} , ou seja, módulo de elasticidade tangente à origem ou inicial. Esse valor é o valor utilizado pelo fib CEB-FIP Model Code 90 em todos os demais modelos de comportamento indicados nos diagramas tensão versus deformação para estados de tensão uniaxial ou multiaxial e também no caso de previsão de deformação lenta.

Além disso, diz o texto do fib Model Code 90 que o módulo tangente à origem ou inicial é perfeitamente equivalente ao módulo secante a $0,3f_c$ ou cordal entre 0,5 MPa e $0,3f_c$, que corresponde ao plano de carregamento tipo I da norma ABNT de determinação de módulo de elasticidade.

Em geral a correspondência que se adota entre módulo inicial (E_{ci}) e o módulo secante (E_c) é de $E_c = (0,85 \text{ a } 0,90) \cdot E_{ci}$.

Uma vez que o diagrama tensão vs deformação específica do concreto não é linear nem tem um comportamento elástico perfeito, define-se pelo menos três módulos de elasticidade, quando em compressão uniaxial (sem confinamento), em corpos-de-prova cilíndricos:

- o módulo de elasticidade, estático e instantâneo, tangente à origem, também conhecido por módulo de elasticidade, estático e instantâneo, inicial, que do ponto de vista prático de ensaio corresponde ao módulo de elasticidade, estático e instantâneo, cordal entre 0,5 MPa e $0,3f_c$ e ao módulo de elasticidade, estático e instantâneo, secante a $0,3f_c$. Este valor pode ser obtido de várias formas, optando-se neste estudo pelo método de ensaio brasileiro descrito na NBR 8522 / 1984 da ABNT, através do carregamento tipo I descrito no mesmo método, que por sua vez é equivalente ao método de ensaio descrito na ISO 6784:82 e na Norma MERCOSUL 05:03-0124. Convenciona-se indicar este módulo de elasticidade por E_{ci} , geralmente expressando-o em GPa.
- o módulo de elasticidade, estático e instantâneo, secante a qualquer porcentagem de f_c . Em geral trabalha-se com o módulo de elasticidade, estático e instantâneo, cordal entre 0,5 MPa e $0,4f_c$, que é equivalente ao módulo de elasticidade, estático e instantâneo, secante a $0,4f_c$, pois esta é normalmente a tensão nas condições de serviço recomendadas nos códigos e normas de projeto de estruturas de concreto. Este valor pode ser obtido de várias formas, sendo equivalente ao método de ensaio descrito na ASTM C 469 e ABNT tipo II. Convenciona-se indicar este módulo de elasticidade por E_c , geralmente expressando-o em GPa.
- o módulo de elasticidade, estático e instantâneo, cordal entre quaisquer intervalos de tensão ou deformação específica. Do ponto de vista prático de projeto é pouco utilizado.

Além destes, é possível definir outros módulos, tais como módulo dinâmico, módulo sob carga de longa duração, módulo sob impacto, etc., em geral todos de pouca utilidade prática.

O módulo de elasticidade, conforme explanado, foi determinado de acordo com a NBR 8522, a partir da média dos valores obtidos entre dois corpos-de-prova cilíndricos, de dimensões iguais a 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, escolhidos aleatoriamente.

Há vários modelos de previsão do módulo de elasticidade, sendo mais utilizados aqueles que correlacionam o módulo de elasticidade com a resistência à compressão



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, n 83 CEP 05508-900 São Paulo SP
tel.: 55-(0)11- 3091-5359 / 5442 fax: 55-(0)11-3091-5544 www.poli.usp.br

Departamento de Engenharia de Construção Civil

Relatório Final

do concreto. Segundo os diferentes códigos e normas, os modelos podem ser dos tipos indicados de A a D.

- A. Texto da NB 1 da ABNT de 1978 • item 8.2.5:

$$E_{ci} = 6600 \cdot f_c^{0,5} \text{ em MPa} - \text{para } f_c = f_{ck} + 3,5 \text{ MPa}$$

- B. Texto proposto para a NB 1 da ABNT de 2002

$$E_c = 4700 \cdot f_{ck}^{0,5} \text{ em MPa}$$

$$\text{sendo } E_c = 0,9 \cdot E_{ci}$$

- C. Texto do ACI 318 de 1995 • item 8.5:

$$E_c = 4733 \cdot f_{ck}^{0,5} \text{ em MPa}$$

sendo definido neste caso que se trata do módulo secante a $0,45f_c$.

- D. Texto do fib (CEB-FIP) Model Code 90 • item 2.1.4.2:

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 21500 \cdot [(f_{ck} + 8)/10]^{1/3}$$

onde α_E depende da natureza do agregado sendo igual a 1,0 para granito e gnaíse.

Na execução deste ensaio foram conectados aos corpos-de-prova aparelhos eletrônicos de alta sensibilidade, tipo LVDT, para medida das deformações ocorridas durante os carregamentos. O ciclo de carregamento escolhido, de acordo com o método NBR 8522, para o módulo de elasticidade tangente à origem, ou inicial, foi o plano de Carga I onde, resumidamente, o corpo-de-prova é submetido a cinco carregamentos e descarregamentos sucessivos sendo o valor de carga mínima igual a 0,5 MPa e o valor máximo igual a 30% do valor de resistência prevista. Em seguida, o corpo-de-prova é submetido a um minuto com a carga mínima (0,5 MPa) e um minuto com a carga máxima (30% do f_c previsto) por duas vezes. O plano de carregamento está ilustrado na Figura 3-4.

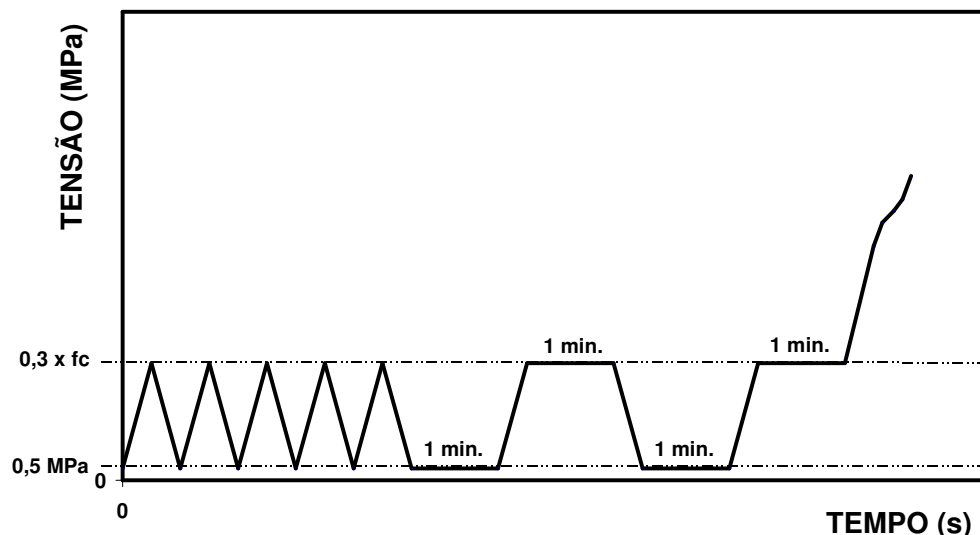


Figura 3-4 – Plano de carregamento Tipo 1 da NBR 8522, usado no ensaio de determinação do módulo de elasticidade.



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, n 83 CEP 05508-900 São Paulo SP
tel.: 55-(0)11- 3091-5359 / 5442 fax: 55-(0)11-3091-5544 www.poli.usp.br

Departamento de Engenharia de Construção Civil

Relatório Final

Os resultados obtidos para o módulo de elasticidade constam da Tabela 3.17 e Tabela 3.18 onde também são encontrados valores de previsão de módulo de elasticidade calculados de acordo com os modelos apresentados nas alíneas A a D do item 3.6, à partir dos valores de resistências características à compressão (f_{ck}) obtidos neste estudo admitindo por simplificação de cálculo que $f_{ck} = f_{cj} - 1,65 \times 5,5 \text{ MPa}$.

Tabela 3.17 - Módulo de elasticidade tangente inicial relativo a 7 e 28 dias de cura úmida, para “slump” de 80 mm.

Traço	7 dias (GPa)	NB1/78 (GPa)	NB1/02 (GPa)	Fib (GPa)	28 dias (GPa)	NB1/78 (GPa)	NB1/02 (GPa)	Fib (GPa)
8% de substituição de cimento por adição								
1 : 3,0 R	37,6	45,5	32,4	35,9	40,8	51,1	37,3	38,8
1 : 3,0 M	39,4	50,3	36,5	38,4	43,0	54,7	40,4	40,7
1 : 4,0 R	33,1	41,9	29,2	33,9	35,7	46,6	33,4	36,5
1 : 4,0 M	34,5	46,9	33,6	36,6	37,6	49,7	36,0	38,1
1 : 5,0 R	27,9	39,3	26,8	32,4	29,8	41,9	29,2	33,9
1 : 5,0 M	29,7	40,8	28,2	33,3	32,4	43,2	30,3	34,6
10% de substituição de cimento por adição								
1 : 2,8 R	56,5	49,1	35,5	37,8	58,0	60,9	45,6	43,7
1 : 2,8 M	56,7	51,3	37,4	38,9	58,7	64,7	48,7	45,6
1 : 3,6 R	44,3	47,6	34,2	37,0	50,8	55,8	41,3	41,2
1 : 3,6 M	45,3	50,1	36,4	38,3	54,8	58,7	43,7	42,7
1 : 4,4 R	42,6	45,9	32,7	36,1	48,5	52,2	38,2	39,4
1 : 4,4 M	43,4	47,3	34,0	36,8	51,1	56,3	41,7	41,5

Tabela 3.18 - Módulo de elasticidade tangente inicial relativo a 91 e 182 dias de cura úmida, para “slump” de 80 mm.

Traço	91 dias (GPa)	NB1/78 (GPa)	NB1/02 (GPa)	Fib (GPa)	182 dias (GPa)	NB1/78 (GPa)	NB1/02 (GPa)	Fib (GPa)
8% de substituição de cimento por adição								
1 : 3,0 R	41,7	51,9	38,0	39,2	43,1	53,9	39,6	40,2
1 : 3,0 M	44,8	57,7	42,8	42,1	46,7	60,2	45,0	43,4
1 : 4,0 R	38,6	47,5	34,2	37,0	40,2	49,2	35,6	37,8
1 : 4,0 M	39,6	52,1	38,1	39,3	41,9	55,2	40,8	40,9
1 : 5,0 R	30,8	44,6	31,6	35,4	32,1	45,8	32,7	36,0
1 : 5,0 M	33,5	51,3	37,4	38,9	34,8	53,8	39,6	40,2
10% de substituição de cimento por adição								
1 : 2,8 R	63,3	62,2	46,7	44,4	65,3	63,5	47,7	45,0
1 : 2,8 M	67,0	67,3	50,9	46,8	70,1	69,3	52,6	47,7
1 : 3,6 R	56,2	57,1	42,3	41,8	58,8	58,8	43,8	42,7
1 : 3,6 M	58,7	61,8	46,3	44,2	63,2	65,0	49,0	45,7
1 : 4,4 R	52,3	53,5	39,3	40,1	55,2	55,1	40,7	40,9
1 : 4,4 M	55,6	59,7	44,5	43,1	57,8	63,5	47,7	45,0

Embora os valores de previsão variem muito entre um modelo e outro, pode-se notar que os resultados obtidos dos ensaios correspondem ao esperado com um comportamento bastante coerente onde concretos de traços mais ricos (1:3 com 8% de adição e 1:2,8 com 10% de adição) apresentam um módulo de elasticidade maior



que o dos concretos com traços mais pobres (1:5 com 8% de adição e 1:4,4 com 10% de adição). Também pode ser observado que os concretos com *MetacaulimHP* apresentam valores de módulo maiores que os concretos de referência (R), sem adição.

3.7 Resistência à Penetração de Íons Cloreto

A durabilidade dos concretos tem sido cada vez mais uma preocupação dos engenheiros e de toda a sociedade, primeiro por uma questão econômica onde os custos dos reparos têm alcançado patamares tão elevados que se tem concluído por uma necessidade na melhoria da qualidade do concreto com relação à durabilidade. Por outro lado, existe uma questão ambiental, ecológica quando da conservação de recursos naturais, conforme Freyermuth (Life-Cycle Cost Analysis. Concrete International, ACI, v. 23, n. 2, Feb. 2001. p.89-95) e Kumar Mehta (Reducing the Environmental Impact of Concrete. Concrete International. ACI, v.23, n. 10, Oct. 2001. p.61-66). Além disso, os concretos têm sido utilizados em ambientes cada vez mais hostis como plataformas marítimas e em diversos tipos de indústrias químicas e nucleares.

Pode-se dizer que um dos principais agentes agressivos causadores da corrosão de armaduras em estruturas de concreto armado é o íon cloreto, que está presente principalmente em regiões litorâneas, atmosferas industriais, reservatórios de águas tratadas, piscinas e tratamentos químicos em indústrias e águas contaminadas. Este é o motivo que levou à introdução deste ensaio (método ASTM C1202) no programa experimental do presente estudo.

A determinação da resistência à penetração de íons cloreto foi determinada seguindo o procedimento de ensaio do método ASTM C1202, a 28, 63 e 91 dias de cura úmida. Os resultados constam da Tabela 3.19 e foram conduzidos nas instalações da EPUSP-PCC.

No procedimento da ASTM C1202, os corpos-de-prova sujeitos ao ensaio de penetração de íons cloreto são lacrados entre câmaras ou células sendo uma com cloretos (Cl⁻) e outra sem cloretos. A seguir é gerada uma diferença de potencial entre as células, o que cria uma corrente que induz o ânion cloreto a se difundir no concreto através de um campo elétrico. Nesse ensaio a corrente é registrada em função do tempo e com estes dados calcula-se a carga passante, que é um valor indicativo da quantidade de íons cloretos que passou através do concreto. A carga passante varia de forma direta com a quantidade de íons que migrou, ou seja, quanto menor o valor de carga passante melhor a qualidade do concreto em termos de servir como barreira contra o ingresso de cloretos.

De acordo com a recomendação da ASTM C 1202, valores menores do que 100 Coulombs indicam altíssima resistência a penetração de cloretos, por sua vez, na faixa de 100 a 1000 Coulombs encontram-se os concretos com muito alta resistência à penetração de cloretos. Na faixa entre 1000 e 2000 estão os concretos com alta resistência à penetração de cloretos e entre 2000 e 4000 estão os concretos com moderada resistência à penetração de cloretos. Acima de 4000 estão os concretos de baixa resistência à penetração de cloretos.

Nota-se, na Tabela 3.19, que os concretos com *MetacaulimHP* encontram-se em faixas de muito alta resistência à penetração de cloretos o que os torna um concreto durável e recomendável para aplicações em ambientes agressivos com predominância de cloretos. Desse modo, fica claro o aumento da proteção quanto ao



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, n 83 CEP 05508-900 São Paulo SP
tel.: 55-(0)11- 3091-5359 / 5442 fax: 55-(0)11-3091-5544 www.poli.usp.br

Departamento de Engenharia de Construção Civil

Relatório Final

ataque dos íons cloreto resultante da adição de *MetacaulimHP* nos concretos aqui estudados.

Tabela 3.19 – Resistência à penetração de cloretos relativa a 28, 63 e 91 dias de cura úmida, para “slump” de 80 mm.

traço	28 dias		63 dias		91 dias	
	Carga passante em Coulombs	resistência à penetração de cloretos	carga passante em Coulombs	resistência à penetração de cloretos	carga passante em Coulombs	resistência à penetração de cloretos
8% de substituição de cimento por adição						
1 : 3,0 R	2072	moderada	1860	moderada	1304	Alta
1 : 3,0 M	764	 muito alta	809	 muito alta	632	 muito alta
1 : 4,0 R	2163	moderada	1897	Alta	1522	Alta
1 : 4,0 M	943	 muito alta	721	 muito alta	705	 muito alta
1 : 5,0 R	2282	moderada	2073	Alta	1796	Alta
1 : 5,0 M	998	 muito alta	865	 muito alta	736	 muito alta
10% de substituição de cimento por adição						
1 : 2,8 R	915	muito alta	758	muito alta	728	muito alta
1 : 2,8 M	179	 muito alta	123	 muito alta	114	 muito alta
1 : 3,6 R	974	muito alta	812	muito alta	787	muito alta
1 : 3,6 M	185	 muito alta	151	 muito alta	131	 muito alta
1 : 4,4 R	1295	alta	1154	alta	1041	alta
1 : 4,4 M	308	 muito alta	297	 muito alta	290	 muito alta

3.8 Absorção de Água por Imersão e Índice de Vazios

A análise da durabilidade passa não só pelo controle da água no concreto, uma vez que ela é responsável por muitos processos físicos e químicos de degradação, como também pela sua porosidade, via através da qual os agentes agressivos ingressam no concreto.

Este pode ser considerado um ensaio complementar que fornece informações sobre a qualidade do concreto. É uma forte medida indireta da resistência do concreto à penetração de agentes agressivos em situações submersas ou permanentemente saturadas e úmidas.

A determinação da absorção de água por imersão e o índice de vazios foi realizada seguindo o procedimento de ensaio do método ASTM C 642, a 28, 63 e 91 dias de idade. Os resultados constam na Tabela 3.20 e foram realizados nas dependências do Laboratório da EPUSP-PCC.

Pode-se dizer que um concreto é durável quando ele apresenta absorção de água inferior a 4,5% e índice de vazios nestas condições de ensaio, inferior a 11%. Os demais podem ser considerados concretos normais não adequados a ambientes agressivos e úmidos.

Deve-se notar que os concretos de referência ficaram com a classificação variando de deficiente a durável, enquanto, que os concretos com *MetacaulimHP* tiveram a sua classificação de normal a durável. Contudo, comparando os valores



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, n 83 CEP 05508-900 São Paulo SP
tel.: 55-(0)11- 3091-5359 / 5442 fax: 55-(0)11-3091-5544 www.poli.usp.br

Departamento de Engenharia de Construção Civil

Relatório Final

obtidos para a absorção de água e índice de vazios verifica-se que em todos os casos a adição de *MetacaulimHP* levou ao melhoramento dos concretos estudados.

Tabela 3.20 - Absorção de água e índice de vazios a 28, 63 e 91 dias de cura úmida, para concretos com “slump” de 80 mm.

Traço	28 dias			63 dias			91 dias		
	absorção de água (%)	índice de vazios (%)	classificação do concreto	absorção de água (%)	índice de vazios (%)	classificação do concreto	absorção de água (%)	índice de vazios (%)	classificação do concreto
8% de substituição de cimento por adição									
1 : 3,0 R	5,1	12,5	normal	4,5	11,8	normal	4,3	11,6	normal
1 : 3,0 M	4,0	9,6	durável	3,9	9,0	durável	3,1	8,3	durável
1 : 4,0 R	5,7	13,7	normal	5,2	12,0	normal	4,7	12,4	normal
1 : 4,0 M	4,4	10,5	durável	4,0	10,5	durável	3,3	9,0	durável
1 : 5,0 R	6,1	14,5	deficiente	5,9	13,6	deficiente	5,2	13,4	deficiente
1 : 5,0 M	5,2	12,2	normal	4,7	12,0	normal	4,2	9,9	durável
10% de substituição de cimento por adição									
1 : 2,8 R	2,40	5,1	Durável	2,0	4,8	Durável	1,8	4,4	Durável
1 : 2,8 M	1,44	3,6	Durável	1,4	3,4	Durável	1,3	3,1	Durável
1 : 3,6 R	2,62	6,6	Durável	2,4	5,8	Durável	2,2	5,2	Durável
1 : 3,6 M	2,21	5,1	Durável	1,9	4,6	Durável	1,8	4,3	Durável
1 : 4,4 R	2,84	10,1	Durável	2,6	6,4	Durável	2,5	5,9	Durável
1 : 4,4 M	2,46	6,0	Durável	2,0	4,7	Durável	1,9	4,5	Durável

3.9 Permeabilidade a Água sob Pressão

A permeabilidade consiste na propriedade que quantifica a resistência à penetração de água impulsionada pela atuação de um gradiente de pressão, como uma coluna d'água, por exemplo. Desse modo, esta é uma propriedade importante para uma estrutura de concreto apenas em condições muito particulares, como reservatórios de armazenamento de água. Apesar deste fato, a permeabilidade é uma das propriedades do concreto mais visadas na especificação do concreto. Contudo, vale registrar que os autores deste relatório são partidários da opinião de que a absorção de água por imersão e por ascensão capilar são propriedades muito mais importantes para a durabilidade da grande maioria das estruturas de concreto.

A seguir, na Tabela 3.21 estão apresentados os resultados do ensaio de permeabilidade a água sob pressão realizado segundo a NBR 10787. Os corpos-de-prova empregados neste ensaio são prismas de 250 mm x 250 mm x 125 mm, que são devidamente moldados e curados para o início do ensaio que consiste em acoplar uma das faces dos corpos-de-prova em um equipamento que aplica água sob pressão provido de um manômetro para a regulagem do nível de pressão aplicada. Segundo a NBR 10787, deve-se aplicar a pressão de 0,1 MPa durante as primeiras 48 horas de ensaio, aumentando o nível de pressão para 0,3 MPa pelas 24 horas seguintes e nas últimas 24 horas de ensaio eleva-se a pressão para 0,7 MPa. Após as 96 horas do início do ensaio, faz-se a ruptura dos corpos-de-prova de modo a cortá-lo longitudinalmente a aplicação da água sob pressão. O resultado é a leitura a penetração de água efetuada com o auxílio de um paquímetro. A Figura 3-5 fornece uma visão geral da seqüência do ensaio acima descrito.



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, n 83 CEP 05508-900 São Paulo SP
tel.: 55-(0)11- 3091-5359 / 5442 fax: 55-(0)11-3091-5544 www.poli.usp.br

Departamento de Engenharia de Construção Civil

Relatório Final

Este ensaio foi realizado nas instalações do Laboratório de Concreto do IPT, com a colaboração do seu corpo de funcionários.

Tabela 3.21 – Permeabilidade a água sob pressão a 28 dias de cura úmida, para concretos com “slump” de 80 mm.

Traço	Altura de penetração de água (mm)
1 : 2,8 R	9
1 : 2,8 M	0
1 : 3,6 R	11
1 : 3,6 M	3
1 : 4,4 R	13
1 : 4,4 M	6

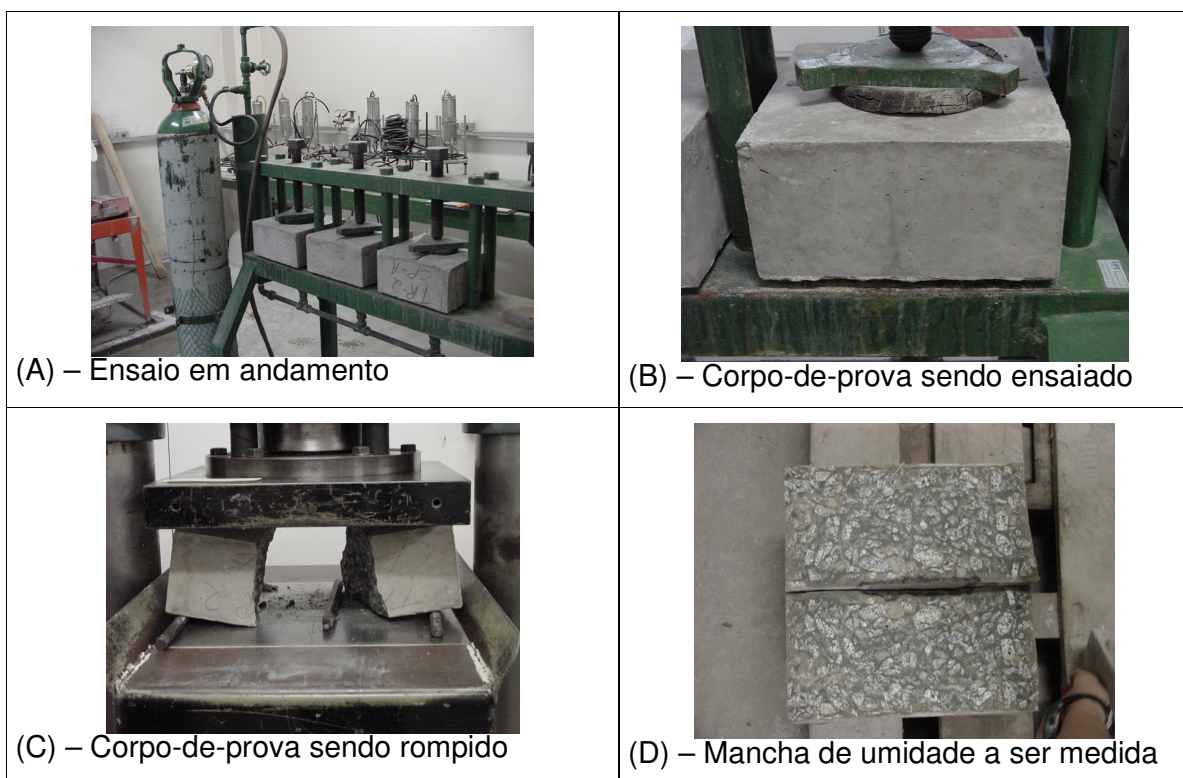


Figura 3-5 – Ilustração do ensaio de permeabilidade a água sob pressão realizado nas instalações do IPT.

3.10 Resistividade Elétrica

Pode-se dizer que o fluxo de íons que se difundem no concreto através da solução aquosa presente nos poros é controlado pela resistividade elétrica do concreto. Desse modo, a resistividade é um dos parâmetros controladores da cinética das reações de corrosão de armaduras. A sua medida é efetuada através da adaptação do método “ASTM G 57 Standard Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method”.



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, n 83 CEP 05508-900 São Paulo SP
tel.: 55-(0)11- 3091-5359 / 5442 fax: 55-(0)11-3091-5544 www.poli.usp.br

Departamento de Engenharia de Construção Civil

Relatório Final

A medida da resistividade elétrica dos concretos estudados foi realizada pelo método dos quatro eletrodos, segundo a ASTM G-57, a 28, 63 e 91 dias de cura úmida. Os resultados constam na Tabela 3.22 e foram realizados nas instalações do Laboratório da EPUSP-PCC.

Usando a consideração do fib (CEB-FIP), Boletim de Informação n. 192 (1989), que para valores de resistividade superiores a 60 k Ω .cm a taxa de corrosão esperada pode ser considerada desprezível, verifica-se pela Tabela 3.22 que apenas concretos sem adições estiveram na posição de resistividade inferior a 60 k Ω .cm.

Verifica-se que os concretos de referência com proporcionamento 1:2,8R e 1:3,6R apresentaram valores acima do patamar de 60 k Ω .cm. Isto se deve ao fato de eles possuírem relações água/cimento muito baixas, sendo assim naturalmente enquadrados como concretos duráveis. Contudo, a comparação dos seus valores absolutos com os concretos com *MetacaulimHP* deixa nítido o benefício proporcionado pelo emprego desta adição.

Tabela 3.22 - Resistividade elétrica para concretos com “slump” de 80 mm.

	28 dias	63 dias	91 dias
traço		Resistividade (kΩ.cm)	
8% de substituição de cimento por adição			
1 : 3,0 R	30,7	36,5	37,7
1 : 3,0 M	72,4	92,4	136,8
1 : 4,0 R	30,5	34,8	34,3
1 : 4,0 M	71,3	76,7	81,3
1 : 5,0 R	26,7	31,5	44,7
1 : 5,0 M	62,2	71,2	74,5
10% de substituição de cimento por adição			
1 : 2,8 R	95	106	115
1 : 2,8 M	313	315	317
1 : 3,6 R	70	87	102
1 : 3,6 M	182	191	197
1 : 4,4 R	31	57	79
1 : 4,4 M	139	152	167

3.11 Retração por secagem

Esta consiste em uma propriedade do concreto de grande importância para a sua durabilidade de modo que sua redução pode evitar o surgimento de fissuras levando ao aumento na durabilidade. Na Tabela 3.23 constam os resultados do ensaio de retração por secagem para os corpos-de-prova submetidos a cura úmida durante 28 dias. O ensaio foi realizado conforme a ASTM C157 nas instalações do Laboratório da EPUSP-PCC.



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, n 83 CEP 05508-900 São Paulo SP
tel.: 55-(0)11- 3091-5359 / 5442 fax: 55-(0)11-3091-5544 www.poli.usp.br

Departamento de Engenharia de Construção Civil

Relatório Final

Tabela 3.23 – Retração por secagem dos concretos após a cura úmida por 28 dias.

Traço	Retração (‰)							
	Tempo a partir da moldagem (dias)							
	3	7	14	28	56	63	91	182
1 : 2,8 R	0,03	0,09	0,12	0,13	0,16	0,20	0,24	0,26
1 : 2,8 M	0,01	0,03	0,05	0,08	0,11	0,12	0,15	0,16
1 : 3,6 R	0,06	0,12	0,19	0,21	0,22	0,25	0,35	0,38
1 : 3,6 M	0,03	0,09	0,15	0,17	0,18	0,19	0,23	0,25
1 : 4,4 R	0,19	0,38	0,47	0,54	0,60	0,61	0,64	0,65
1 : 4,4 M	0,07	0,14	0,27	0,30	0,34	0,34	0,35	0,37



4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Diagramas de dosagem

A elaboração de diagramas de dosagem é extremamente importante para a correta condução da análise dos resultados do presente estudo, pois fornece uma visão geral da resistência à compressão com relação a parâmetros de grande importância na dosagem (consumo de cimento, relação água/aglomerantes e teor de agregados na mistura-m).

Desse modo, a Figura 4-1, Figura 4-2 e Figura 4-3 representam os diagramas de dosagem de comparação dos concretos de referência (sem adição), com relação aos concretos com adição de MetacaulimHP. A Figura 4-1 apresenta os dados relativos a 7 dias de cura úmida, enquanto que a Figura 4-2 se refere aos dados para 28 dias e a Figura 4-3 se refere aos resultados relativos a 91 dias de cura úmida. Com base nestes diagramas são feitas algumas considerações apresentadas no item que segue.

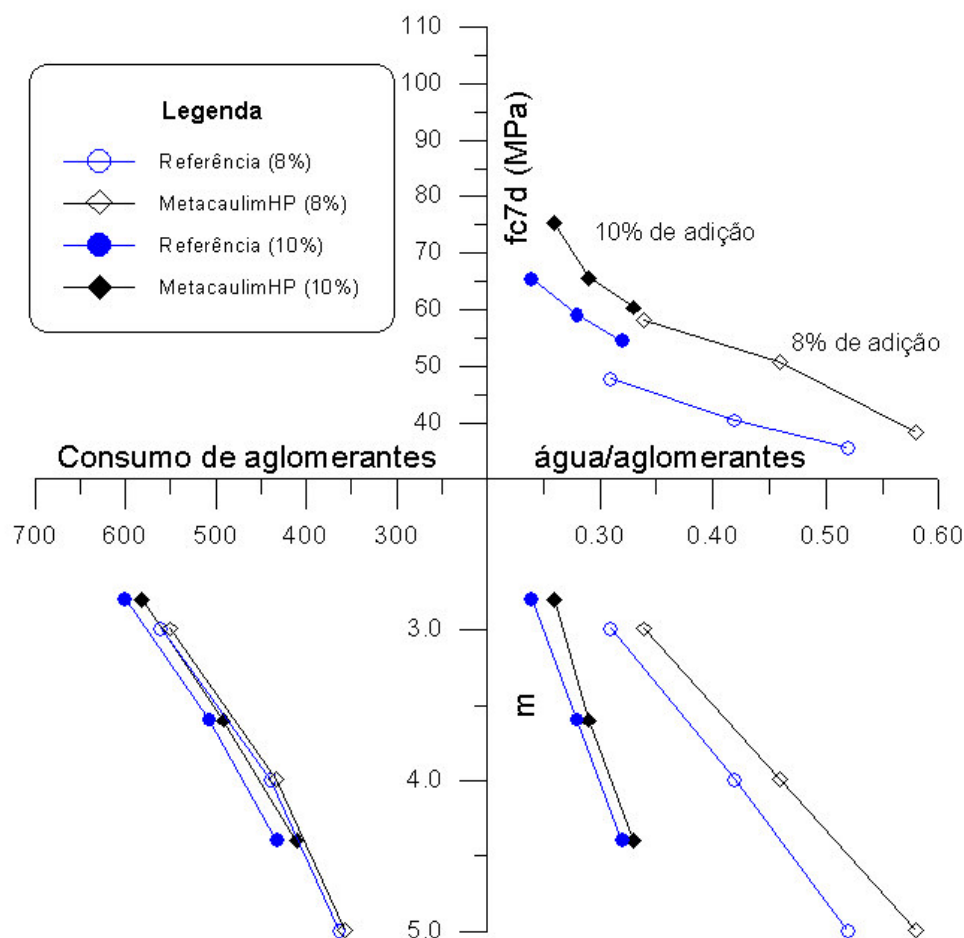


Figura 4-1 – Diagrama de dosagem dos concretos estudados para teores de adição de 8% e 10% (cura de 7 dias).



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, n 83 CEP 05508-900 São Paulo SP
tel.: 55-(0)11- 3091-5359 / 5442 fax: 55-(0)11-3091-5544 www.poli.usp.br

Departamento de Engenharia de Construção Civil

Relatório Final

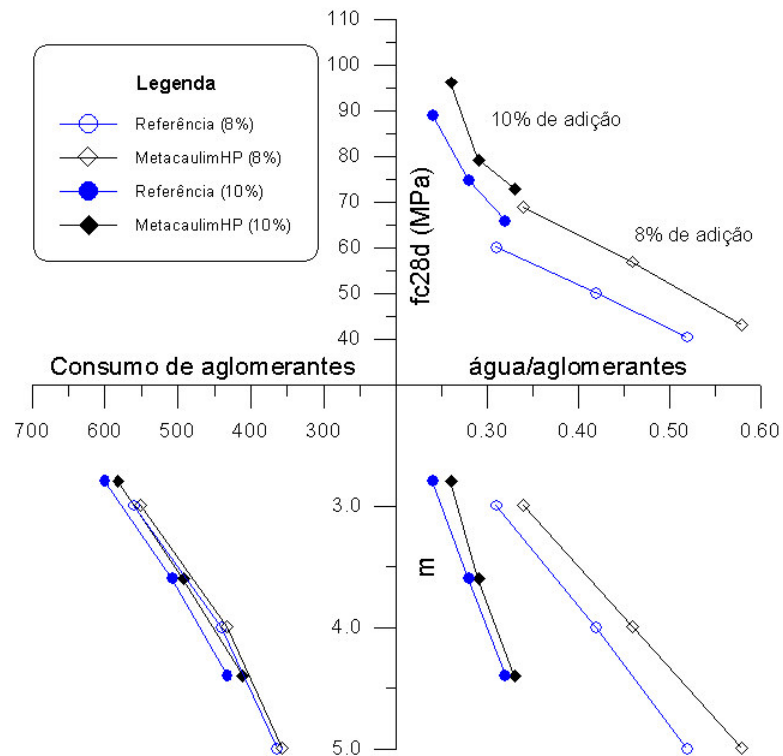


Figura 4-2 - Diagrama de dosagem dos concretos estudados para teores de adição de 8% e 10% (cura de 28 dias).

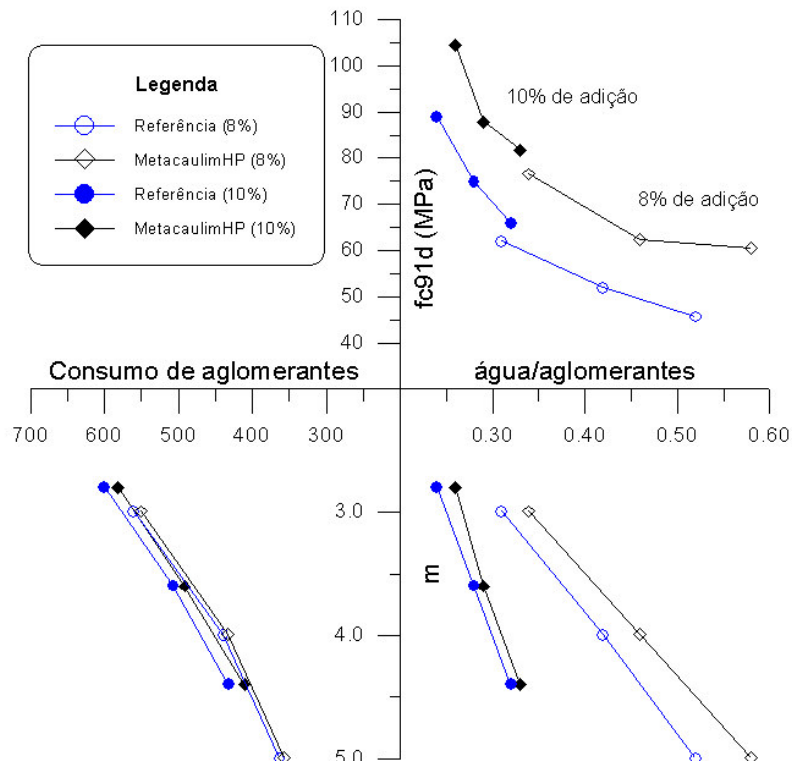


Figura 4-3 - Diagrama de dosagem dos concretos estudados para teores de adição de 8% e 10% (cura de 91 dias).



4.2 Resistência à compressão

Baseado na Figura 4-2 foram elaboradas a Tabela 4.1 e Tabela 4.2 para facilitar a análise dos resultados relativos ao caso dos concretos com o emprego de 8% e 10% de adição, respectivamente. Com estas tabelas fica fácil verificar que a adição de *MetacaulimHP* resultou em aumento da resistência à compressão por volta de 20%, se comparado com a série de concretos de referência.

Tabela 4.1 - Resistência à compressão, aos 28 dias de cura úmida, para uma mesma relação água/aglomerantes (relativo aos concretos com 8% de adição).

Relação a/agl.	Séries estudadas	Resistência à compressão (MPa)	Percentual de aumento (%)
0,35	Referência	57	---
	MetacaulimHP	67	18%
0,40	Referência	52	---
	MetacaulimHP	63	21%
0,45	Referência	48	---
	MetacaulimHP	61	27%
0,50	Referência	44	---
	MetacaulimHP	55	25%

Tabela 4.2 – Resistência à compressão, aos 28 dias de cura úmida, para uma mesma relação água/aglomerantes (relativo aos concretos com 10% de adição).

Relação a/ag.	Séries estudadas	Resistência à compressão (MPa)	Percentual de aumento (%)
0,25	Referência	74	---
	MetacaulimHP	90	22%
0,30	Referência	60	---
	MetacaulimHP	72	20%

A Figura 4-4 e Figura 4-5 apresentam a relação entre a resistência à compressão e o consumo de cimento dos concretos dosados com 8% e 10% de adição, respectivamente. É importante notar, pelas referidas figuras, que considerando um concreto com uma dada resistência à compressão aos 28 dias, o consumo de cimento diminui com o emprego do *MetacaulimHP*.

Para ilustrar esta questão, pode-se dizer, baseado na Figura 4-4, que para uma resistência à compressão aos 28 dias de 60 MPa, um concreto sem *MetacaulimHP* teria consumo de cimento de 555 kg/m³ enquanto o concreto com *MetacaulimHP* teria consumo de cimento de 435 kg/m³, ou seja, uma redução de 120 kg de cimento para cada m³ de concreto produzido.

Usando o mesmo tipo de raciocínio, mas analisando desta vez a Figura 4-5, pode-se dizer, por exemplo, que tomando como referência uma resistência à compressão aos 28 dias de 80 MPa, um concreto sem *MetacaulimHP* teria consumo de cimento de 560 kg/m³ enquanto o concreto com *MetacaulimHP* teria consumo de cimento de 425 kg/m³, ou seja, uma redução de 135 kg de cimento para cada m³ de concreto produzido.



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, n 83 CEP 05508-900 São Paulo SP
tel.: 55-(0)11- 3091-5359 / 5442 fax: 55-(0)11-3091-5544 www.poli.usp.br

Departamento de Engenharia de Construção Civil

Relatório Final

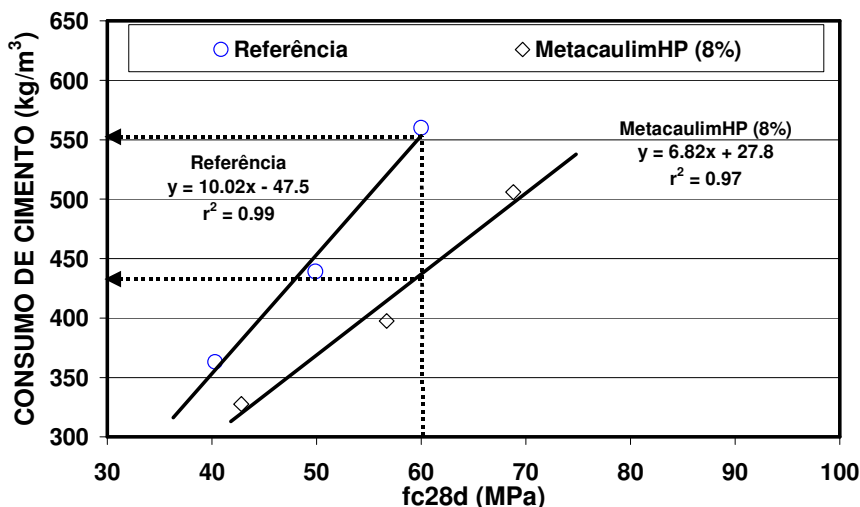


Figura 4-4 – Variação da resistência à compressão, aos 28 dias de cura úmida, com relação ao consumo de cimento dos concretos com 8% de adição.

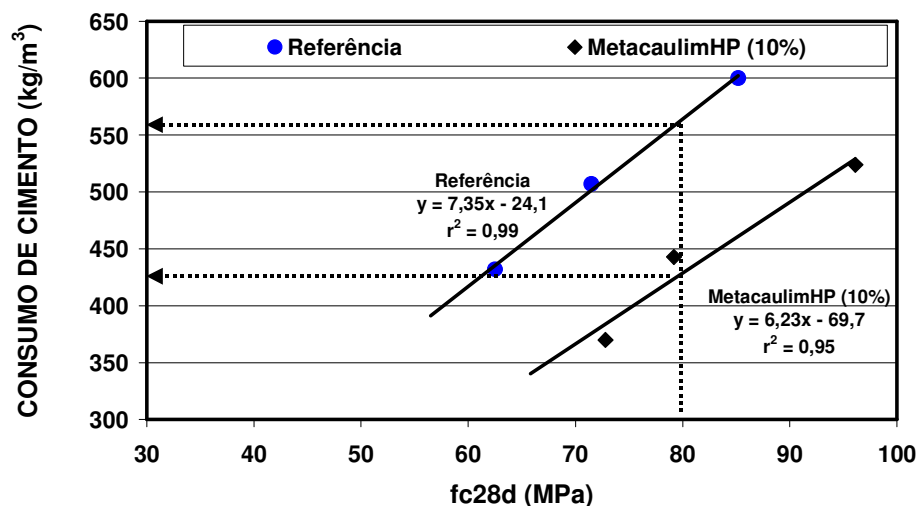


Figura 4-5 - Variação da resistência à compressão, aos 28 dias de cura úmida, com relação ao consumo de cimento dos concretos com 10% de adição.

Desse modo, baseado na Figura 4-4 e Figura 4-5, foram elaboradas a Figura 4-6 e Figura 4-7, que apresentam o consumo de cimento para três níveis de resistência à compressão aos 28 dias de cura úmida para 8% e 10% de adição, respectivamente.



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, n 83 CEP 05508-900 São Paulo SP
tel.: 55-(0)11- 3091-5359 / 5442 fax: 55-(0)11-3091-5544 www.poli.usp.br

Departamento de Engenharia de Construção Civil

Relatório Final

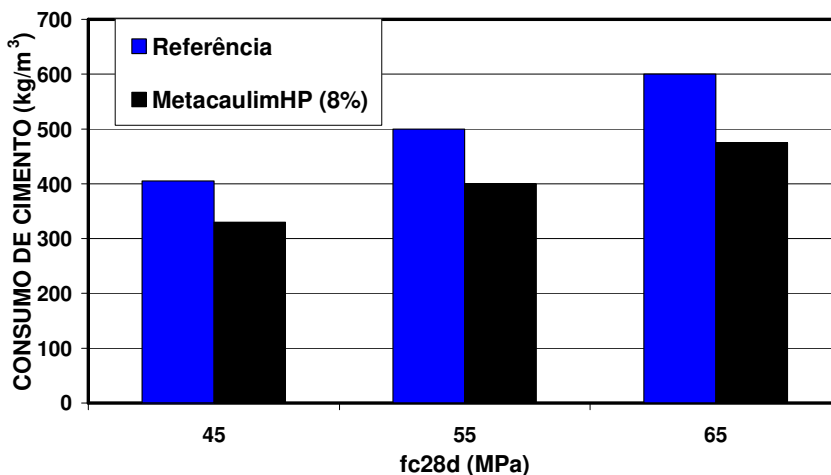


Figura 4-6 - Consumo de cimento da família de concretos com 8% de adição, para resistências à compressão fixadas.

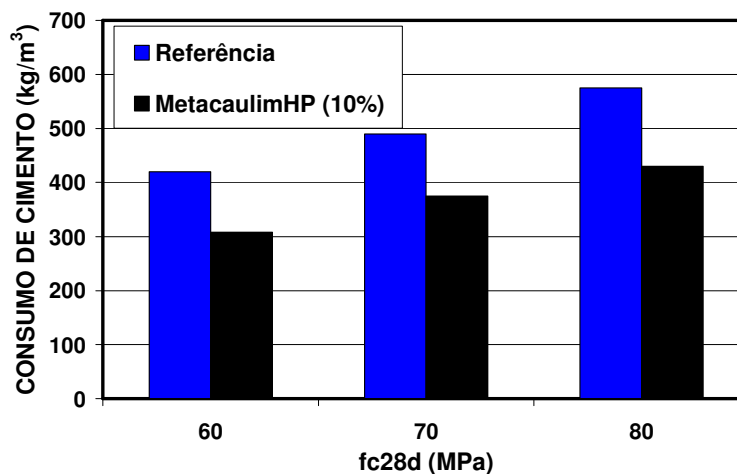


Figura 4-7 – Consumo de cimento da família de concretos com 10% de adição, para resistências à compressão fixadas.

Com a Figura 4-4 foi elaborada a Tabela 4.3, que se trata dos valores de resistência à compressão obtidos quando o consumo de cimento é fixado para o caso do emprego de 8% de adição. A última coluna representa o aumento de resistência provocado pela introdução do *MetacaulimHP*, merecendo destaque o fato que o incremento na resistência à compressão proporcionado por esta adição ficou na faixa de 20% a 30%.



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, n 83 CEP 05508-900 São Paulo SP
tel.: 55-(0)11- 3091-5359 / 5442 fax: 55-(0)11-3091-5544 www.poli.usp.br

Departamento de Engenharia de Construção Civil

Relatório Final

Tabela 4.3 - Resistência à compressão, aos 28 dias de cura úmida, para um mesmo consumo de cimento (relativo aos concretos com 8% de adição).

Consumo de cimento (kg/m ³)	Séries estudadas	Resistência à compressão (MPa)	Percentual de aumento (%)
350	Referência	40	---
	MetacaulimHP	48	20%
400	Referência	44	---
	MetacaulimHP	53	20%
450	Referência	49	---
	MetacaulimHP	61	24%
500	Referência	59	---
	MetacaulimHP	77	30%

A Tabela 4.4 é composta por dados extraídos da Figura 4-5, ou seja, se referem ao caso da adição de 10% de adição. É importante verificar que, fixando um dado consumo de cimento, o *MetacaulimHP* resultou em concretos com resistência à compressão aos 28 dias de 18 a 30 % maiores do que os concretos de referência (sem adição).

Tabela 4.4 – Resistência à compressão, aos 28 dias de cura úmida, para um mesmo consumo de cimento (relativo aos concretos com 10% de adição).

Consumo de cimento (kg/m ³)	Séries estudadas	Resistência à compressão (MPa)	Percentual de aumento (%)
450	Referência	64	0
	MetacaulimHP	83	30
500	Referência	72	0
	MetacaulimHP	92	28
550	Referência	78	0
	MetacaulimHP	96	23
600	Referência	83	0
	MetacaulimHP	100	20

4.3 Resistência à tração por compressão diametral

Com a Figura 4-8 e Figura 4-9, relativas a 8% e 10% de adição, respectivamente, verifica-se uma tendência positiva da adição de *MetacaulimHP*, onde se observa que fixado um dado consumo de cimento os valores de resistência à tração por compressão diametral tendem a ser bem superiores com o emprego do *MetacaulimHP*. Usando o raciocínio inverso, para um dado valor de resistência à tração aos 28 dias, o consumo de cimento necessário é menor quando se emprega a adição de *MetacaulimHP* do que no caso de não fazer uso desta adição.

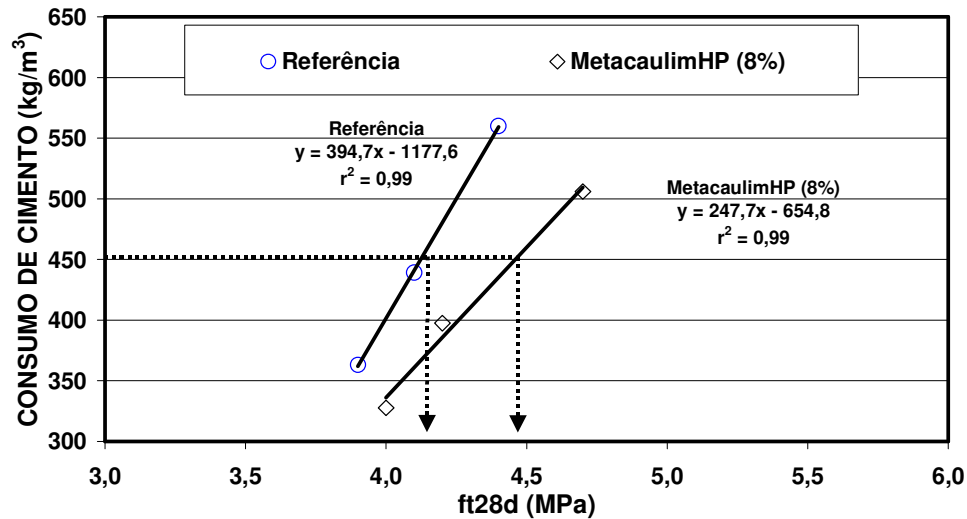


Figura 4-8 – Variação da resistência à tração por compressão diametral, aos 28 dias de cura úmida, com relação ao consumo de cimento dos concretos com 8% de adição.

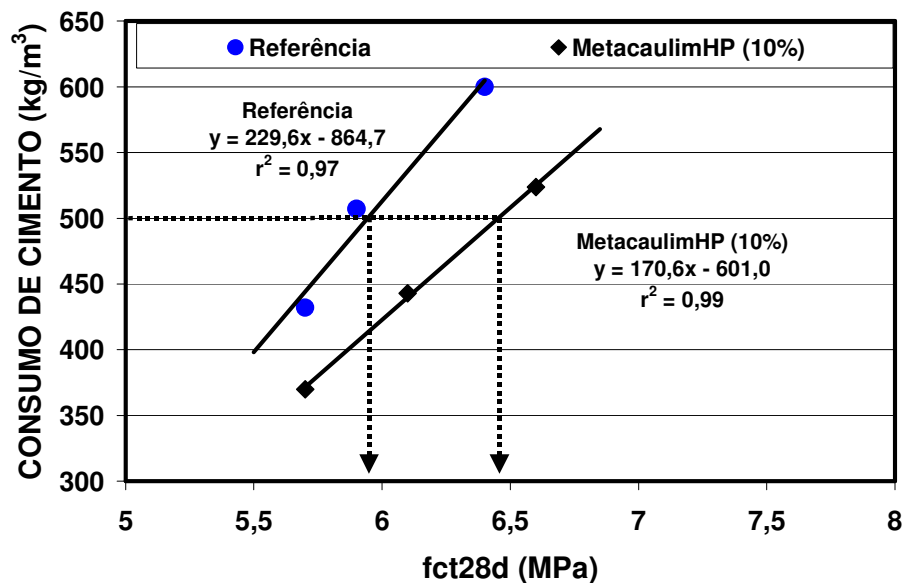


Figura 4-9 - Variação da resistência à tração por compressão diametral, aos 28 dias de cura úmida, com relação ao consumo de cimento dos concretos com 10% de adição.

4.4 Módulo de elasticidade

A Figura 4-10 e Figura 4-11 mostram, para a idade de 28 dias, a tendência de aumento do módulo de elasticidade com o emprego do *MetacaulimHP*, considerando um mesmo consumo de cimento. Este é um indicador de que o uso do *MetacaulimHP* proporciona a obtenção de concretos menos deformáveis, para uma mesma consistência e consumo de cimento considerados.

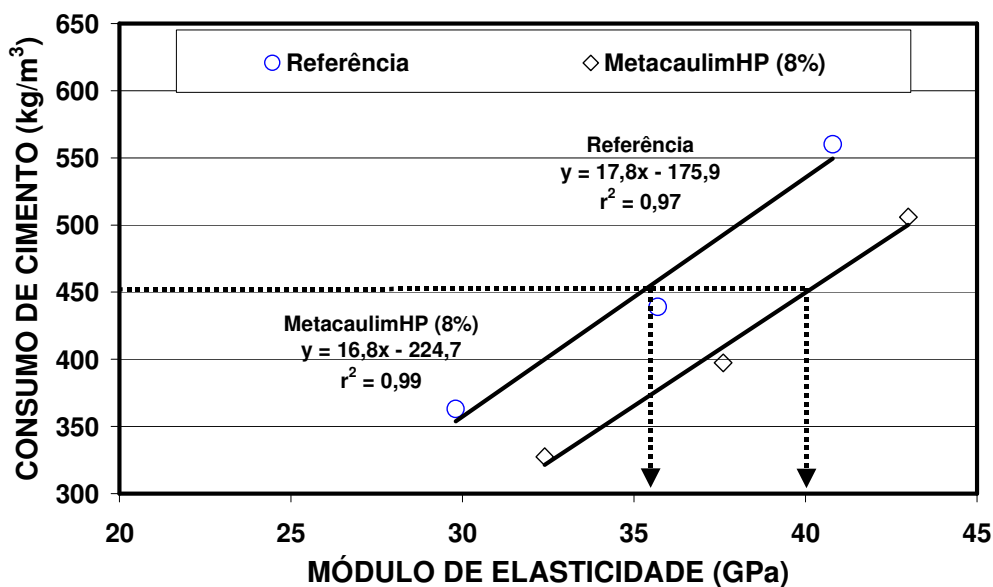


Figura 4-10 – Variação do módulo de elasticidade, aos 28 dias de cura úmida, com relação ao consumo de cimento dos concretos com 8% de adição.

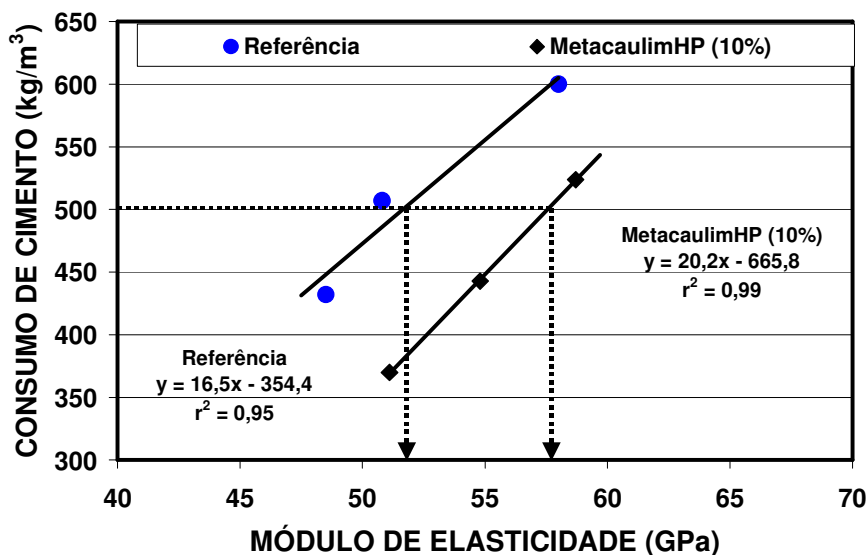


Figura 4-11 - Variação do módulo de elasticidade, aos 28 dias de cura úmida, com relação ao consumo de cimento dos concretos com 10% de adição.

4.5 Resistência à penetração de íons cloreto

A Figura 4-12 ilustra a considerável redução na penetração de íons cloreto proporcionada pela introdução do *MetacaulimHP* como adição nos concretos estudados. Esta redução é de importância extrema para o aumento da durabilidade do concreto, acarretando em grande benefício com relação ao aumento da vida útil das estruturas de concreto armado, uma vez que os íons cloretos consistem em um dos



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, n 83 CEP 05508-900 São Paulo SP
tel.: 55-(0)11- 3091-5359 / 5442 fax: 55-(0)11-3091-5544 www.poli.usp.br

Departamento de Engenharia de Construção Civil

Relatório Final

agentes de degradação do concreto mais importantes pelo efeito devastador que ele pode produzir em uma estrutura de concreto armado.

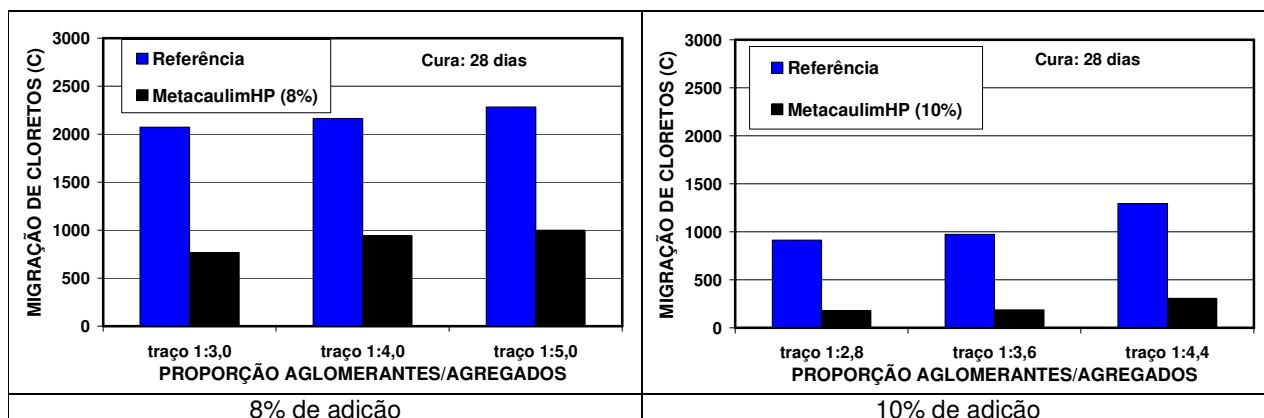


Figura 4-12 – Resistência à penetração de cloretos à 28 dias de cura úmida, para 8% e 10% de adição.

A Figura 4-13 e a Figura 4-14 ilustram muito bem o benefício trazido pela introdução do *MetacaulimHP* como adição para o concreto, uma vez que nela pode-se verificar que, para um mesmo consumo de cimento, a migração dos cloretos é extremamente inferior nos concretos com este tipo de adição. Isto indica que a adição de *MetacaulimHP* é totalmente indicada para concretos empregados em ambientes marinhos, onde a exposição aos íons cloretos é extrema.

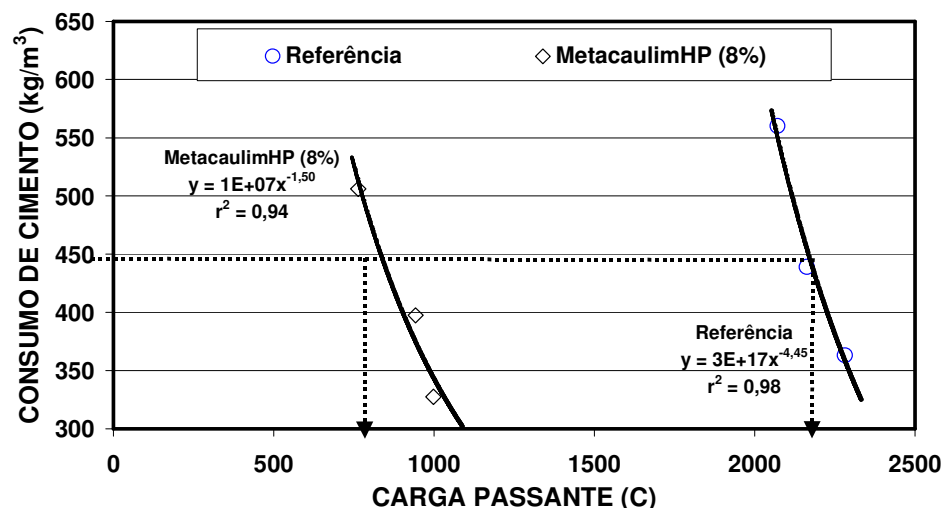


Figura 4-13 - Variação da carga passante, aos 28 dias de cura úmida, com relação ao consumo de cimento dos concretos com 8% de adição.

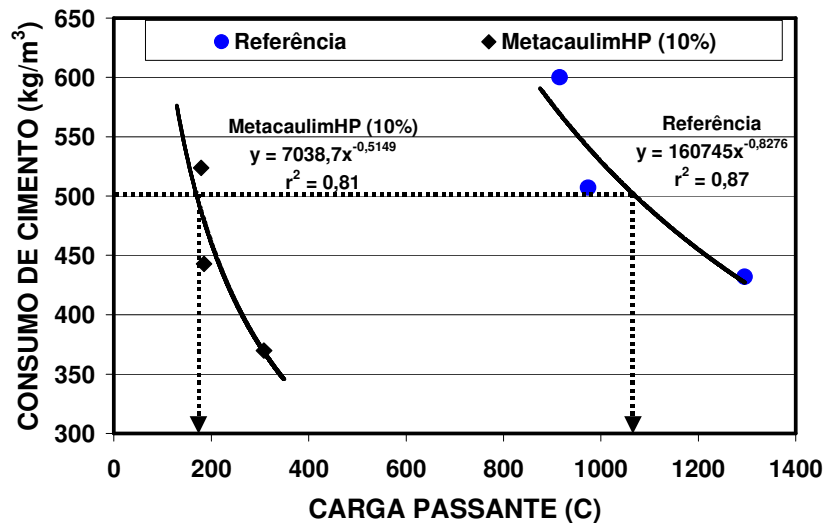


Figura 4-14 - Variação da carga passante, aos 28 dias de cura úmida, com relação ao consumo de cimento dos concretos com 10% de adição.

4.6 Absorção de água por imersão e índice de vazios

Tanto a absorção de água como a porosidade do concreto são parâmetros de importância primordial com relação a capacidade do concreto em barrar o ingresso de agentes agressivos, ou seja, são reguladores da durabilidade do concreto.

A Figura 4-15 e a Figura 4-16 indicam a considerável redução da absorção de água provocada pelo emprego do *MetacaulimHP* usado como adição com 8% e 10% de substituição do cimento, respectivamente. Os resultados deixaram muito clara a vantagem do emprego deste tipo de adição, resultando em concretos mais compactos e com menor absorção de água.

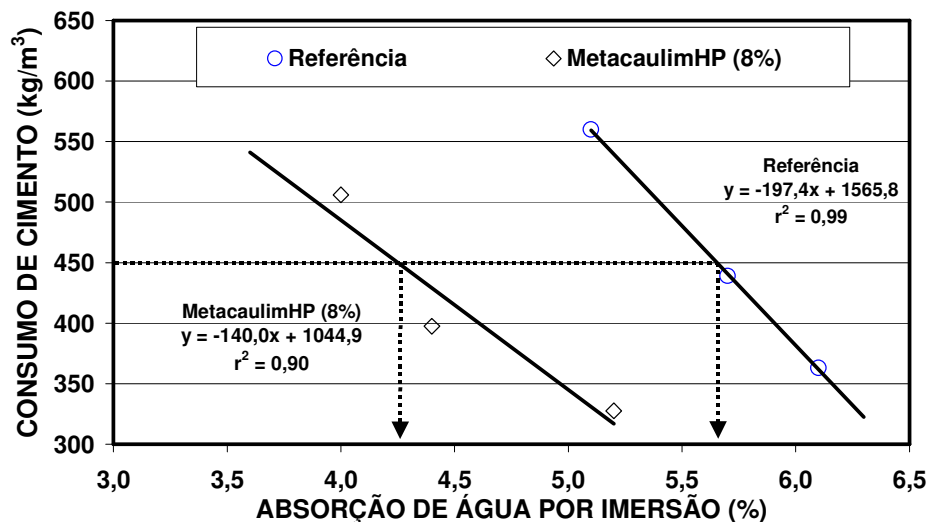


Figura 4-15 – Variação da absorção de água por imersão, aos 28 dias de cura úmida, com relação ao consumo de cimento dos concretos com 8% de adição.



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, n 83 CEP 05508-900 São Paulo SP
tel.: 55-(0)11- 3091-5359 / 5442 fax: 55-(0)11-3091-5544 www.poli.usp.br

Departamento de Engenharia de Construção Civil

Relatório Final

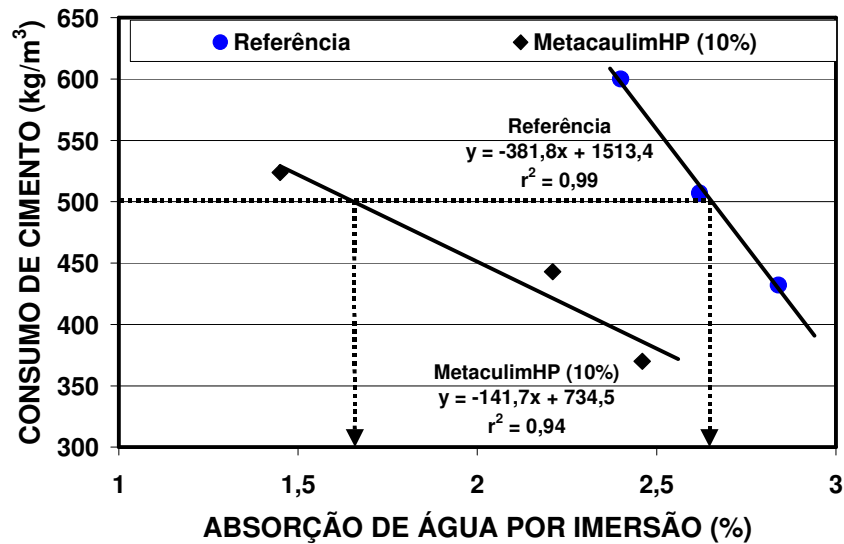


Figura 4-16 - Variação da absorção de água por imersão, aos 28 dias de cura úmida, com relação ao consumo de cimento dos concretos com 10% de adição.

Observando a Figura 4-17 e Figura 4-18 também é fácil notar a redução no índice de vazios proporcionada pela introdução do *MetacaulimHP* no programa de estudo.

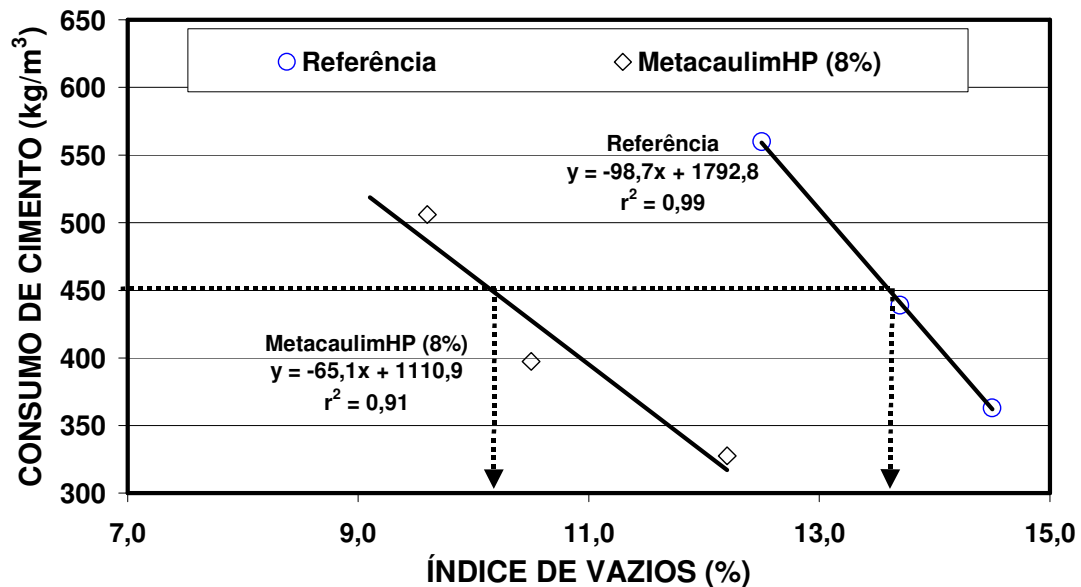


Figura 4-17 - Variação do índice de vazios, aos 28 dias de cura úmida, com relação ao consumo de cimento dos concretos com 8% de adição.

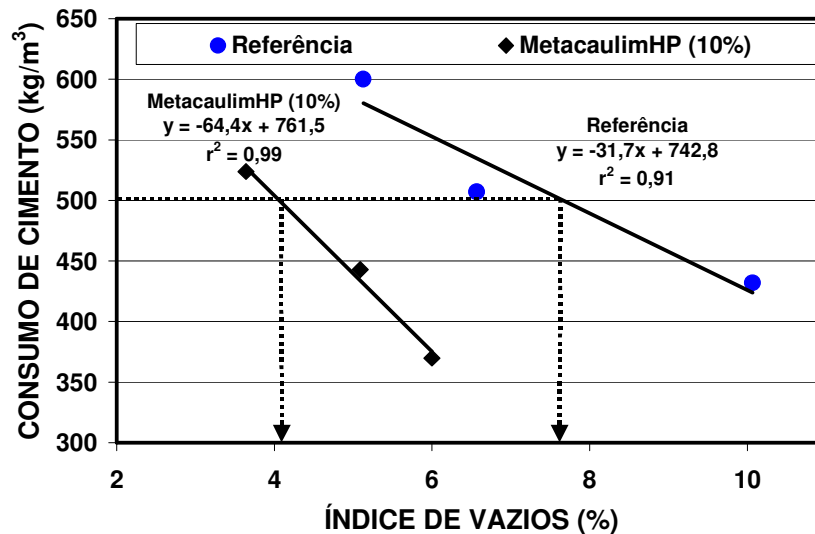


Figura 4-18 - Variação do índice de vazios, aos 28 dias de cura úmida, com relação ao consumo de cimento dos concretos com 10% de adição.

4.7 Permeabilidade de água sob pressão

A Figura 4-19 ilustra muito bem o alto grau de redução da permeabilidade do concreto proporcionado pelo emprego da adição de *MetacaulimHP*. Comparando a família de concretos com a adição de *MetacaulimHP* com a família de concretos de referência, a melhoria proporcionada pela introdução do *MetacaulimHP* é imensa, quando comparamos concretos com mesmo consumo de cimento (ver Figura 4-20).

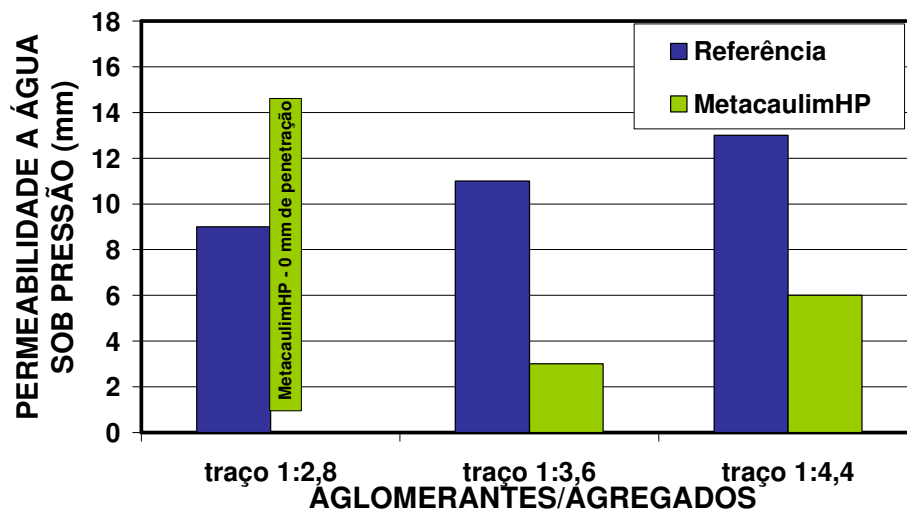


Figura 4-19 - Variação da permeabilidade a água sob pressão, aos 28 dias de cura úmida, com relação ao consumo de cimento dos concretos com 10% de adição.

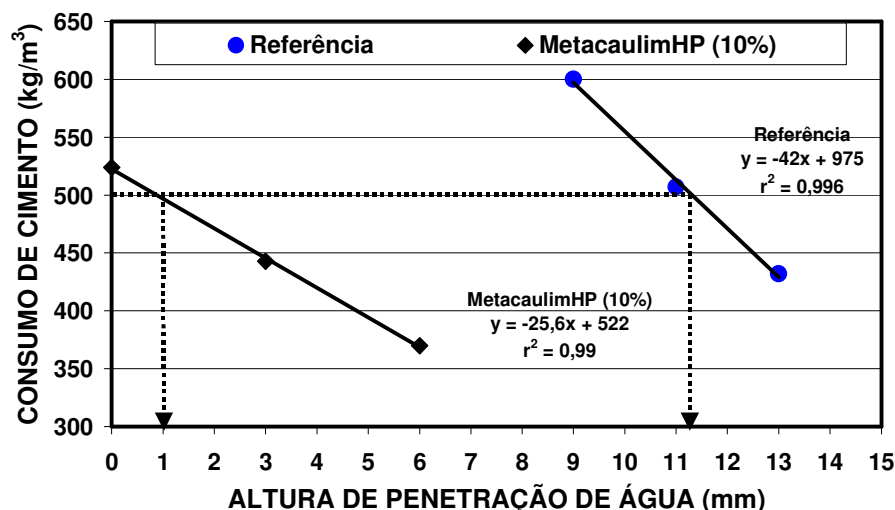


Figura 4-20 - Variação da altura de penetração de água, aos 28 dias de cura úmida, com relação ao consumo de cimento dos concretos com 10% de adição.

4.8 Resistividade elétrica

A resistividade elétrica de um concreto é uma propriedade primordial para a vida útil de uma estrutura de concreto armado. Após a despassivação da armadura, ela é um dos principais parâmetros controladores da velocidade de corrosão.

A Figura 4-21 e Figura 4-22 ilustram o aumento considerável da resistividade elétrica acarretado pela introdução do *MetacaulimHP* como adição para concreto. O resultado deste incremento é a obtenção de concretos potencialmente mais duráveis.

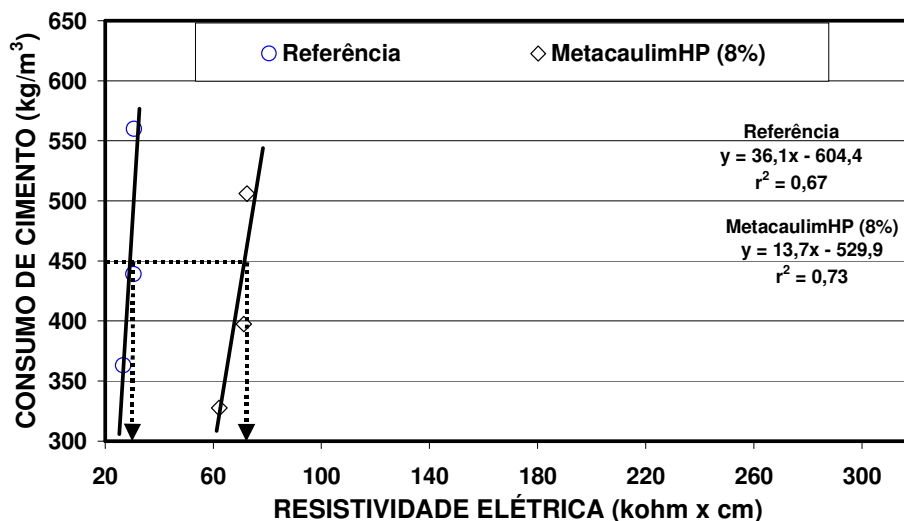


Figura 4-21 - Variação da resistividade elétrica superficial, aos 28 dias de cura úmida, com relação ao consumo de cimento dos concretos com 8% de adição.

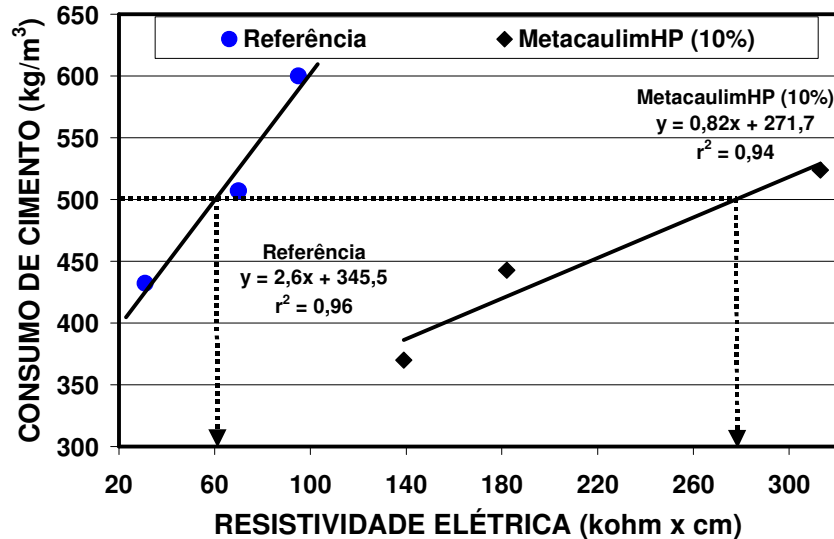


Figura 4-22 - Variação da resistividade elétrica superficial, aos 28 dias de cura úmida, com relação ao consumo de cimento dos concretos com 10% de adição.

4.9 Retração por secagem

A retração por secagem consiste em um importante indicador de desempenho para o concreto. Quanto menor for a tendência de um concreto retrair, seja em função da secagem ou por qualquer outro motivo, menor também é o risco de ocorrência de fissuras, que consistem em portas abertas para a penetração de agentes agressivos que venham estar presentes no meio ambiente. Isso sem falar no impacto estético que o surgimento de fissuras pode vir a proporcionar em uma edificação.

A Figura 4-23 mostra os resultados relativos a retração por secagem dos concretos que fizeram parte deste estudo. Verifica-se que a adição de *MetacaulimHP* resultou em menores valores de retração por secagem, principalmente no que se refere aos traços de concreto com proporção aglomerantes/agregados de 1:4,4.

É importante deixar claro que para um mesmo consumo de cimento considerado, a introdução do *MetacaulimHP* sempre resultou em uma redução da retração por secagem indicando ser este mais um ponto a favor ao uso deste tipo de adição. Esta questão está muito bem ilustrada na Figura 4-24.

Analisando com relação a resistência à compressão, a Figura 4-25 indica que tomando uma mesma resistência à compressão como referência a adição de *MetacaulimHP* se mostrou eficaz resultando em redução da retração por secagem.



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, n 83 CEP 05508-900 São Paulo SP
tel.: 55-(0)11- 3091-5359 / 5442 fax: 55-(0)11-3091-5544 www.poli.usp.br

Departamento de Engenharia de Construção Civil

Relatório Final

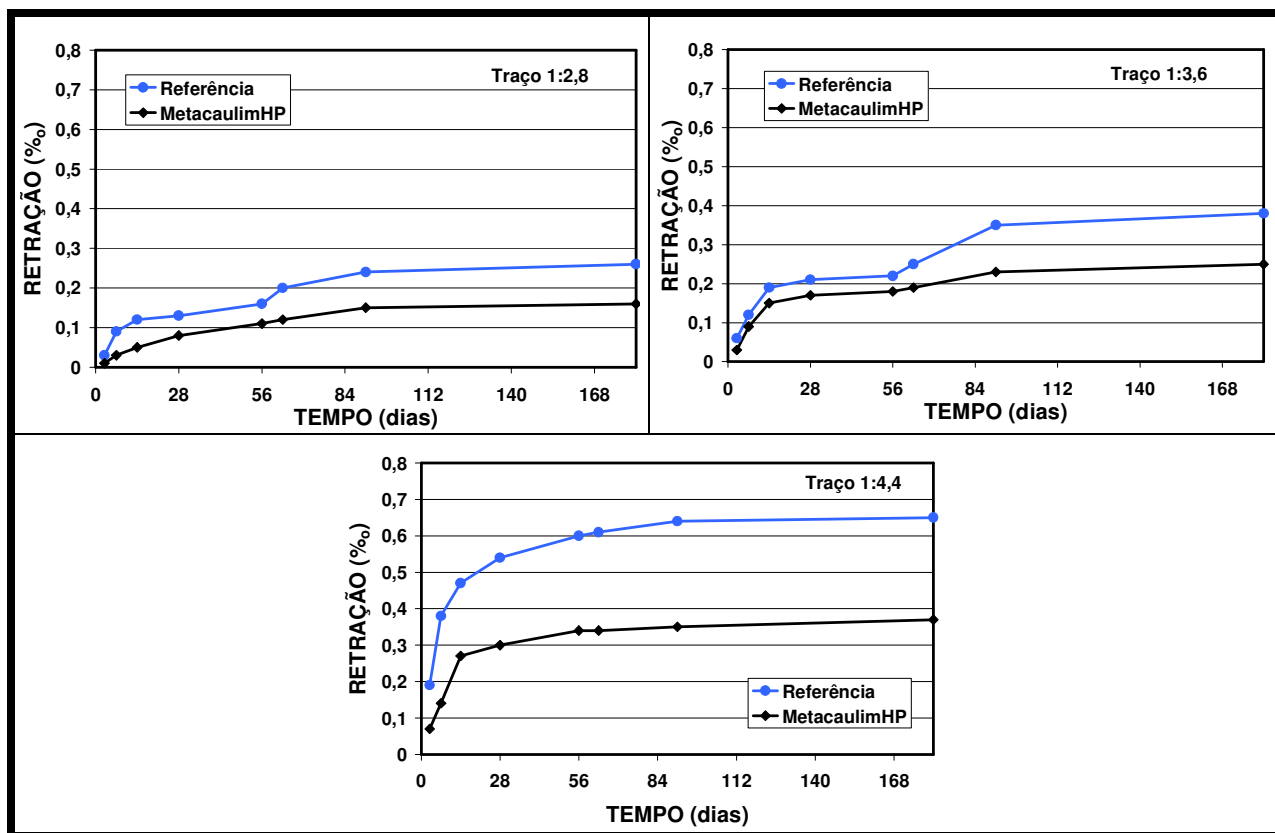


Figura 4-23 – Retração por secagem dos concretos com 10% de adição.

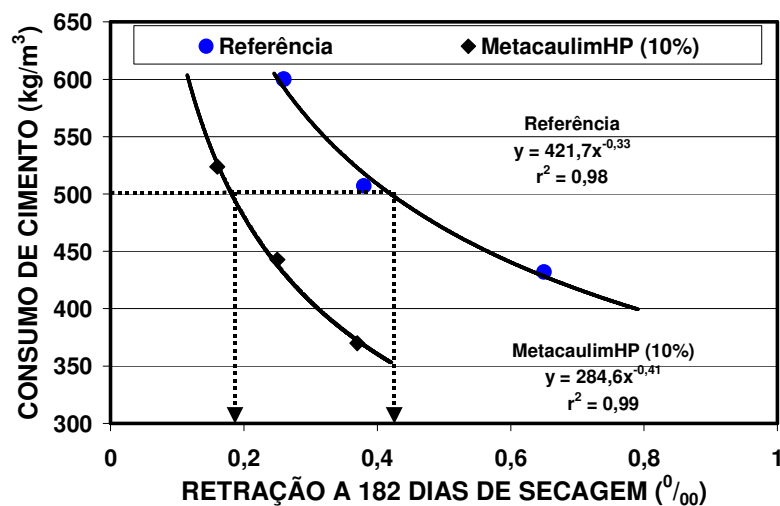


Figura 4-24 - Variação da retração por secagem referente a 182 dias de estocagem em câmara seca, para corpos-de-prova com 28 dias de cura úmida, com relação ao consumo de cimento dos concretos com 10% de adição.

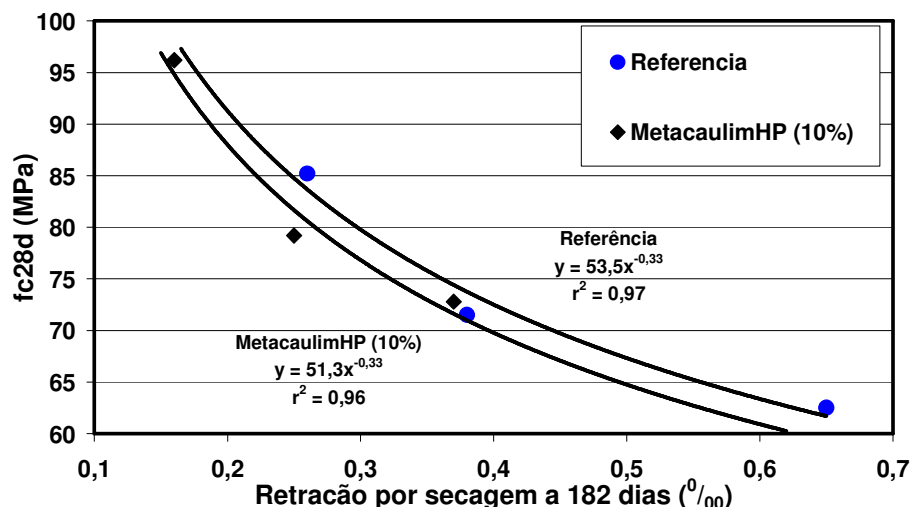


Figura 4-25 - Variação da retração por secagem com relação a resistência à compressão, para corpos-de-prova com 28 dias de cura úmida (10% de adição).

4.10 Inibição da reação álcali-agregado

A ASTM C 595/98 especifica que os cimentos adequados para utilização com agregados reativos são aqueles cuja expansão da argamassa no ensaio segundo ASTM C 441 apresente valores máximos de 0,02% aos 14 dias e 0,06% aos 56 dias, como indicado na Figura 4-26, que, além destes limites, apresenta a evolução da variação dimensional das barras de argamassa com o tempo de cura. O proporcionamento das argamassas citadas seguiu o indicado na ASTM C 595/98 e encontra-se apresentado na Tabela 3.7. Tratam-se de argamassas confeccionadas com vidro pyrex como agregado miúdo. Este é um agregado com alto potencial de reatividade, sendo apropriado para este tipo de verificação.

Com base nos resultados apresentados, ficou clara a capacidade de inibição da reação álcali-agregado que a adição de *MetacaulimHP* apresenta, já que ela fez com que o cimento CP V ARI PLUS RS, com grande potencial de reatividade álcali-agregado, se tornasse um aglomerante totalmente apto para emprego em concretos com agregados potencialmente reativos.

Observa-se pelos resultados excelentes mostrados na Figura 4-26, que o *MetacaulimHP* é muito eficiente no controle das reações expansivas causadas pela reação álcali-agregado, sendo recomendado para situações de agregados potencialmente reativos em presença de umidade, tais como barragens, obras hidráulicas, fundações úmidas, galerias de águas pluviais e de esgotos, reservatórios, piscinas e outras.

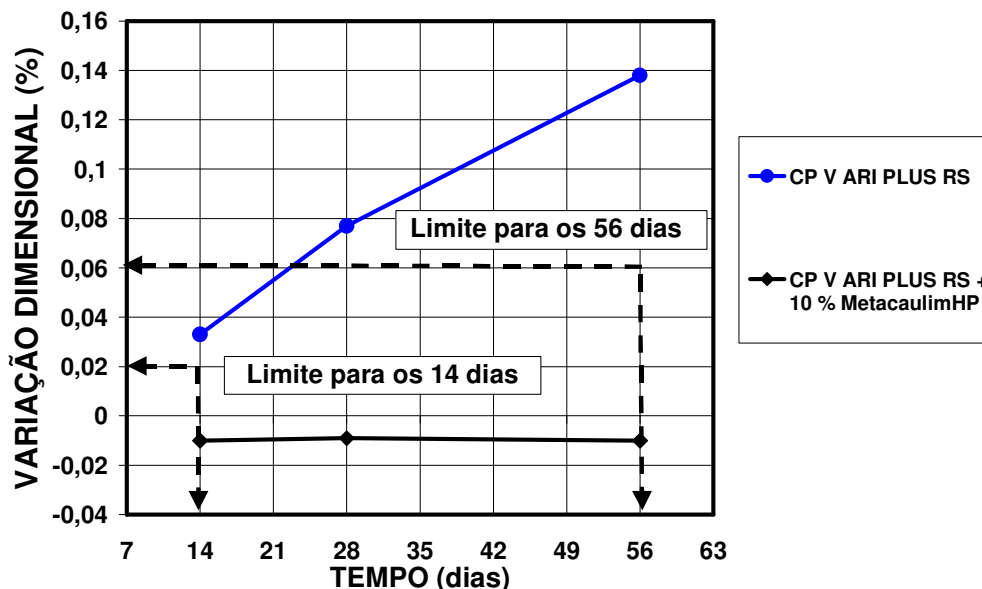


Figura 4-26 – Curva de variação dimensional dos corpos-de-prova ao longo do tempo (10% de adição).

4.11 Resistência ao ataque por sulfatos

A NBR 13583 não especifica um valor limite para os resultados deste ensaio, contudo, a ABCP baseada em sua ampla experiência no estudo de aglomerantes, adota e recomenda o valor 0,030% como critério para definir cimentos resistentes a sulfatos.

A Figura 4-27 ilustra a variação dimensional das barras de argamassa com a idade de cura. É importante salientar que em nenhum dos casos o patamar de 0,030% estabelecido pela ABCP foi atingido. Isso já era esperado, já que o cimento empregado neste estudo é resistente a sulfatos. Contudo, vale salientar que a adição do *MetacaulimHP* resultou em melhora quanto ao ataque por sulfatos. Essa melhora provavelmente seria mais insinuada, se o cimento aqui empregado não fosse resistente a sulfato.

Observa-se pelos resultados mostrados na Figura 4-27, que o *MetacaulimHP* é eficiente no controle das reações expansivas causadas pela reação com sulfatos. Desse modo, o *MetacaulimHP* é um material de construção facilmente disponível no Brasil, que possui uma boa capacidade de proteção contra os riscos de reações deletérias frente a ambientes ricos em sulfatos, ou seja, solos contaminados, esgotos, águas industriais, águas de mar, e outras.



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, n 83 CEP 05508-900 São Paulo SP
tel.: 55-(0)11- 3091-5359 / 5442 fax: 55-(0)11-3091-5544 www.poli.usp.br

Departamento de Engenharia de Construção Civil

Relatório Final

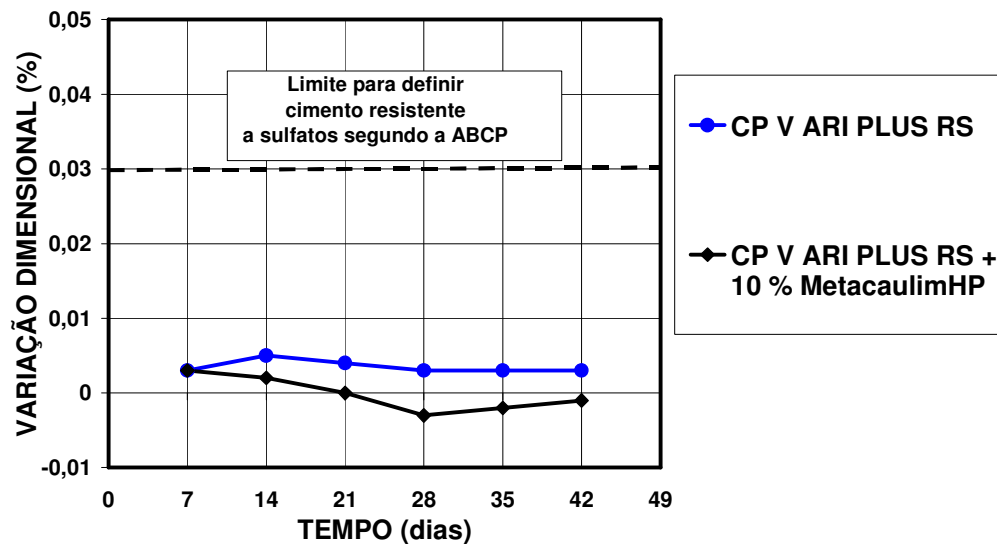


Figura 4-27 – Variação dimensional com o tempo para os corpos-de-prova de argamassa submetidos ao ensaio de resistência ao ataque por sulfatos (10% de adição).



5 OUTROS ESTUDOS

5.1 CONCRETO PROJETADO POR VIA SECA (CPVS)

O estudo aqui apresentado foi realizado sob a supervisão do Professor Dr. Antônio Figueiredo com a colaboração do Eng. Charles Lacerda e do Eng. Guilherme Gallo.

5.1.1 Objetivo

O objetivo principal foi o de fazer um estudo da vantagem que se pode ter com o emprego da adição do *MetacaulimHP* em um concreto projetado por via seca.

A reflexão do concreto projetado via seca é o aspecto que pode ser apontado como um dos principais fatores limitantes do CPVS, cujo volume de perdas é sempre maior que o do concreto projetado por via úmida (FIGUEIREDO, 1992). Assim, a redução da reflexão representa um grande ganho para o CPVS em termos de otimização de processo e de custo. Por outro lado, o uso do *MetacaulimHP* proporciona a possibilidade de aumento da resistência mecânica, desse modo, pode-se obter uma economia global ainda maior dada à possibilidade de redução da espessura dos revestimentos. Com o objetivo de avaliar estes dois principais aspectos, foi realizado um estudo experimental de dosagem do CPVS, o qual se encontra descrito a seguir.

5.1.2 Introdução

Este trabalho apresenta um estudo de dosagem do concreto projetado por via seca (CPVS) com o uso de *MetacaulimHP*. Já é conhecido a bom tempo o incremento de desempenho que se pode obter com a utilização de adições pozolânicas de elevada finura no concreto projetado por via seca, como é o caso da sílica ativa que, entre outros benefícios, proporciona aumento da resistência mecânica e coesão (diminuindo deslocamentos) e reduzindo intensamente a reflexão do material (SILVA, 1993; MORGAN, 1988).

Neste trabalho apresenta-se um estudo para constatar o potencial das vantagens que o *MetacaulimHP* pode vir a proporcionar quando aplicado em um CPVS.

5.1.3 Metodologia

A metodologia de dosagem do CPVS não obedece às mesmas diretrizes adotadas para a dosagem do concreto plástico convencional. Como é um concreto de reologia seca, a lei de Abrams não é aplicável ao CPVS, isto é, a maior compacidade e resistência mecânica do material não são obtidas pela redução da relação água/cimento. A primeira metodologia de dosagem experimental para o CPVS foi recentemente proposta por PRUDÊNCIO (1993) sofrendo alguns ajustes posteriormente (FIGUEIREDO, 1997). Assim, optou-se por utilizar as diretrizes básicas dessa metodologia para a correta avaliação do CPVS com a incorporação de *MetacaulimHP*. Dessa forma, o plano experimental foi desenvolvido e executado variando-se o consumo de cimento e o teor de *MetacaulimHP*. O cimento escolhido para o teste foi o CPIII 40 Votoran, em conjunto com uma areia média lavada de rio e



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, n 83 CEP 05508-900 São Paulo SP
tel.: 55-(0)11- 3091-5359 / 5442 fax: 55-(0)11-3091-5544 www.poli.usp.br

Departamento de Engenharia de Construção Civil

Relatório Final

um agregado de dimensão máxima característica de 9,5 mm. Um resumo da qualificação dos materiais empregados no estudo encontra-se apresentado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Materiais utilizados no estudo.

MATERIAL	TIPO	PROCEDÊNCIA
Cimento	CP III 40	Votoran Cimentos
Areia	Média	Arevale
Brita	Zero	Engexplo
Metacaulim	<i>MetacaulimHP</i>	Metacaulim do Brasil

O proporcionamento dos traços utilizados em cada projeção encontra-se apresentado na Tabela 5.2. Para cada traço em estudo foi moldada uma placa, conforme o apresentado na Figura 5-1, seguindo os procedimentos recomendados pela NBR 13070. Procurou-se manter as placas com uma inclinação máxima de 15° e elevadas em relação ao solo para representarem melhor as condições de projeção numa parede vertical de túnel ou talude e minimizar o efeito de re-incorporação da reflexão (FIGUEIREDO, 1997).

Tabela 5.2 – Traços utilizados para as moldagens de placas.

Especificação	Consumo (Kg/m ³)			Consumo (Kg/m ³) e teor em relação à massa de cimento	Traço *
	Cimento	Areia	Pedrisco	<i>MetacaulimHP</i>	
0-300	300	1136	609	0 (0 %)	1:3,79:2,03
5-300	285	1134	609	15 (5%)	1:3,78:2,03
10-300	270	1132	609	30 (10 %)	1:3,77:2,03
0-400	400	1002	631	0 (0 %)	1:2,50:1,58
5-400	380	999	631	20 (5 %)	1:2,50:1,58
10-400	360	996	631	40 (10 %)	1:2,50:1,58
0-500	500	869	652	0 (0 %)	1:1,74:1,30
5-500	475	866	652	25 (5 %)	1:1,73:1,30
10-500	450	863	652	50 (10 %)	1:1,73:1,30

* Aglomerantes totais: areia: pedrisco



Figura 5-1 – Montagem utilizada para a moldagem das placas.



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, n 83 CEP 05508-900 São Paulo SP
tel.: 55-(0)11- 3091-5359 / 5442 fax: 55-(0)11-3091-5544 www.poli.usp.br

Departamento de Engenharia de Construção Civil

Relatório Final

Todas as placas utilizadas neste estudo foram moldadas em um único dia, utilizando-se do mesmo equipamento (máquina de projeção via seca a rotor com capacidade nominal de 3 m³/h da marca Este) que se encontra apresentado na Figura 5-2. Também apenas uma equipe de projeção foi utilizada, sendo um único mangoteiro encarregado do serviço de projeção. Para cada placa moldada efetuou-se a coleta do material refletido para determinação do índice de reflexão em placas segundo a metodologia proposta pela NBR13354.



Figura 5-2 – Máquina de projeção via seca utilizada no procedimento experimental.

As condições homogêneas de projeção foram verificadas pela determinação da consistência do concreto recém projetado, o que foi feito segundo a NBR 14278. Após as moldagens, foi acompanhada a evolução da resistência inicial através do penetrômetro de profundidade constante (PRUDÊNCIO, 1993), conforme está ilustrado na Figura 5-3. As placas foram removidas de suas posições após atingirem 1 MPa de resistência à compressão determinada pelo ensaio do penetrômetro referido anteriormente.

Após a pesagem das placas (para determinação do índice de reflexão) as mesmas foram umedecidas até completarem 24 horas de idade, quando se deu início à extração de testemunhos cilíndricos, que procurou atender a NBR 7680. Os corpos-de-prova foram identificados e encaminhados para a câmara úmida onde permaneceram até a data de ensaio. No dia anterior à determinação da resistência à compressão (NBR 5739), os corpos-de-prova tiveram seus topos regularizados, com corte e faceamento, em equipamentos especiais. Finalmente, alguns corpos-de-prova foram selecionados para determinação dos valores de massa específica, volume de vazios permeáveis e absorção de água por imersão e fervura (ASTM C642). Foram utilizados três corpos-de-prova por determinação, tanto para resistência a compressão como para os índices de compacidade.



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, n 83 CEP 05508-900 São Paulo SP
tel.: 55-(0)11- 3091-5359 / 5442 fax: 55-(0)11-3091-5544 www.poli.usp.br

Departamento de Engenharia de Construção Civil

Relatório Final



Figura 5-3 – Realização do ensaio com o penetrômetro de profundidade constante para determinação da evolução de resistência inicial.

5.1.4 Resultados

Os resultados obtidos para a consistência do concreto via seca recém projetado e os valores de reflexão medidos nas placas encontram-se apresentados na Tabela 5.3. Os resultados obtidos para a evolução da resistência inicial, através do penetrômetro de profundidade constante (PRUDÊNCIO, 1993) encontram-se apresentados na Tabela 5.4. Os valores obtidos para a resistência à compressão encontram-se apresentados na Tabela 5.5 e os resultados medidos para a absorção por imersão e fervura, massa específica e volume de vazios permeáveis encontram-se apresentados na Tabela 5.6.

Tabela 5.3 – Resultados obtidos para a consistência (NBR 14278) e reflexão do concreto projetado medida em placas (NBR 13354).

PLACA	Consumo de Aglomerantes (Kg/m ³)	Teor de MetacaulimHP em substituição à massa de cimento (%)	Consistência (MPa)	Reflexão (%)
0-300	300	0	1,2	27,6
5-300		5	1,6	25,8
10-300		10	1,2	20,4
0-400	400	0	1,4	21,9
5-400		5	1,3	19,5
10-400		10	1,6	18,9

Tabela 5.4 – Resultados obtidos para a evolução de resistência inicial.

PLACA	ATRITO	VALOR					
0-300	Intervalo (hh:mm)	3:50	4:50	5:30	6:00	6:30	---
	Resistência (MPa)	0,32	0,61	0,75	0,83	1015	---
5-300	Intervalo (hh:mm)	3:25	4:25	5:05	5:35	6:05	---
	Resistência (MPa)	0,34	0,85	0,88	1,06	1,15	---
10-300	Intervalo (hh:mm)	3:05	4:05	4:40	5:10	5:40	6:10
	Resistência (MPa)	0,23	0,78	0,78	0,86	1,02	1,15
0-400	Intervalo (hh:mm)	2:40	3:40	4:05	---	---	---
	Resistência (MPa)	0,34	1,08	1,15	---	---	---
5-400	Intervalo (hh:mm)	2:25	3:25	3:50	---	---	---
	Resistência (MPa)	0,36	1,06	1,15	---	---	---
10-400	Intervalo (hh:mm)	2:15	3:00	3:20	---	---	---
	Resistência (MPa)	0,52	0,83	1,08	---	---	---



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, n 83 CEP 05508-900 São Paulo SP
tel.: 55-(0)11- 3091-5359 / 5442 fax: 55-(0)11-3091-5544 www.poli.usp.br

Departamento de Engenharia de Construção Civil

Relatório Final

Tabela 5.5 – Resultados obtidos para a resistência à compressão (NBR 5739) do concreto projetado via seca a partir de testemunhos cilíndricos extraídos das placas (NBR 7680).

PLACA	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)		
	3 dias de idade	7 dias de idade	35 dias de idade
0-300	14,51	19,35	24,04
5-300	15,34	23,04	27,85
10-300	15,14	18,73	22,96
0-400	22,9	30,89	32,76
5-400	25,25	33,89	34,16
10-400	23,23	26,58	28,90

Tabela 5.6 – Resultados obtidos para massa específica, absorção por imersão e fervura e volume de vazios permeáveis (ASTM C642), aos 35 dias de idade.

PLACA	Absorção por imersão e fervura (%)	Massa específica (Kg/m ³)	Índice de vazios (%)
0-300	7,86	2,26	16,48
5-300	7,93	2,27	16,68
10-300	8,93	2,26	18,56
0-400	6,47	2,31	14,07
5-400	7,31	2,32	15,82
10-400	7,98	2,30	17,02

5.1.5 Análise dos resultados

5.1.5.1 Consistência e reflexão

Através dos resultados obtidos durante o procedimento experimental e que encontram-se apresentados na Tabela 5.3, pode-se concluir que não houve variação significativa nas condições de moldagem para a grande maioria das placas, como atestam os valores obtidos para a consistência do CPVS. Como, no caso do CPVS, a consistência é alterada pela umidificação proporcionada pelo mangoteiro, houve a preocupação de se manter uma constância nessa variável interveniente de modo que não afetasse as condições de compactação do material e o nível de reflexão (FIGUEIREDO, 1992). Foram então correlacionados os valores de reflexão e teor de metacaulim utilizado como substituição ao cimento, conforme apresentado na Figura 5-4. O fato de o metacaulim ter sido utilizado como substituição ao cimento e não simplesmente como adição, evitou a possibilidade da redução da reflexão estar ligada ao aumento do teor de finos do material (FIGUEIREDO, 1992), o que poderia levar à conclusão que resultado semelhante seria obtido com o mero aumento do teor de cimento. Observa-se, pelos elevados coeficientes de correlação apresentados na Figura 5-4 que a reta representa bem o fenômeno e, tomando-se como referência a correlação média, pode-se dizer que é esperada uma redução de 10% no índice de reflexão do CPVS quando se adiciona 5% de metacaulim em substituição ao cimento e uma redução de 15% quando se substitui 10% da massa de cimento por metacaulim, sem incorrer numa superestimativa do potencial do material.

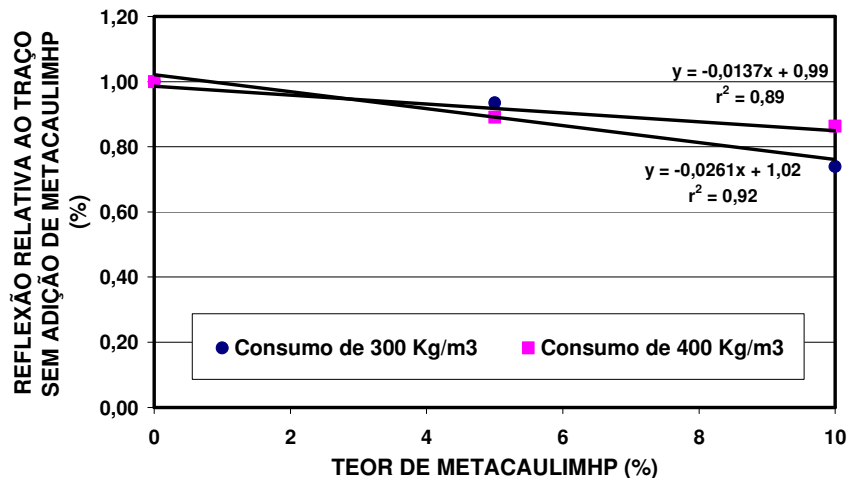


Figura 5-4 – Correlação entre a reflexão relativa do CPVS medida em placas com o teor de metacaulim.

5.1.5.2 Resistência inicial

A análise do efeito da incorporação o metacaulim na resistência inicial do CPVS é facilitada pela observação da Figura 5-5 e Figura 5-6. Apesar do efeito pozolânico ocorrer após a hidratação do cimento, o efeito de micro-filler do metacaulim acabou por evitar que seu uso prejudicasse a evolução de resistência inicial do CPVS. Verifica-se que a tendência geral, para ambos os consumos de cimento, foi a placa moldada sem metacaulim apresentar um desempenho ligeiramente inferior às placas que receberam a incorporação do mesmo. Logo, pode-se esperar que o metacaulim proporcione uma evolução de resistência inicial mais acentuada para o CPVS, dado que este comportamento não parece estar ligado ao comportamento químico do material. Percebe-se que o maior consumo de aglomerantes propiciou também uma aceleração do ganho de resistência inicial como era o esperado. Assim, pode-se concluir que o uso de metacaulim propicia melhores condições de projeção por aumentar a coesão do material e não prejudicar a evolução de resistência inicial.

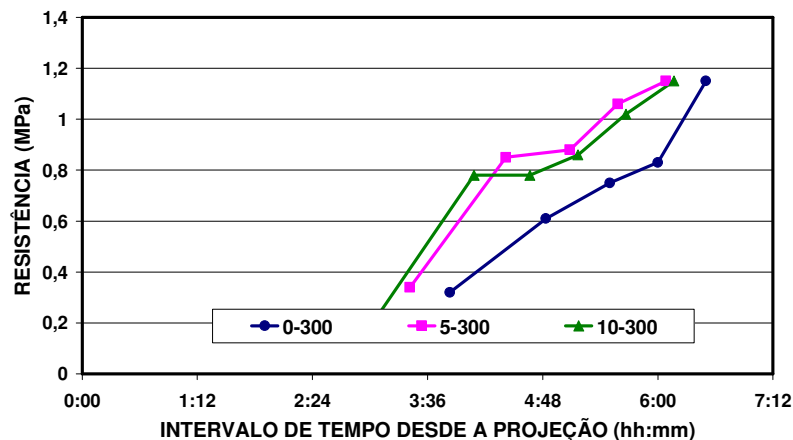


Figura 5-5 – Evolução da resistência inicial para as placas com consumo de aglomerantes de 300 Kg/m³.

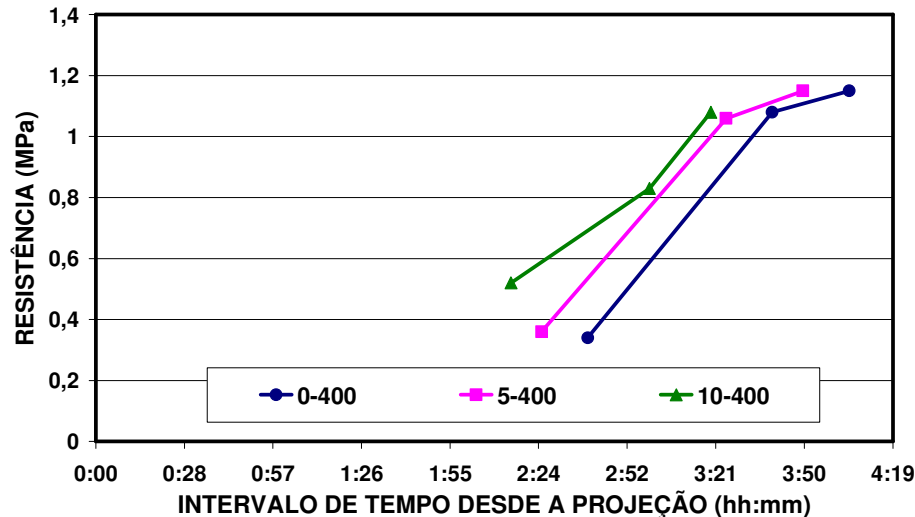


Figura 5-6 - – Evolução da resistência inicial para as placas com consumo de aglomerantes de 400 Kg/m³.

5.1.5.3 Resistência à compressão

Para facilitar a análise dos resultados obtidos para a resistência à compressão foram produzidos os gráficos apresentados na Figura 5-7 e Figura 5-8. Nelas encontram-se as evoluções de resistência à compressão, com a idade, para os diferentes consumos de aglomerantes.

O comportamento observado para ambos os consumos foi muito semelhante. Em todos os consumos, o teor de 5% de metacaulim em substituição ao cimento foi o que apresentou o melhor desempenho. Já o teor de 10% esteve muito próximo dos resultados obtidos com CPVS sem metacaulim, mas ligeiramente abaixo em termos de valores médios para as idades de 7 e 35 dias. Para os três dias de idade, os valores de resistência à compressão com o teor de 10% de metacaulim proporcionou um certo ganho de resistência para todos os consumos de aglomerantes totais utilizados no experimento. Pode-se concluir que a incorporação de 5% de metacaulim em substituição à massa de cimento proporcionou um aumento de 10% na resistência à compressão do concreto projetado em relação àquela obtida sem o uso do mesmo. Já a incorporação de 10% de metacaulim em substituição à massa de cimento provocou um aumento de 4% na resistência do concreto aos 3 dias de idade e, por outro lado, esta mesma incorporação reduziu em cerca de 6% a resistência do CPVS nas idades de 7 e 35 dias. Esta tendência de redução de resistência nas maiores idades é contrária às expectativas, já que a atividade pozolânica do metacaulim acaba por ocorrer após as reações de hidratação do cimento que irão produzir o hidróxido de cálcio necessário para a produção do C-S-H secundário (originado da reação pozolânica). Pode-se justificar essa redução na resistência pela menor compactação obtida para o material durante a projeção, o que está demonstrado pelos índices de compactidade obtidos neste experimento.

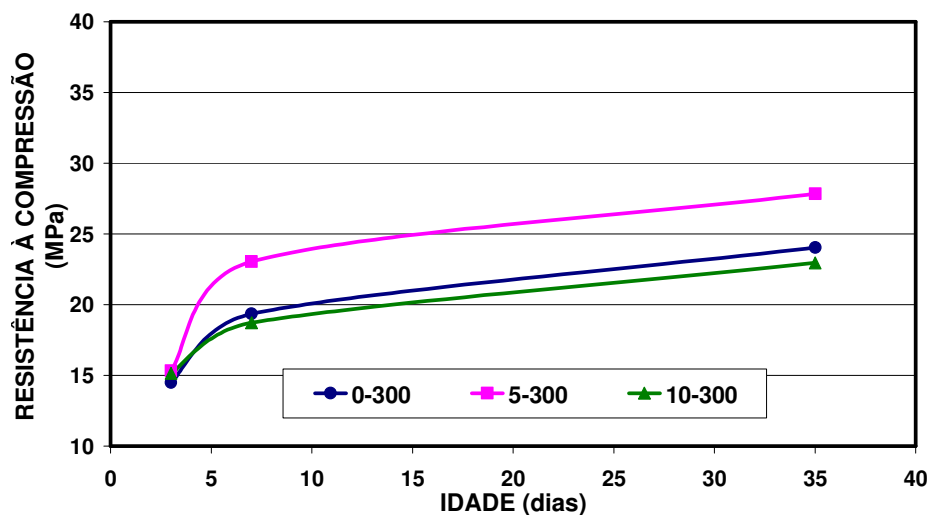


Figura 5-7 – Evolução da resistência à compressão para os concretos com consumo de aglomerantes de 300 Kg/m³.

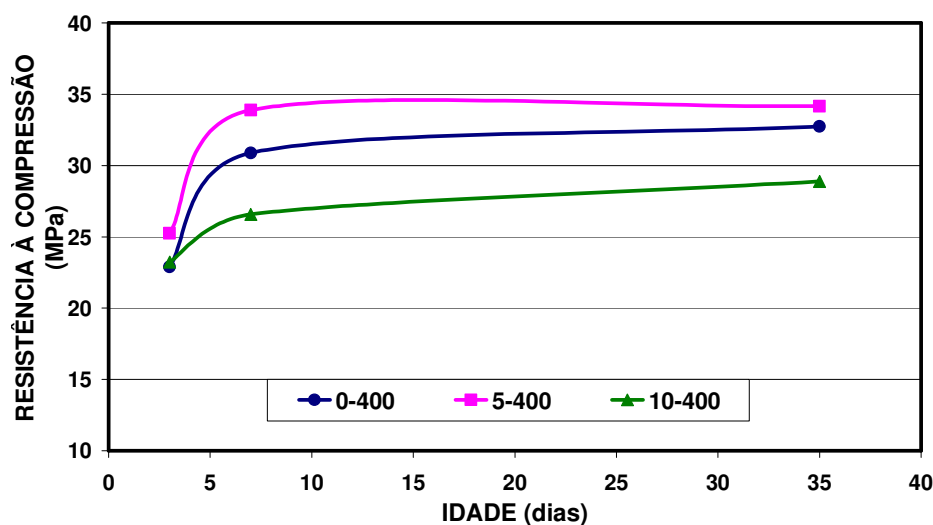


Figura 5-8 - Evolução da resistência à compressão para os concretos com consumo de aglomerantes de 400 Kg/m³.

5.1.5.4 Avaliação da dosagem

Utilizando-se o modelo proposto por PRUDÊNCIO (1993), foi realizada uma avaliação para a dosagem do material estabelecendo correlações entre a resistência à compressão do material e o valor de “m” (teor de agregados no traço do CPVS). Para melhor visualização do procedimento, os dados utilizados encontram-se apresentados na Tabela 5.7.



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, n 83 CEP 05508-900 São Paulo SP
tel.: 55-(0)11- 3091-5359 / 5442 fax: 55-(0)11-3091-5544 www.poli.usp.br
Departamento de Engenharia de Construção Civil

Relatório Final

Tabela 5.7 – Resultados utilizados para a dosagem do concreto projetado via seca.

CONSUMO DE AGLOMERANTES (Kg/m ³)	TRAÇO EM MASSA 1:a:b	VALOR DE “m” (teor de argamassa)**	RESULTADO MÉDIO DE RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO (MPa)		
			0%***	5%***	10%***
300	1:3,78:2,03	5,81	24,0	27,8	23,0
400	1:2,50:1,58	4,08	32,8	34,2	28,9
500	1:1,73:1,30	3,03	36,3	37,9	36,4

* Cimento:areia:brita

** m = a + b

*** Teor de metacaulim em substituição à massa de cimento

Com os valores da Tabela 5.7 foram realizadas regressões para obtenção das curvas de dosagem segundo o modelo proposto (PRUDÊNCIO, 1993):

$$fc = \frac{A}{B^m}$$

Onde:

fc = resistência média à compressão do CPVS (MPa);

A e B = constantes;

m = teor de agregados no traço do CPVS.

Os resultados obtidos encontram-se apresentados na Tabela 5.8 e representados na Figura 5-9.

Tabela 5.8 – Resultados obtidos na regressão pelo método dos mínimos quadrados para a dosagem dos CPVS com os diversos teores de Metacaulim.

TEOR DE METACALIM (%)	VALOR OBTIDO PARA A CONSTATNE “A”	VALOR OBTIDO PARA A CONSTATNE “B”	COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO (r ²)
0	58,703	1,164	0,981
5	53,299	1,118	0,998
10	58,161	1,176	0,980

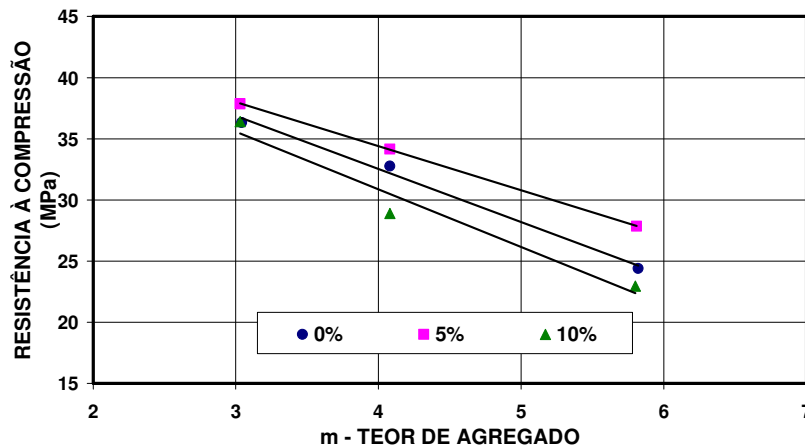


Figura 5-9 – Gráfico de dosagem para os teores de metacaulim estudados (0%, 5% e 10%).



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, n 83 CEP 05508-900 São Paulo SP
tel.: 55-(0)11- 3091-5359 / 5442 fax: 55-(0)11-3091-5544 www.poli.usp.br

Departamento de Engenharia de Construção Civil

Relatório Final

Para facilitar a análise de dosagem do CPVS com metacaulim, foram dosados seis CPVS, utilizando-se gráficos de dosagem obtidos a partir dos resultados alcançados nas moldagens e do modelo proposto foi possível obter então os consumos de aglomerantes totais necessários para se obter uma resistência média de dosagem de 25 MPa, 30 MPa e 35 MPa, aos 35 dias de idade, para cada um dos teores de metacaulim utilizados em substituição ao cimento conforme os procedimentos adotados neste experimento. Os resultados obtidos neste exercício de dosagem encontram-se apresentados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 Consumos de cimento obtidos.

fcj	0% de metacaulim		5% de metacaulim		10% de metacaulim	
	m	C (Kg/m ³)	m	C (Kg/m ³)	m	C (Kg/m ³)
25	5,6	308	6,7	281	5,2	326
30	4,4	371	5,1	334	4,1	398
35	3,4	461	3,8	423	3,2	487

Através dos documentos obtidos a partir do exercício de dosagem realizado, pode-se concluir que o uso de 5% de metacaulim em substituição ao cimento proporcionou uma redução no consumo de aglomerantes totais da ordem de 9% para a obtenção de um desempenho equivalente do material. Já o uso de 10% de metacaulim em substituição ao cimento, provocou um aumento no consumo de aglomerantes totais da ordem de 6% o que está associado à menor compactação obtida com o material, como mostraram os índices relativos à medida de compacidade.

5.1.5.5 Índices de compacidade

Observa-se uma tendência de diminuição da compacidade do material com o teor de metacaulim utilizado no CPVS. Pelo gráfico da Figura 5-10, nota-se que o aumento não é linear para o consumo de 300 Kg/m³ e é linear para o consumo de aglomerantes totais de 400 Kg/m³. Pode-se aventar a possibilidade deste comportamento estar associado às variações no fluxo de ar ocorridas durante o ajuste do equipamento de projeção. Como todo o conjunto de equipamentos era necessariamente desligado entre a projeção de uma placa e outra, podem ter ocorrido variações na regulagem do ar em função da solicitação do mangoteiro. Como sua avaliação é visual, ele procura regular a vazão de ar e água de modo que o material apresente a mesma consistência e não ocorram deslocamentos. Vale lembrar que as placas permaneceram na posição quase vertical (como mostra a Figura 5-1) e o risco de deslocamento era constante, com a conseqüente perda da placa. Intuitivamente, o mangoteiro pode ter demandado menor vazão de ar por parte do auxiliar encarregado desta regulagem junto à máquina de projeção, dado que, com o aumento do teor de metacaulim o risco de deslocamento era nitidamente menor, em função da maior coesão proporcionada para o CPVS pelo metacaulim. Assim, a vazão de ar pode ter sido ligeiramente menor para os maiores consumos de metacaulim, o que acabou por reduzir a compactação do material, especialmente para o teor de 10%. Vale ressaltar que, apesar da redução na compactação medida também para o teor de 5%, a resistência à compressão medida para o material foi maior que para o CPVS sem metacaulim.

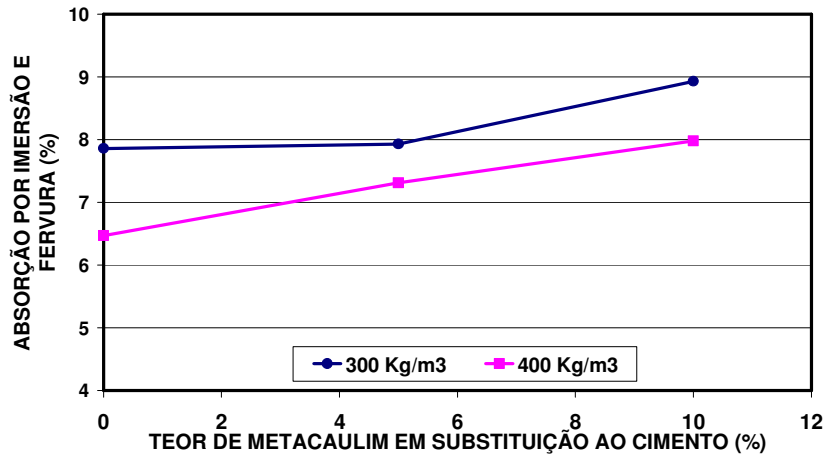


Figura 5-10 – Relação entre os índices de absorção por imersão e fervura e o teor de metacaulim utilizado no CPVS.

5.1.6 Conclusões

O estudo do concreto projetado sempre apresenta dificuldades experimentais maiores do que aquelas apresentadas pelo concreto convencional. Isto ocorre porque o estudo do concreto projetado, além de um estudo do material, também é um estudo do processo de projeção que intervém claramente nas propriedades do material (FIGUEIREDO, 1992). Apesar das dificuldades encontradas neste estudo específico, como as pequenas variações de consistência e prováveis variações no fluxo de ar, fruto das variáveis intervenientes oriundas do processo de projeção, pode-se concluir pelo efeito positivo do uso de metacaulim ao CPVS. Com o uso de metacaulim, foi possível verificar uma redução de 10% no índice de reflexão do CPVS quando se incorpora 5% de metacaulim em substituição ao cimento e uma redução de 20% quando se substitui 10% da massa de cimento por metacaulim, sem incorrer numa superestimação do potencial do material. Esta característica é preponderante para o CPVS e significa uma economia de escala importante para a obra. A redução na reflexão está associada a um aumento na coesão do material, o que pode ter provocado uma redução no fluxo de ar por parte do mangoteiro que constatou a minimização dos deslocamentos. Também foi constatado um aumento na resistência inicial do material, medida através de penetrômetro, com o aumento do teor de metacaulim. Estes dois fatores conjugados (aumento de coesão e da velocidade de ganho de resistência inicial) configuram uma situação muito mais segura para a aplicação do material quando da utilização de metacaulim. Pode-se concluir que a incorporação de 5% de metacaulim em substituição à massa de cimento proporcionou um aumento de 10% na resistência à compressão do concreto projetado, mesmo que a compactação do material não tenha sido tão boa, como indicaram os resultados medidos para a absorção por imersão e fervura, massa específica e índices de vazios. Caso se tenha garantia da manutenção da mesma velocidade de projeção, provavelmente este ganho será ainda maior. Já a incorporação de 10% de metacaulim em substituição à massa de cimento provocou um aumento de 4% na resistência do concreto aos 3 dias de idade e, por outro lado, esta mesma incorporação reduziu em cerca de 6% a resistência do CPVS nas idades de 7 e 35 dias. Isto está associado à menor compactação obtida para o material durante a projeção, o que está demonstrado pelos índices de compactidade obtidos neste experimento. Assim, é de se



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, n 83 CEP 05508-900 São Paulo SP
tel.: 55-(0)11- 3091-5359 / 5442 fax: 55-(0)11-3091-5544 www.poli.usp.br

Departamento de Engenharia de Construção Civil

Relatório Final

esperar que, com o uso de metacaulim haverá um aumento na segurança do CPVS, pelo aumento da coesão que evita os deslocamento e pelo aumento da evolução da resistência inicial. Além disso, determinando-se o teor ótimo e garantindo-se as boas condições de projeção, será possível minimizar os custos de aplicação do material por reduzir o nível de reflexão e minimizar o consumo de aglomerantes totais.

5.2 REATIVIDADE ALCALI-AGREGADOS

Este estudo foi realizado pelo LACTEC (Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento) do Centro Politécnico da UFPR (Universidade Federal do Paraná), LAME (Laboratório de Materiais e Estruturas).

O objetivo foi fazer uma verificação da potencialidade do *MetacaulimHP* no que diz respeito a inibição da ocorrência da reação álcali-agregado. Um estudo semelhante foi apresentado nos itens 3.1.6 e 4.10 deste relatório.

5.2.1 Procedimento de ensaio

Foi utilizado o procedimento interno do LAME (Laboratório de Materiais e Estruturas) Edição 1, Revisão 1 que se baseia no método ASTM C 1260, Método de ensaio padrão para a reatividade potencial de agregados (Método das barras de argamassa).

Segundo a ASTM C 1260 a interpretação dos resultados deve ser feita da seguinte forma:

- ✓ Valores de expansão menores que 0,1 % aos 16 dias de idade indicam um comportamento inócuo na maioria dos casos;
- ✓ Valores de expansão superiores a 0,2 % aos 16 dias de idade indicam expansões potencialmente deletérias;
- ✓ Valores de expansão situados entre 0,1 % e 0,2 % aos 16 dias de idade sugerem a realização de mais ensaios para a análise do comportamento do material.

5.2.2 Material utilizado

Os materiais utilizados neste estudo encontram-se listados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Materiais empregados e sua respectiva procedência.

MATERIAL	PROCEDÊNCIA
Areia artificial	AHE Espora
Cimento CII F 32	AHE espora
<i>MetacaulimHP</i>	Metacaulim do Brasil

O proporcionamento da argamassa utilizada no ensaio foi o prescrito na ASTM C 1260 e consiste em uma argamassa 1: 2,25 com relação água/cimento 0,47.



5.2.3 Apresentação dos resultados

A Figura 5-11 apresenta uma comparação da redução da expansibilidade ocasionada tanto pela adição de 8 % de sílica ativa como de 8 % de *MetacaulimHP*, quando comparado com a série de referência que é a argamassa com apenas o cimento CPPII-F como aglomerante. Verifica-se que todas as duas adições apresentaram capacidade de reduzir a expansibilidade ao ponto de serem classificadas pela ASTM C 1260 como de comportamento inerte, ou seja, seus valores de expansibilidade aos 16 dias ficaram abaixo do limite de 0,1 % prescrito pela norma ASTM C 1260.

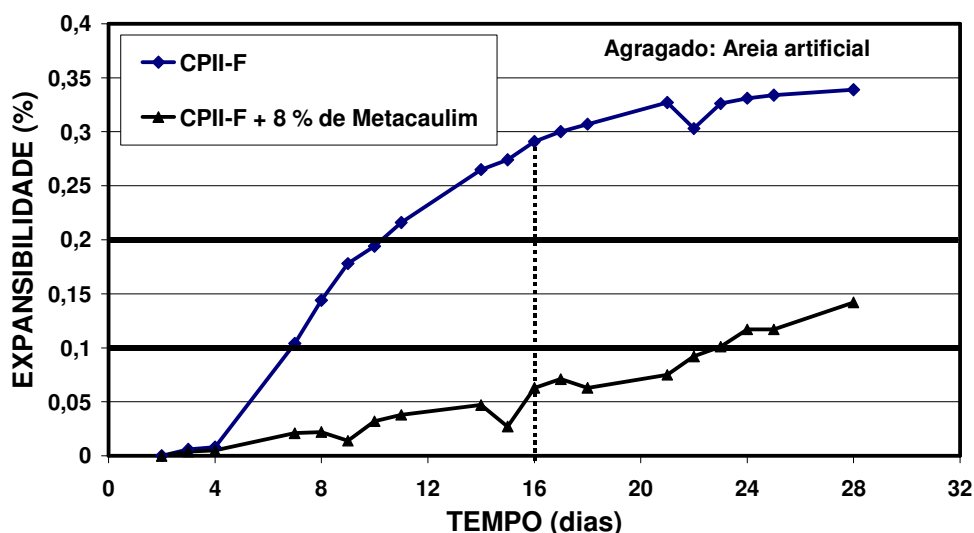


Figura 5-11 – Comparação da expansão ao longo do tempo para argamassa com cimento CPPII-F (referência), CPPII-F + 8% de Sílica ativa e CPPII-F + 8 % de *MetacaulimHP*.

A Figura 5-12 ilustra que o aumento do teor de *MetacaulimHP* resulta em melhora do desempenho quanto a inibição da reação álcali-agregado. Deve-se verificar que um aumento de 8 % para 11 % resultou em uma redução significativa da reatividade álcali-agregado, contudo, o aumento de 11 % para 15 % não se mostrou tão significativo. Isso sugere a existência de um teor ótimo para a inibição da reatividade álcali-agregado, de modo que acima deste teor o aumento na quantidade desta adição não apresenta consequência expressiva na inibição da reação álcali-agregado.

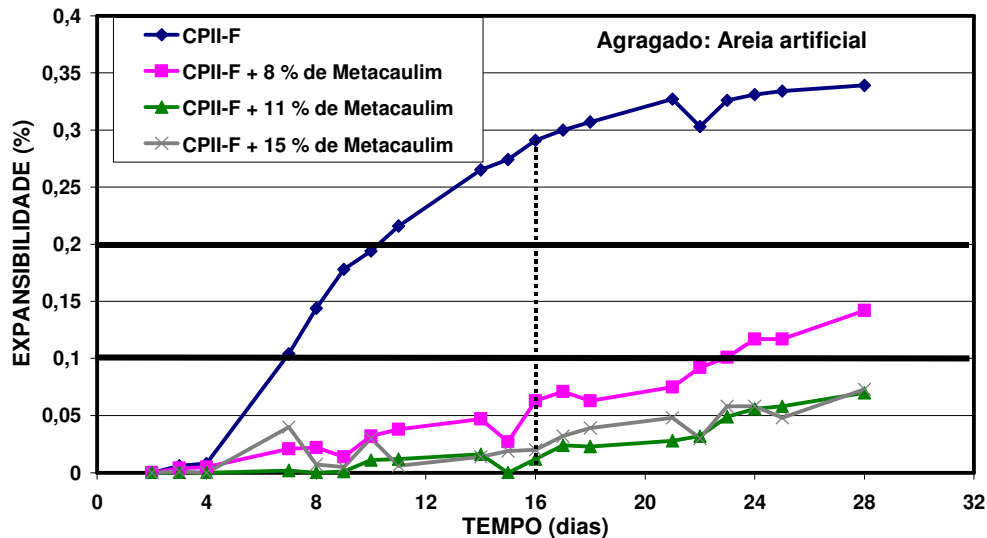


Figura 5-12 - Comparação da expansão ao longo do tempo para argamassa com cimento CII-F (referência) e CII-F + diferentes teores de *MetacaulimHP*.

5.2.4 Conclusões

Este estudo mostrou claramente o potencial que a adição de *MetacaulimHP* tem no que diz respeito a inibição da reação entre os álcalis do cimento e a sílica do agregado. Este tipo de constatação foi também obtida no ensaio apresentado nos itens 3.1.6 e 4.10.

Ficou muito claro que a adição de *MetacaulimHP* reduziu significativamente a expansão proveniente da reação álcali-agregado, fazendo com que mesmo com o menor teor de *MetacaulimHP* utilizado no estudo (8 %), os valores de expansão devido a reação álcali-agregado se localizaram na faixa de material inócuo, segundo a ASTM C 1260. Isto quer dizer que este tipo de adição é perfeitamente indicado para a utilização em casos onde são aplicados agregados potencialmente reativos.

5.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE

Neste item consta um estudo sobre a influência da substituição de parte do cimento por adição de metacaulim no que se refere ao módulo de elasticidade.

Atendendo à solicitação do Interessado, procedeu-se aos ensaios de determinação do módulo de elasticidade dos concretos com e sem *Metacaulim* destinados a concretos prefabricados da Munte. Os estudos de dosagem e moldagem dos corpos-de-prova foram realizados, neste caso, pelo Eng. Guilherme Gallo da *Metacaulim*.

Muitas são as variáveis que podem interferir no resultado do módulo de elasticidade do concreto, podendo-se citar:

- diferentes naturezas do agregado gráudo;
- diferentes diâmetros nominais do agregado gráudo;
- diferentes estados de umidade dos corpos de prova no momento do ensaio;



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, n 83 CEP 05508-900 São Paulo SP
tel.: 55-(0)11- 3091-5359 / 5442 fax: 55-(0)11-3091-5544 www.poli.usp.br

Departamento de Engenharia de Construção Civil

Relatório Final

- diferentes velocidades de aplicação da carga ou da deformação;
- diferentes dimensões dos corpos de prova;
- diferentes temperaturas de ensaio;
- diferentes relações água/cimento;
- diferentes volumes de pasta por metro cúbico de concreto;
- diferentes resistências à compressão;
- diferentes idades.

No caso específico deste trabalho, foi estudada apenas a influência da adição de Metacaulim nos concretos utilizados pela Munte Construções Industrializadas na fabricação de peças pré-moldadas.

5.3.1 Programação do experimento

Realizado pelo Eng. Guilherme Gallo da Metacaulim com materiais escolhidos e caracterizados pela Metacaulim do Brasil e pela Munte. O experimento compreendeu a moldagem de vários corpos-de-prova, sendo entregues ao Prof. Paulo Helene, apenas 4 com Metacaulim e 4 de referência (concreto usado na Munte), ou seja, duas famílias, uma com e outra sem Metacaulim.

Dois corpo-de-prova foram utilizados para obter a resistência à compressão a 1 dia de idade e outros dois corpos-de-prova foram ensaiados para obter o módulo a 1 dia de idade. Os ensaios foram realizados com sistema eletrônico de aquisição de dados a partir de medidores de deformação tipo LVDT instalados nos corpos-de-prova, de modo a facilitar e propiciar maior precisão na determinação dos valores de módulo de elasticidade.

5.3.2 Resultados e discussão

A resistência à compressão axial a um dia de idade para os dois traços de concreto comparados encontram-se apresentados na Tabela 5.11. Embora os resultados indiquem que a resistência do concreto com a adição do *MetacaulimHP* é menor, a 1 dia, do que a série de referência sem *MetacaulimHP*, o estudo apresentado nos itens 2, 3 e 4 mostrou que esta tendência se inverte com o passar do tempo devido às reações pozolânicas proporcionadas pela adição em questão.

A Tabela 5.11 apresenta, além dos valores de resistência à compressão, os valores medidos para o módulo de elasticidade e os valores de módulo estimados com base nos valores de resistência à compressão usando as relações referidas no item 3.6.

Deve-se verificar que a adição de *MetacaulimHP*, neste caso, aumentou o módulo de elasticidade do concreto original da Munte, tornando esse concreto um pouco mais rígido e menos deformável à idade de 1 dia, apesar da maior resistência à compressão do concreto Munte. É de se esperar que a 28 dias tanto o módulo de elasticidade quanto a resistência à compressão sejam maiores que o obtido para concretos Munte, sem adição de Metacaulim, devido às reações pozolânicas do Metacaulim com os compostos hidratados do cimento.



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, n 83 CEP 05508-900 São Paulo SP
tel.: 55-(0)11- 3091-5359 / 5442 fax: 55-(0)11-3091-5544 www.poli.usp.br

Departamento de Engenharia de Construção Civil

Relatório Final

Tabela 5.11 – Resultados de resistência à compressão e módulo de elasticidade medido no ensaio e estimado de acordo os valores de resistência à compressão do concreto.

DESCRIÇÃO	METACAULIMHP	MUNTE
Resistência à compressão axial (f_c) a 1 dia, em MPa	20,0	21,9
Módulo de elasticidade inicial (E_{ci}) a 1 da, em GPa	29,0	24,1
Módulo de elasticidade segundo NBR 6118/1978, em GPa, $f_{ck,est} = 20 \text{ MPa } (E_{ci})$	26,3	22,2
Módulo de elasticidade segundo NBR 6118/2002, em GPa, $f_{ck,est} = 20 \text{ MPa } (E_{ci})$	32,4	32,1
Módulo de elasticidade segundo ACI 318, em GPa, (E_c)	24,1	24,3
Módulo de elasticidade segundo CEB/FIP Model Code 90, em GPa (E_{ci})	30,3	30,1

Obs.: 1. os modelos de previsão constantes das normas citadas referem-se a concretos com idade de 28 dias. Como neste caso a idade é de 1 dia, justifica-se uma pequena divergência entre os resultados experimentalmente obtidos e os valores de “previsão”;

Obs.: 2. verifica-se que os valores de módulo de elasticidade obtidos a partir do modelo de previsão recomendado pela norma NBR 6118 de 1978 está muito acima da previsão obtida pelos demais modelos, assim como irreal e necessitando de uma calibragem que está ocorrendo com a chegada do novo texto da NBR 6118 de 2002.



6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nas condições atuais, são poucas as empresas ligadas a construção civil que fazem uso da visão sistêmica e resolvem investir na pesquisa e aprimoramento do produto que está lançando no mercado. A Metacaulim do Brasil é uma destas poucas empresas que tem visão para o futuro, pois o mercado tem se tornado cada vez mais competitivo e a tendência é que as empresas de ponta sejam as que hoje estão tentando se aprimorar e elevar o nível do seu produto. Um bom caminho para ser percorrido neste sentido é o da Universidade, que sempre tem pessoal muito capacitado e idôneo para o desenvolvimento de pesquisas.

Pode-se dizer que, com os resultados obtidos neste estudo, o *MetacaulimHP* apresentou fortes indícios de ser uma opção muito interessante para a obtenção de concretos de alta resistência e principalmente de alta durabilidade. Isto é afirmado com base na Tabela 6.1 e Tabela 6.2 que consistem em resumos dos resultados obtidos, onde verifica-se claramente que fixada uma dada resistência a compressão aos 28 dias (parâmetro mais utilizado para caracterizar um concreto para uma determinada aplicação), a adição do *MetacaulimHP* resultou em redução no consumo de cimento acompanhado de uma melhora em propriedades importantíssimas para a durabilidade de uma estrutura de concreto, tais como a resistência a penetração de cloretos, absorção de água, resistividade elétrica e retração por secagem.

Tabela 6.1 - Propriedades dos concretos para um mesmo f_{c28d} (8% de adição).

Propriedade	f_{c28d} (MPa)	40	50	60
Consumo de cimento (kg/m³)	referência	370	455	555
	<i>Metacaulim HP</i>	300	370	435
Carga passante* (C)	referência	2250	2150	2080
	<i>Metacaulim HP</i>	1125	950	850
Absorção de água (%)	referência	6,1	5,7	5,2
	<i>Metacaulim HP</i>	5,3	4,8	4,3
Resistividade Elétrica (kohm x cm)	referência	28	30	32
	<i>Metacaulim HP</i>	60	65	70

* quanto maior o número da carga passante menor a capacidade do concreto em barrar o ingresso dos cloretos.



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, n 83 CEP 05508-900 São Paulo SP
tel.: 55-(0)11- 3091-5359 / 5442 fax: 55-(0)11-3091-5544 www.poli.usp.br

Departamento de Engenharia de Construção Civil

Relatório Final

Tabela 6.2 - Propriedades dos concretos para um mesmo f_{c28d} (10% de adição).

Propriedade	f_{c28d} (MPa)	60	70	80	90
consumo de cimento (kg/m^3)	referência	420	490	560	630
	<i>Metacaulim HP</i>	308	375	425	490
Carga passante* (C)	referência	1320	1150	950	810
	<i>Metacaulim HP</i>	400	250	250	180
absorção de água (%)	referência	2,80	2,70	2,50	2,35
	<i>Metacaulim HP</i>	2,55	2,50	2,20	1,70
resistividade Elétrica (kohm x cm)	referência	30	60	80	115
	<i>Metacaulim HP</i>	60	130	200	270
Retração por Secagem a 182 dias (‰)	referência	0,71	0,43	0,31	0,23
	<i>Metacaulim HP</i>	0,62	0,38	0,25	0,19

* quanto maior o número da carga passante menor a capacidade do concreto em barrar o ingresso dos cloretos.

Vale salientar que a melhora nas propriedades mecânicas do concreto é um fator que não pode ser esquecido e é de extrema importância para o aproveitamento da potencialidade do *MetacaulimHP*.

Além disso, os resultados obtidos indicaram que o *MetacaulimHP* apresentou um grande potencial de inibição da reação álcali-agregado e de resistência ao ataque por sulfatos, o que vem a ser mais um atrativo para o uso deste tipo de material.

Resumindo os resultados obtidos com o desenvolvimento deste extenso trabalho, foi possível constatar que a adição do *MetacaulimHP* como substituição de parte do cimento resulta em melhoras nas propriedades listadas a seguir:

- ✓ Resistência à compressão;
- ✓ Resistência à tração;
- ✓ Módulo de elasticidade;
- ✓ Inibição da reação álcali-agregado;
- ✓ Resistência ao ataque por sulfatos;
- ✓ Resistência à penetração de íons cloretos;
- ✓ Absorção de água e porosidade;



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, n 83 CEP 05508-900 São Paulo SP
tel.: 55-(0)11- 3091-5359 / 5442 fax: 55-(0)11-3091-5544 www.poli.usp.br

Departamento de Engenharia de Construção Civil

Relatório Final

- ✓ Permeabilidade de água sob pressão;
- ✓ Resistividade elétrica;
- ✓ Retração por secagem.

São Paulo, 07 de Maio de 2004

Eng. Paulo Helene

Eng. Marcelo Henrique F. de Medeiros