

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ESTUDO E PROPOSTA DE UM MODELO DE  
RESISTÊNCIA À FADIGA DE ARGAMASSAS DE  
REVESTIMENTO EM ESTADO PLANO E  
TRIDIMENSIONAL DE TENSÕES**

**SUELEN VANESSA MIRANDA DAS CHAGAS**

**ORIENTADOR: LUCIANO MENDES BEZERRA**

**CO-ORIENTADOR: ELTON BAUER**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E  
CONSTRUÇÃO CIVIL**

**PUBLICAÇÃO: E.DM - 015 A/09**

**BRASÍLIA/DF: NOVEMBRO – 2009**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ESTUDO E PROPOSTA DE UM MODELO DE RESISTÊNCIA À  
FADIGA DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO EM ESTADO  
PLANO E TRIDIMENSIONAL DE TENSÕES**

**SUELEN VANESSA MIRANDA DAS CHAGAS**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE  
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE  
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU  
DE MESTRE EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.**

**APROVADA POR:**

---

**Prof. Luciano Mendes Bezerra, PhD (ENC-UnB)  
(Orientador)**

---

**Prof. William Taylor Matias Silva, Dr. Ing (ENC-UnB)  
(Examinador Interno)**

---

**Prof. Fernando Henrique Sabbatini, PhD (EPUSP)  
(Examinador Externo)**

**BRASÍLIA/DF, 30 DE NOVEMBRO DE 2009**

## FICHA CATALOGRÁFICA

DAS CHAGAS, SUELEN VANESSA MIRANDA

Estudo e Proposta de um Modelo de Resistência à Fadiga de Argamassas de Revestimento em Estado Plano e Tridimensional de Tensões. [Distrito Federal] 2009. xvii, 172p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2009).  
Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Sistema de Revestimento Cerâmico	2. Curva de Coulomb-Mohr das Argamassas
3. Curva S-N para as Argamassas	4. Estado Plano e Tridimensional de Tensões
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

DAS CHAGAS, S. V. M. (2009). Estudo e Proposta de um Modelo de Resistência à Fadiga de Argamassas de Revestimento em Estado Plano e Tridimensional de Tensões. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.DM - 015 A/09, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 172p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTORA: Suelen Vanessa Miranda das Chagas.

TÍTULO: Estudo e Proposta de um Modelo de Resistência à Fadiga de Argamassas de Revestimento em Estado Plano e Tridimensional de Tensões.

GRAU: Mestre

ANO: 2009

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Suelen Vanessa Miranda das Chagas  
Travessa Vileta entre São Pedro e Leal Martins nº 3624, Bairro Marco.  
66.095-740 Belém – PA – Brasil.

*Aos meus pais, Luiz e Léa,  
Às minhas irmãs, Lília e Jaqueline,  
Ao meu namorado, Tarcísio,  
pelo apoio incondicional que  
tornaram esta caminhada menos árdua.*

## AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores Luciano Mendes Bezerra e Elton Bauer, por toda orientação, dedicação, paciência, compreensão, amizade e apoio incansável que tornaram possível o término deste trabalho.

À minha família, meus pais Luiz e Léa, minhas irmãs Lília e Jaqueline, minhas sobrinhas Lidiane e Marcia, meu cunhado Márcio, minha prima-irmã Sônia por me darem amor, por me confortarem nas horas difíceis e por me indicarem sempre os caminhos a serem seguidos.

Ao meu namorado Tarcísio, por ter abdicado do convívio com seus familiares, por ter abrido mão das suas vontades e por não ter medido esforços para que eu chegasse até o fim desta etapa.

Ao professor Paulo Sérgio pelo apoio e incentivo no início da minha vida acadêmica durante a graduação.

Aos professores do PECC que de alguma forma contribuíram para o meu crescimento intelectual e pessoal.

Aos professores da mecânica, Alex e Jorge, e à Giselle pelo auxílio inestimável nos ensaios de fadiga no Laboratório da Mecânica.

Ao professor Sabbatini pela valorosa contribuição na ocasião da defesa da dissertação.

Aos funcionários do Laboratório de Materiais da UnB, especialmente aos técnicos do laboratório de materiais, meus amigos Severino e Xavier, e ao estagiário Nabeel pelo apoio imprescindível dispensado na execução dos ensaios.

À família Portal Matos, especialmente à Cláudia e ao Hugo por me acolherem tão bem em sua casa por ocasião da minha chegada à Brasília.

Aos meus amigos Rodrigo e Carlos pelo convívio, pelo apoio, pela compreensão e pela amizade que partilhamos durante esta árdua caminhada...nas “viradas”, nas reuniões de fim de semana, nos trabalhos, nas provas.

Ao meu amigo Uchôa pelo incentivo durante todo o trabalho, desde o levantamento bibliográfico até a realização dos ensaios de fadiga.

Ao meu amigo Patrick pelo auxílio na elaboração dos desenhos em perspectiva usados na minha dissertação.

Aos amigos do PECC, Deise, Iviane, Galileu, Fernanda, Laura, Giselle pela diversão, pelo aprendizado, pela convivência.

Ao Exército Brasileiro, na pessoa do Maj Ventorini, por ter dado todo o apoio necessário para que eu pudesse acompanhar os ensaios de laboratório e conciliar, desta forma, o meu trabalho com os meus estudos.

À secretaria do PECC, Eva pela ajuda constante.

Ao CNPq, pelo suporte financeiro.

À Votorantim Cimentos, na pessoa da laboratorista Rosângela, pela caracterização dos materiais empregados na argamassa.

À todos que colaboraram para a realização deste trabalho.

À Deus, por ter me proporcionado mais esta conquista.

## **RESUMO**

### **ESTUDO E PROPOSTA DE UM MODELO DE RESISTÊNCIA À FADIGA DE ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO EM ESTADO PLANO E TRIDIMENSIONAL DE TENSÕES**

**Autora: Suelen Vanessa Miranda das Chagas**

**Orientador: Luciano Mendes Bezerra**

**Co-orientador: Elton Bauer**

**Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil**

**Brasília, Novembro de 2009**

Nos últimos anos, observa-se um aumento na incidência de descolamento de placas cerâmicas nas fachadas das edificações. Isto se deve a inúmeros fatores, dentre os quais destaca-se a variação de temperatura que provoca solicitações cíclicas nas fachadas, sobretudo na interface argamassa de emboço/argamassa colante/cerâmica, até a sua ruptura por fadiga. Nesse sentido, sabendo-se que o emboço constitui o “corpo do revestimento” que serve de suporte para as outras camadas, o objetivo desta pesquisa é estudar o comportamento das argamassas de revestimento do emboço submetidas a carregamentos cíclicos de compressão. Para isto, inicialmente, foram realizados ensaios de caracterização das argamassas industrializadas e argamassas mistas, sendo em seguida proposta uma metodologia de ensaio de fadiga sob compressão para as mesmas. Com os resultados obtidos nos ensaios de compressão estática, é possível definir os níveis de tensão empregados no ensaio de fadiga. A partir do número de ciclos necessários para a ruptura, é traçada a curva “S-N” (tensão alternada *versus* número de ciclos) das argamassas de emboço sujeita à fadiga sob compressão. Observa-se que o limite de resistência à fadiga sob compressão especificamente das argamassas empregada nos ensaios é de 7,53Mpa para a argamassa industrializada, enquanto que para a argamassa mista o valor encontrado é de 6,26MPa. Tais valores correspondem a aproximadamente 73% da tensão de ruptura estática da argamassa industrializada e da argamassa mista, respectivamente. Finalmente, para avaliar a resistência à fadiga é adotada a curva de ruptura de Coulomb-Mohr no estado plano e no estado tridimensional, as quais são traçadas com os valores das resistências de fadiga para 1 ciclo e para  $10^6$  ciclos de carregamento, nas quais é possível definir uma região em que não há preocupação com a ruptura sob fadiga.

## **ABSTRACT**

### **STUDY AND PROPOSAL FOR A MODEL OF FATIGUE RESISTANCE OF MORTAR COATING IN STATE PLAN AND THREE-DIMENSIONAL STRESS**

**Author: Suelen Vanessa Miranda das Chagas**

**Supervisor: Luciano Mendes Bezerra**

**Co-advisor: Elton Bauer**

**Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil**

**Brasília, November of 2009**

In recent years, there is an increased incidence of detachment of tiles on the buildings facades. This is due to several factors, among which we highlight the temperature variation that causes cyclical stress on the facades, especially at the interface of rendering / dry-set mortar / ceramic, provoking its fatigue failure. In this sense, given that the rendering is "it coating body" that serves as support for other layers, the objective this research is study the behavior of mortar coating subjected to cyclic compressive loads. For this, initially, the characterization of industrial mortars and mixed mortar were conducted and then a methodology for fatigue test under compression for the same has been proposed. With the results obtained in test static compression, is can set the stress levels used in the fatigue test. The "S-N" curve (alternating stress vs. number of cycles) for mortar subject to fatigue under compression is obtained from the number of cycles required to rupture. Observe that the limit of fatigue resistance of the mortar under compression specifically mortars used in the tests is 7.53 MPa for industrial mortar, while the mixed mortar the value found is 6.26 MPa. These values correspond to approximately 73% of static resistance of industrialized mortar and mixed mortar, respectively. Finally, to evaluate the fatigue resistance of mortars is adopted the curve Coulomb-Mohr in the state plan and state three-dimensional, which are drawn with the values of fatigue resistance for 1 cycle and  $10^6$  cycles of loading, where is can define a region where there is not concern about the under fatigue rupture.



## SUMÁRIO

<b>1 - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 - APRESENTAÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 - JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>3</b>
<b>1.3 - OBJETIVOS .....</b>	<b>5</b>
<b>1.4 - ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....</b>	<b>5</b>
<b>2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>7</b>
<b>2.1 - ESTUDOS REALIZADOS SOBRE TENSÕES E FADIGA EM SISTEMAS DE REVESTIMENTOS.....</b>	<b>7</b>
<b>2.2 - SISTEMAS DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS .....</b>	<b>11</b>
<b>2.2.1 - Aspectos gerais do sistema de revestimento cerâmico.....</b>	<b>11</b>
2.2.1.1 - Base .....	13
2.2.1.2 - Chapisco .....	14
2.2.1.3 - Emboço .....	15
2.2.1.4 - Argamassa colante.....	19
2.2.1.5 - Cerâmica.....	21
2.2.1.6 - Juntas.....	22
<b>2.2.2 - Normas brasileiras e classificação da argamassa de emboço .....</b>	<b>25</b>
<b>2.2.3 - Mecanismo do descolamento em sistemas de revestimentos.....</b>	<b>26</b>
2.2.3.1 - Efeito da temperatura nos sistemas de revestimentos .....	27
2.2.3.2 - Distribuição das tensões nos sistemas de revestimentos cerâmicos.....	30
<b>2.3 - PROCESSO DE FADIGA EM SISTEMAS DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS.....</b>	<b>35</b>
<b>2.3.1 - Mecânica da Fratura .....</b>	<b>35</b>
<b>2.3.2 - Aspectos gerais do processo de fadiga .....</b>	<b>38</b>
<b>2.3.3 - Ciclos de carregamento do processo de fadiga.....</b>	<b>41</b>
<b>2.3.4 - Representação dos ensaios de fadiga.....</b>	<b>42</b>
<b>2.3.5 - Fatores que influenciam no processo de fadiga .....</b>	<b>45</b>
2.3.4.1 - Fator de concentração de tensões ( $K_t$ ) .....	45
2.3.4.2 - Acabamento superficial.....	46
2.3.4.3 - Tamanho da peça.....	46

2.3.4.4 - Temperatura .....	46
2.3.4.5 - Frequência .....	47
2.3.4.6 - Amplitude de tensão.....	47
<b>2.3.6 - Avaliação do processo de fadiga em sistemas de revestimentos .....</b>	<b>48</b>
2.3.4.1 - Teoria de Rankine .....	48
2.3.4.2 - Teoria de Coulomb-Mohr.....	50
2.3.4.3 - Teoria de Palmgren-Miner ou regra linear de dano acumulado.....	53
<b>3 - PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>55</b>
<b>3.1 - FATORES DE ESTUDO .....</b>	<b>55</b>
<b>3.2 - MATERIAIS UTILIZADOS .....</b>	<b>56</b>
3.2.1 - Cimento.....	56
3.2.2 - Cal .....	58
3.2.3 - Areia.....	59
3.2.4 - Argamassa industrializada .....	61
<b>3.3 - METODOLOGIA DA PESQUISA .....</b>	<b>62</b>
3.3.1 - Estudo de dosagem .....	62
3.3.2 - Produção das argamassas .....	65
<b>3.3.3 - Caracterização das argamassas no estado fresco .....</b>	<b>66</b>
3.3.3.1 - Densidade de massa .....	67
3.3.3.2 - Penetração de cone .....	68
3.3.3.3 - Mesa de consistência.....	69
3.3.3.4 - Vane Test .....	70
3.3.3.5 - Retenção de água.....	72
3.3.3.6 - Teor de ar incorporado .....	73
<b>3.3.4 - Geometria e processo de moldagem dos corpos-de-prova usados nos ensaios das argamassas no estado endurecido.....</b>	<b>74</b>
3.3.4.1 - Geometria dos corpos-de-prova .....	74
3.3.4.2 - Moldagem e cura dos corpos-de-prova .....	75
<b>3.3.5 - Ensaio no estado endurecido.....</b>	<b>78</b>
3.3.5.1 - Densidade de massa aparente .....	78
3.3.5.2 - Absorção por capilaridade.....	79
3.3.5.3 - Absorção por imersão, índice de vazios e massa específica .....	81
3.3.5.4 - Retração.....	83

3.3.5.5 - Resistência potencial de aderência à tração .....	85
3.3.5.6 - Resistência à tração na flexão .....	86
3.3.5.7 - Módulo de deformação na flexão .....	87
3.3.5.8 - Resistência à compressão .....	89
<b>3.3.6 - Ensaio de fadiga .....</b>	<b>90</b>
3.3.6.1 - Estudo piloto .....	90
3.3.6.2 - Processo de moldagem e cura dos corpos-de-prova usados no ensaio de fadiga.....	93
3.3.6.3 - Rotina do ensaio de fadiga .....	94
<b>4 - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>98</b>
<b>4.1 - CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS .....</b>	<b>99</b>
<b>4.2 - FADIGA DAS ARGAMASSAS DE EMBOÇO.....</b>	<b>105</b>
4.2.1 - Obtenção das curvas S-N para as argamassas.....	105
4.2.2 - Curva de Coulomb-Mohr para avaliação da fadiga no estado plano.....	118
4.2.3 -Curva de Coulomb-Mohr para avaliação da fadiga no estado tridimensional.....	125
<b>5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>147</b>
<b>5.1 - CONCLUSÕES GERAIS.....</b>	<b>147</b>
<b>5.2 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>150</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>152</b>
<b>APÊNDICE A - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....</b>	<b>159</b>
<b>APÊNDICE B - CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO</b>	<b>163</b>
<b>APÊNDICE C - CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO.....</b>	<b>165</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classificação das argamassas colantes segundo seu local de aplicação. ....	20
Tabela 2.2 – Grupos de absorção de água das placas cerâmicas (ANFACER, 2009).....	21
Tabela 2.3 – Retenção de água. ....	25
Tabela 2.4 – Densidade de massa no estado fresco. ....	25
Tabela 2.5 – Densidade de massa aparente no estado endurecido .....	26
Tabela 2.6 – Resistência mecânica. ....	26
Tabela 3.1 – Características físico-mecânicas do cimento. ....	57
Tabela 3.2 – Características químicas do cimento. ....	58
Tabela 3.3 – Características físicas da cal. ....	59
Tabela 3.4 – Características químicas da cal. ....	59
Tabela 3.5 – Características físicas da areia. ....	60
Tabela 3.6 – Distribuição granulométrica da areia. ....	61
Tabela 3.7 – Composição da argamassa industrializada Votomassa de múltiplo uso.....	61
Tabela 3.8 – Caracterização do estudo de dosagem. ....	64
Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas no estado fresco. .	99
Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de caracterização aos 28 dias das argamassa no estado .....	101
Tabela 4.3 – Classificação das argamassas ensaiadas aos 28 dias segundo a NBR 13281:2005.....	103
Tabela 4.4 – Ensaios mecânicos das argamassas ensaiadas aos 180 dias. ....	104
Tabela 4.5 – Ensaio de fadiga da argamassa industrializada.....	106
Tabela 4.6 – Ensaio de fadiga da argamassa mista.....	107
Tabela 4.7 – Ciclos médios do ensaio de fadiga das argamassas. ....	109
Tabela 4.8 – Pontos da curva S-N linearizada para compressão. ....	111
Tabela 4.9 – Pontos da curva S-N linearizada para compressão. ....	115
Tabela 4.10 – Pontos da curva S-N linearizada da argamassa industrializada para tração e compressão (Uchôa, 2007).....	116
Tabela 4.11 – Octantes da curva de ruptura generalizada. ....	127
Tabela 4.12 – Resumo dos planos e das equações gerais da curva de ruptura de Coulomb- Mohr no estado tridimensional.....	134

Tabela 4.13 – Resumo dos planos e das equações gerais da curva de ruptura de Coulomb-Mohr para o caso 1.....	137
Tabela 4.14 – Resumo dos planos e das equações gerais da curva de ruptura de Coulomb-Mohr para o caso 2.....	140
Tabela 4.15 – Resumo dos planos e das equações gerais da curva de ruptura de Coulomb-Mohr para o caso 3.....	143
Tabela 4.16 – Resumo dos planos e das equações gerais da curva de ruptura de Coulomb-Mohr para o caso 4.....	146
Tabela A. 1 – Massa específica aparente da cal. ....	159
Tabela A. 2 – Massa específica real da cal.....	159
Tabela A. 3 – Pasta de consistência normal do cimento. ....	159
Tabela A. 4 – Massa específica real do cimento. ....	160
Tabela A. 5 – Massa unitária do cimento. ....	160
Tabela A. 6– Expansibilidade a quente do cimento. ....	160
Tabela A. 7 – Expansibilidade a frio do cimento. ....	160
Tabela A. 8 – Resistência à compressão do cimento aos 3 dias.....	161
Tabela A. 9 – Resistência à compressão do cimento aos 7 dias.....	161
Tabela A. 10 – Resistência à compressão do cimento aos 28 dias.....	161
Tabela A. 11 – Material pulverulento da areia. ....	162
Tabela A. 12 – Massa específica da areia.....	162
Tabela A. 13 – Massa unitária da areia. ....	162
Tabela B. 1 – Retenção de água das argamassas.....	163
Tabela B. 2 – Densidade de massa das argamassas.....	164
Tabela B. 3 – Teor de ar incorporado das argamassas. ....	164
Tabela B. 4 – Penetração de cone das argamassas. ....	164
Tabela B. 5 – Mesa de consistência das argamassas. ....	164
Tabela C. 1 – Capilaridade das argamassas.....	165
Tabela C. 2 – Densidade de massa das argamassas.....	165
Tabela C. 3 – Absorção por imersão, índice de vazios e massa específica das argamassas. .....	166
Tabela C. 4 – Aderência à tração das argamassas. ....	167

Tabela C. 5 – Tração na flexão das argamassas aos 28 dias. ....	167
Tabela C. 6 – Tração na flexão das argamassas aos 180 dias. ....	168
Tabela C. 7 – Compressão das argamassas aos 28 dias.....	168
Tabela C. 8 – Compressão das argamassas aos 180 dias.....	168
Tabela C. 9 – Variação dimensional das argamassas industrializadas.....	169
Tabela C. 10 – Variação dimensional das argamassas mistas.....	170
Tabela C. 11 – Variação de massa das argamassas industrializadas.....	171
Tabela C. 12 – Variação de massa das argamassas mistas.....	172

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1(a) – Descolamento do porcelanato devido a ruptura do emboço (Cichinelli, 2006); (b) – Descolamento da cerâmica decorrente do rompimento na interface argamassa colante/cerâmica. ....	2
Figura 2.1 – Camadas do sistema de revestimento cerâmico. ....	13
Figura 2.2 – Detalhe da junta horizontal de movimentação (Medeiros, 2006). ....	23
Figura 2.3– Comportamento das juntas, salientando a tendência à tração no rejunte (Saraiva <i>et al.</i> , 2002) .....	24
Figura 2.4 – Expansão de uma barra causada por variação de temperatura. ....	28
Figura 2.5 – Barra fixa submetida a variação térmica. ....	29
Figura 2.6 – Revestimento sujeito à esforço de tração. ....	31
Figura 2.7 – Revestimento sujeito à esforço de compressão. ....	33
Figura 2.8 – Modos básicos de carregamento em uma trinca. ....	36
Figura 2.9 – Distribuição de tensões na ponta de uma trinca. ....	37
Figura 2.10 – Estágios do processo de fadiga. ....	39
Figura 2.11 – Ciclo de carregamento.....	41
Figura 2.12 – Curva S-N qualitativa.....	43
Figura 2.13 – Curvas qualitativas de Whöler. ....	47
Figura 2.14 – Diagrama qualitativo tensão deformação para materiais frágeis. ....	48
Figura 2.15 – Teoria da tensão normal máxima em duas dimensões. ....	49
Figura 2.16 – Círculo de Mohr para tração e compressão.....	50
Figura 2.17 – Representação gráfica da teoria de Coulomb-Mohr para estado de tensão biaxial.....	52
Figura 2.18 – Superposição das curvas de Coulomb-Mohr e de tensão normal máxima....	52
Figura 3.1 – Fluxograma com as variáveis de estudo.....	56
Figura 3.2 – Curva granulométrica do cimento obtida a partir do ensaio de granulometria a laser. ....	58
Figura 3.3 – Curva granulométrica da cal obtida através do ensaio de granulometria a laser. ....	59
Figura 3.4 – Detalhe do quarteamento dos agregados miúdos.....	60
Figura 3.5 – Curva granulométrica da areia. ....	61

Figura 3.6 – Curva granulométrica da argamassa industrializada obtida através do ensaio de granulometria a laser. ....	62
Figura 3.7 – Sequência do processo de produção das argamassas. ....	63
Figura 3.8 – Avaliação táctil-visual de argamassas de diversos traços. ....	63
Figura 3.9 – Relação entre cal/cim. versus parâmetro “E” .....	64
Figura 3.10 – Relação entre água/cim. versus parâmetro “E” .....	65
Figura 3.11 – Ensaio de densidade de massa. ....	68
Figura 3.12 – Ensaio de penetração de cone. ....	69
Figura 3.13 – Ensaio de mesa de consistência. ....	70
Figura 3.14 – Ensaio Vane Test. ....	71
Figura 3.15 – Ensaio de retenção de água. ....	73
Figura 3.16 – Ensaio para determinação do teor de ar incorporado. ....	74
Figura 3.17 – Sequência de moldagem dos corpos de prova usados nos ensaios de densidade de massa, absorção, índice de vazios, massa específica, resistência à tração na flexão e resistência à compressão. ....	76
Figura 3.18 – Sequência de moldagem do corpo-de-prova usado no ensaio de retração. ....	77
Figura 3.19 – Sequência de preparação do substrato padrão usado no ensaio de aderência. ....	78
Figura 3.20 – Ensaio de densidade de massa aparente. ....	79
Figura 3.21 – Ensaio de absorção por capilaridade. ....	81
Figura 3.22 – Ensaio de absorção total. ....	83
Figura 3.23 – Ensaio de retração. ....	84
Figura 3.24 – Sequência do ensaio de aderência. ....	86
Figura 3.25 – Ensaio de resistência à tração na flexão. ....	87
Figura 3.26 – Ensaio de módulo de deformação na flexão. ....	89
Figura 3.27 – Ensaio de compressão. ....	90
Figura 3.28 – Geometria do corpo-de-prova do ensaio à fadiga sob tração (Uchôa, 2007). ....	91
Figura 3.29 – Detalhe da barra para fixação do corpo-de-prova na MTS (Uchôa, 2007) ...	92
Figura 3.30 – Mecanismo de apoio para o ensaio de corpos-de-prova cilíndricos 10x20cm submetidos à fadiga sob compressão. ....	92
Figura 3.31 – Processo de retificação dos corpos-de-prova usados no ensaio de fadiga. ...	94
Figura 3.32 – Tela do programa para inserção dos parâmetros do ensaio de fadiga. ....	95
Figura 3.33 – Ensaio de fadiga. ....	96



Figura 3.34 – Tela do programa após a realização do ensaio.....	97
Figura 4.1 – Curvas de retenção de água das argamassas. ....	100
Figura 4.2 – Curva de variação dimensional linear das argamassas. ....	102
Figura 4.3 – Curva de variação de massa das argamassas.....	102
Figura 4.4 – Processo de obtenção dos corpos-de-prova prismáticos a partir dos corpos-de-prova cilíndricos.....	104
Figura 4.5 – Curva S-N com os pontos obtidos no ensaio à fadiga sob compressão. ....	108
Figura 4.6 – Curva S-N com ciclos médios obtidos no ensaio de fadiga.....	110
Figura 4.7 – Possível descontinuidade da curva S-N com ciclos médios. ....	111
Figura 4.8 – Curva S-N das argamassas de emboço sob compressão. ....	112
Figura 4.9 – Curva S-N linearizada das argamassas de emboço sob compressão.....	113
Figura 4.10 – Curva S-N linearizada das argamassas de emboço sob compressão e sob tração. ....	117
Figura 4.11 – Curva de Coulomb-Mohr das argamassas industrializadas obtida com resultados experimentais de compressão e de tração. ....	118
Figura 4.12 – Curva de Coulomb-Mohr da argamassa industrializada estudada por Uchôa (2007). ....	119
Figura 4.13 – Curva de Coulomb-Mohr das argamassas mistas obtida com resistências experimentais para 1 ciclo e resistências avaliadas para $10^6$ ciclos. ....	121
Figura 4.14 – Curva de Coulomb-Mohr das argamassas mistas obtida com resistências experimentais e resistência à tração avaliada para $10^6$ ciclos. ....	122
Figura 4.15 – Curva de Coulomb-Mohr das argamassas mistas e industrializadas. ....	124
Figura 4.16 – Curva de ruptura generalizada. ....	126
Figura 4.17 – Curva de Coulomb-Mohr das argamassas industrializadas obtida com resultados experimentais de compressão e de tração. ....	135
Figura 4.18 – Planos tracionados da curva de Coulomb-Mohr das argamassas industrializadas obtida com resultados experimentais de compressão e de tração. ...	136
Figura 4.19 – Curva de Coulomb-Mohr da argamassa industrializada estudada por Uchôa (2007). ....	138
Figura 4.20 – Planos tracionados da curva de Coulomb-Mohr da argamassa industrializada estudada por Uchôa (2007). ....	139
Figura 4.21 – Curva de Coulomb-Mohr das argamassas mistas obtida com resistências experimentais para 1 ciclo e resistências avaliadas para $10^6$ ciclos. ....	141

Figura 4.22 – Planos tracionados da curva de Coulomb-Mohr da argamassa mista obtida com resistências experimentais para 1 ciclo e resistências avaliadas para $10^6$ ciclos.....	142
Figura 4.23 – Curva de Coulomb-Mohr das argamassas mistas obtida com resistências experimentais e resistência à tração avaliada para $10^6$ ciclos. ....	144
Figura 4.24 – Planos tracionados da curva de Coulomb-Mohr das argamassas mistas obtida com resistências experimentais e resistência à tração avaliada para $10^6$ ciclos. ....	145

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

ANFACER	- Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimento
$f_{cM}$	- resistência estática da argamassa mista
$f_{cI}$	- resistência estática da argamassa industrializada
AM	- argamassa mista
AI	- argamassa industrializada

# **1- INTRODUÇÃO**

## **1.1- APRESENTAÇÃO**

O emprego de sistema de revestimento cerâmico em fachadas vem se intensificando nas regiões litorâneas do Brasil. A escolha deste tipo de sistema tem se dado por inúmeros motivos, dentre os quais destacam-se a melhoria da estanqueidade, a estabilidade, a maior durabilidade, a baixa manutenção e a valorização estética e econômica do imóvel.

Entretanto, apesar das inúmeras propriedades favoráveis apresentadas por este tipo de sistema, ele também pode apresentar diversas manifestações patológicas, sendo a mais freqüente relacionada com o descolamento e deslocamento de peças cerâmicas.

Segundo Fiorito (1994) as prováveis causas do deslocamento são a falta de aderência entre as camadas, a expansão da cerâmica em virtude da umidade, a retração excessiva da argamassa e, sobretudo, o aparecimento de tensões cíclicas decorrentes do efeito térmico que pode levar o sistema de revestimento cerâmico à ruptura por fadiga.

Já para Saraiva (1998), os principais fatores que podem provocar o descolamento das cerâmicas são o peso próprio, principalmente no caso de camadas muito espessas; as diferenças nas propriedades mecânicas dos materiais constituintes das diversas camadas; as movimentações da base; e, sobretudo, os esforços térmicos nas fachadas que ficam grande parte do tempo expostas ao sol e que são revestidas com cerâmicas escuras, as quais apresentam grande potencial de absorção de calor se comparadas com as cerâmicas claras.

Thomaz (2009) reforça mais alguns fatores diretamente relacionados à ocorrência de perda de aderência dos sistemas de revestimento cerâmico, a saber: dimensões mais acentuadas das placas cerâmicas; rigidez da estrutura (esbeltez elevada das estruturas); inércia térmica das paredes (massas pequenas); falta de cuidados no assentamento (não correção da higroscopicidade da base e das próprias placas cerâmicas); e a rigidez do emboço que faz com que haja tentativas de assentamento das placas cerâmicas diretamente sobre as alvenarias.

De acordo com Medeiros (2006) a ocorrência cíclica das solicitações, somadas às perdas naturais de aderência dos materiais de fixação, caracterizam as falhas que costumam resultar em problemas de deslocamento de placas cerâmicas.

Diante dessas ponderações, constata-se que o sistema de revestimento cerâmico empregado nas fachadas é composto por materiais que apresentam características físico-mecânicas diferentes, razão pela qual o mecanismo de aderência entre as camadas apresenta falhas. Essas imperfeições de aderência, associadas ao conjunto de ações solicitantes, como por exemplo, a variação de temperatura, podem produzir estados de tensões e deformações nas fachadas que atuando com certa frequência provocam o descolamento do revestimento.

A Figura 1.1(a) mostra o descolamento do porcelanato causado pela ruptura da argamassa de emboço devido a sua baixa resistência mecânica. A Figura 1.1(b) mostra o rompimento na interface cerâmica/argamassa colante, onde se observa que a argamassa colante permanece fixa no emboço.



Figura 1.1(a) – Descolamento do porcelanato devido a ruptura do emboço (Cichinelli, 2006); (b) – Descolamento da cerâmica decorrente do rompimento na interface argamassa colante/cerâmica.

Nesse contexto, sabendo-se que o sistema de revestimento cerâmico pode ser levado à ruptura por fadiga mesmo sob uma tensão inferior à tensão máxima suportada, em virtude de deformações excessivas e inadequações das camadas do revestimento, tem-se que neste trabalho, a análise do comportamento do sistema de revestimento submetido à fadiga é

feita através da argamassa de emboço, já que ela é considerada a camada de suporte do revestimento.

## **1.2- JUSTIFICATIVA**

O sistema de revestimento cerâmico vem sendo usado em larga escala no país, seja em edifícios de grande porte ou em pequenas residências. Apesar dessa intensa utilização, observa-se que o desenvolvimento científico nesta área ainda é muito limitado, havendo inúmeras lacunas a serem preenchidas, principalmente aquelas relacionadas ao desempenho deste tipo de revestimento frente à fadiga.

Observa-se que a maioria das pesquisas realizadas no Brasil atribui as causas do descolamento de placas cerâmicas apenas ao processo executivo ou à especificação inadequada dos materiais, deixando-se para segundo plano o mecanismo de fadiga das argamassas de revestimento.

Em face desse contexto, torna-se evidente a necessidade de pesquisas de cunho científico que busque entender o mecanismo atuante no processo de descolamento das peças cerâmicas em revestimentos sujeitos à fadiga. Nesse sentido, a pesquisa de Uchôa (2007) é de grande importância, já que ele propõe uma metodologia, baseada em análise experimental e numérica, para avaliar a influência das tensões termomecânicas na ruptura por fadiga à tração das argamassas de emboço.

Vale ressaltar também a contribuição dos trabalhos realizados na área de “Sistemas de Revestimentos” conduzida pelo Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília, na qual se destacam os trabalhos realizados por Saraiva (1998) no estudo do comportamento estrutural do sistema de revestimento cerâmico submetido a tensões termomecânicas; Araújo Júnior (2004) no entendimento do comportamento físico-mecânico das argamassas de revestimento; Paes (2004) na avaliação do transporte de água entre a argamassa fresca e os substratos porosos nos momentos iniciais pós-aplicação; Gonçalves (2004) na identificação dos fatores que influenciam na variabilidade da resistência de aderência à tração nos sistemas de revestimento; Pereira

(2007) no entendimento do mecanismo de movimentação da água na argamassa aplicada sobre substrato de concreto e a sua influência no fenômeno da retração;

Sendo assim, a ausência de um critério normalizado – as normas brasileiras da ABNT sobre revestimentos de argamassa não fazem qualquer menção sobre o assunto, bem como a escassez de estudos para se avaliar a resistência à fadiga de revestimentos de argamassa, motivou a busca para um melhor entendimento do comportamento mecânico das argamassas de emboço submetidas a carregamentos cíclicos.

Desta forma, este estudo representa uma continuação da pesquisa de Uchôa (2007), tendo em vista que os problemas de deslocamento e descolamento no sistema de revestimento cerâmico são decorrentes, sobretudo, da ação de tensões cíclicas principais (tração e compressão).

Então, o objeto de estudo desta pesquisa é avaliar o comportamento mecânico das argamassas de emboço submetidas à fadiga sob compressão através da curva S-N das argamassas e propor um limite de resistência à fadiga sob compressão para as argamassas analisadas. Com isso, as argamassas de emboço ensaiadas estarão caracterizadas em relação ao fenômeno da fadiga.

Sendo assim, vale destacar que, apesar do processo de fadiga ocorrer em todas as camadas do sistema de revestimento cerâmico, neste trabalho a análise da fadiga será feita apenas nas argamassas de emboço.

É importante salientar que o presente trabalho está inserido na linha de pesquisa “Sistemas Construtivos” do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade de Brasília, especialmente no tema “Tensões Térmicas nos Sistemas de Revestimentos de Fachadas e suas Consequências”.

Cabe citar ainda que este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Ensaio de Materiais (LEM), no Laboratório de Geotecnia e no Laboratório de Ensaio da Engenharia Mecânica (GAMMA), todos da Universidade de Brasília.

### **1.3- OBJETIVOS**

O objetivo geral desta pesquisa é analisar as propriedades mecânicas das argamassas de revestimento com ênfase no comportamento à fadiga.

Os objetivos específicos são:

- ✓ Desenvolver e aprimorar as metodologias experimentais dos ensaios de fadiga;
- ✓ Aplicar e desenvolver o ensaio à fadiga sob solicitações cíclicas de compressão;
- ✓ Propor modelos de ruptura e limites de resistência à fadiga para as argamassas de revestimentos estudadas;
- ✓ Analisar criticamente as argamassas ensaiadas em relação à fadiga.

### **1.4- ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

Para se atingir os objetivos propostos, esta dissertação está estruturada em cinco capítulos. No primeiro capítulo, tem-se uma contextualização geral da pesquisa com a apresentação do tema, os motivos que levaram a este estudo e os objetivos do mesmo.

O segundo capítulo mostra um levantamento sobre as principais pesquisas que foram desenvolvidas na área de tensões e fadiga em sistemas revestimentos compondo-se o que chamamos de “estado da arte”. Além disso, são apresentados os fundamentos teóricos que embasam as discussões dos capítulos posteriores, destacando-se as características das camadas do revestimento que influenciam no aparecimento do descolamento de placas cerâmicas e os aspectos mais relevantes do processo de fadiga, com a indicação da curva de ruptura (Teoria de Coulomb-Mohr) usada nesta pesquisa.

O terceiro capítulo descreve o programa experimental desenvolvido para se cumprir com os objetivos propostos. São apresentadas as variáveis de estudo, os ensaios realizados na argamassa no estado fresco e no estado endurecido a fim de se avaliar comportamento



mecânico das argamassas. Tem-se ainda a metodologia criada para estudar a fadiga em argamassas de revestimento sob carregamento cíclico de compressão, incluindo-se o projeto piloto desenvolvido para definição do corpo-de-prova usado neste ensaio.

O quarto capítulo expõe os resultados obtidos, bem como a discussão dos mesmos, finalizando-se com a apresentação da curva S-N e da curva de Coulomb-Mohr para as argamassas de emboço.

O quinto e último capítulo apresenta as considerações finais deste estudo e as sugestões para trabalhos futuros.

## **2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura sobre a incidência de tensões cíclicas (especialmente as provenientes de variações térmicas) que ocasiona a ruptura por fadiga no sistema de revestimento cerâmico (descolamento). Em virtude da carência de pesquisas nesta área e considerando que o concreto também é um material frágil, são mostrados os resultados de pesquisas publicadas na área de fadiga em concreto.

Em seguida, são abordados os principais fundamentos teóricos que embasam o desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente, são apresentados os aspectos gerais dos sistemas de revestimentos cerâmicos e, sobretudo, da argamassa de emboço, do rejunte e da argamassa colante, visto que conforme Saraiva (1998) as tensões ocorridas nestas interfaces provocam o processo de descolamento em fachadas. Posteriormente, tem-se uma discussão do mecanismo de descolamento de placas cerâmicas e por fim, são mostradas as principais características do processo de fadiga, a curva S-N e as teorias que regem a mecânica da fratura.

### **2.1- ESTUDOS REALIZADOS SOBRE TENSÕES E FADIGA EM SISTEMAS DE REVESTIMENTOS**

Os aspectos climáticos constituem um dos principais fatores que influenciam na degradação das fachadas, uma vez que as variações de temperatura e umidade provocam esforços que, associados a outros fatores, podem levar à ruptura dos sistemas de revestimentos cerâmicos. Nesse sentido, o aumento da temperatura gera tensões de cisalhamento na interface cerâmica/argamassa colante e tensões de tração nas extremidades do trecho do revestimento considerado. Considerando-se em seguida uma diminuição da temperatura, as peças cerâmicas tendem a se desprender da base, ocasionando o processo de descolamento (Fiorito, 1994).

Com o intuito de se avaliar as tensões termomecânicas solicitantes do sistema de revestimento cerâmico, destacam-se as pesquisas de Saraiva *et al.* (2002), Paes e Carasek (2001) e Uchôa *et al.* (2008).

A partir de estudos numéricos via método dos Elementos Finitos Saraiva *et al.* (2002) verificou as tensões existentes na interface argamassa colante e cerâmica quando submetidas a esforços térmicos através de um modelo numérico simplificado que simulou a variação da espessura do emboço, do coeficiente de absorção térmica das cerâmicas e do tipo de rejunte. Os resultados alcançados mostraram que as tensões aumentam consideravelmente (em torno de 60%) ao se empregar cerâmicas com alto coeficiente de absorção térmica (de cores escuras). Além disso, os autores concluíram que o uso de rejuntas com menor módulo de elasticidade, produz um aumento nas tensões de cisalhamento na interface argamassa colante/cerâmica/rejuntas e uma diminuição nas tensões de compressão nas cerâmicas.

Paes e Carasek (2001) avaliaram os efeitos da variação de temperatura sobre os sistemas de revestimentos cerâmicos, sobretudo na argamassa e na espessura do rejunte. Para isso, foram executados painéis constituídos por emboço, argamassa colante, cerâmica e rejunte. Ao redor de cada um deles, foi feita uma moldura de argamassa rica em cimento, a qual tinha a finalidade de restringir as movimentações (verticais e horizontais) nas extremidades decorrentes da aplicação do gradiente térmico. Os resultados mostraram que o painel mais rígido foi o que apresentou os menores valores de resistência de aderência e as maiores retrações. Já o painel em que as juntas eram maiores (5mm) apresentou os valores mais elevados de resistência de aderência e uma maior uniformidade das movimentações térmicas, daí que as autoras concluíram que os rejuntas de maiores espessuras conferem maior estabilidade ao revestimento. Portanto, para melhorar o desempenho do revestimento cerâmico as autoras recomendam o emprego de rejunte flexível ou, no caso de argamassas comuns no rejunte, deve-se empregar juntas com maiores espessuras.

Para avaliar a resistência à fadiga de sistemas de revestimentos cerâmicos, Uchôa *et al.* (2008) propôs uma metodologia numérico-experimental considerando a variação cíclica de temperatura da cidade de Brasília. Os autores projetaram e realizaram ensaios em corpos-de-prova de argamassa de emboço sob carga cíclica e com isso verificaram o comportamento à fadiga à tração da argamassa a partir da curva S-N traçada.

Por outro lado, como os trabalhos na área de fadiga de argamassas ainda são bastante incipientes e considerando que as estruturas de concreto (materiais frágeis) também podem

vir a romper por fadiga, a seguir são mostradas diversas pesquisas relacionadas com o processo de fadiga em materiais de concreto.

Balbo e Severi (2002) observaram que durante o dia, com o aumento da temperatura na face superior do pavimento de concreto, a placa de pavimentação tende a sofrer expansão no topo e contração no fundo da placa, surgindo desta forma tensões de tração na parte inferior da placa e tensões de compressão na sua parte superior. Durante a noite, com a diminuição da temperatura, o processo se inverte, notando-se que as tensões de tração passam a ser predominantes no topo e as tensões de compressão no fundo da placa. Assim, os autores concluíram que o gradiente de temperatura determina a intensidade das tensões que surgem nos pavimentos.

Cervo (2004), através de um estudo experimental sobre a resistência à fadiga de concreto de cimento Portland convencional para pavimentos, propôs um modelo de ruptura por fadiga a partir da regressão linear dos resultados obtidos nos ensaios cíclicos. Os resultados mostraram que conforme se aumenta a frequência, o número de ciclos à fadiga também aumenta, para uma mesma relação entre tensões. Já nos ensaios com tensão variável notou-se que ao se diminuir a tensão, o número de ciclos também diminuiu. Observou-se ainda que o número de ciclos à fadiga suportado pelo concreto úmido foi de 1% a 19% da resistência à fadiga do concreto seco para relações entre tensões abaixo de 0,95. Este comportamento se inverte quando a relação entre tensões era igual a 1, ou seja, a tensão máxima aplicada sob fadiga era igual a resistência estática.

Tepfers e Kutti (1979) desenvolveram um modelo que descreve o comportamento das estruturas de concreto submetidas a tensões cíclicas de compressão. Para tanto, foram realizados ensaios em concretos convencionais e concretos leves de modo que os autores conseguiram propor equações de fadiga que atendesse a ambos.

Como o processo de fadiga é influenciado por diversos fatores, inúmeras pesquisas foram desenvolvidas para avaliar o efeito dos mesmos no comportamento à fadiga.

Em relação ao agregado empregado, Waagaard (1986 apud Zhang *et al.*, 1997) mostrou que o concreto armado de alta resistência produzido com agregado leve quando submetido

à teste de fadiga sob compressão apresenta resistência superior se comparado ao concreto convencional.

Já Li *et al.* (2007) avaliou o desempenho sob fadiga à flexão de pavimentos de concreto contendo nano-partículas e fibras de polipropileno, concluindo que a adição de fibras de polipropileno melhora o desempenho à fadiga do concreto sob o carregamento cíclico à flexão, já que elas podem construir uma ponte sobre as microfissuras e retardar seu crescimento, prolongando desse modo a vida à fadiga do concreto. As nano-partículas também melhoram o desempenho do concreto sob fadiga, uma vez que elas podem promover a hidratação do cimento devido a sua atividade elevada, tornando a matriz do cimento mais homogênea e compacta.

Crepaldi e Djanikian (2001) buscaram formular um modelo de fadiga à flexão do concreto que servisse ao dimensionamento de estruturas. Para tanto, foram produzidos concretos com cimento Portland, agregados minerais e látex Neoprene. Os resultados desta pesquisa indicaram que o uso de látex Neoprene provocou reduções da resistência à compressão e do módulo de deformação de 20% para um teor de 2% de látex e 40% para um teor de 5% de látex. Além disso, nesta pesquisa constatou-se que a introdução de látex produziu um aumento do ar incorporado dos concretos, medido no estado fresco e também visível nas faces rompidas, o que resultou em considerável aumento da incidência de ruptura na argamassa.

Vale salientar que, em geral, a introdução de látex melhora as propriedades dos materiais sujeitos à fadiga, uma vez que o látex quebra as tensões superficiais dos materiais, entretanto, observa-se que nesta pesquisa foi obtido um comportamento inverso.

Quanto ao histórico de carregamento, Hsu (1981) avaliou os efeitos da taxa de carregamento no comportamento à fadiga (sob compressão e sob flexão) do concreto oogsimples, desenvolvendo dois modelos de fadiga, um para elevado números de ciclos ( $N > 10^5$ ) e outro para baixo número de ciclos ( $N < 10^3$ ). Os resultados mostraram que a taxa de carregamento é mais sensível na fadiga de baixo ciclo.

Nesta linha, Cook e Chindaprasirt (1980) analisaram as propriedades mecânicas do concreto submetidos à carregamento de longa duração e carregamento cíclico, ambos sob compressão. O primeiro provocou um aumento considerável na rigidez do concreto e um acréscimo em menor escala na sua resistência, propiciando uma redistribuição da concentração de tensão. Ao passo que as tensões cíclicas propiciaram um comportamento inverso, ou seja, uma diminuição considerável na rigidez e um pequeno decréscimo na resistência o concreto, ocasionando o aparecimento de microfissuras.

Murdock (1965 apud Zhang *et al.*, 1996) verificou que quando a tensão máxima usada no ensaio de fadiga é inferior a 75% da resistência estática do concreto, as frequências de carregamento com valores entre 1 e 15 Hz pouco influenciam na resistência à fadiga do concreto.

No entanto, Zhang *et al.* (1996) em pesquisas realizadas em concretos submetidos à testes de fadiga sob flexão verificaram que quanto maior a frequência, maior a resistência à fadiga do concreto confirmando as observações de Cervo (2004) e esta corresponde a aproximadamente 80% da resistência estática do material.

Portanto, a partir dos estudos realizados, constata-se que as variações de temperatura são responsáveis por grande parte das tensões cíclicas que surgem nos sistemas de revestimentos e em geral, tais tensões são de tração ou de compressão e aparecem na interface emboço/argamassa colante e cerâmica.

Com isso, neste trabalho será considerado que o processo de deslocamento de placas cerâmicas é causado pelas tensões cíclicas decorrentes da variação de temperatura, ou seja, o descolamento nada mais é do que a perda de aderência no sistema de revestimento decorrente do fenômeno da fadiga.

## **2.2- SISTEMAS DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS**

### **2.2.1 - Aspectos gerais do sistema de revestimento cerâmico**

O sistema de revestimento cerâmico é um conjunto de camadas de materiais diferentes superpostas que estão intimamente ligadas e que devem apresentar um comportamento

compacto aderido ao substrato para não apresentar problemas e desempenhar adequadamente as funções para as quais foi projetado.

Segundo Medeiros e Sabbatini (1999) este sistema pode ser entendido como um conjunto monolítico de camadas aderidas à base (alvenaria ou estrutura) suportante da fachada do edifício, cuja capa exterior é constituída de placas cerâmicas, assentadas e rejuntadas com argamassa adesiva.

Para satisfazer às necessidades dos usuários, o sistema de revestimento cerâmico deve apresentar as seguintes características: estabilidade mecânica frente aos fenômenos térmicos ou climáticos, estanqueidade à água e aos gases, isolamento termo-acústico, resistência ao fogo, regularização da base, contribuição para a estética do edifício (Maciel *et al.*, 1998; Cincotto *et al.*, 1995).

Pelos expostos anteriores, constata-se que o sistema de revestimento cerâmico tem como principal papel proteger e dar acabamento estético às edificações. Isto quer dizer que ele tem a função de proteger a edificação da ação da umidade, da chuva, do desgaste mecânico e de agentes atmosféricos, além de embelezar e, conseqüentemente, valorizar economicamente o imóvel.

Quanto à constituição, o sistema de revestimento cerâmico de fachada é formado basicamente por quatro camadas que compreendem o chapisco, argamassa de emboço, argamassa colante e placa cerâmica, sendo que entre estas deve haver o rejunte, conforme podem ser visualizadas na Figura 2.1:

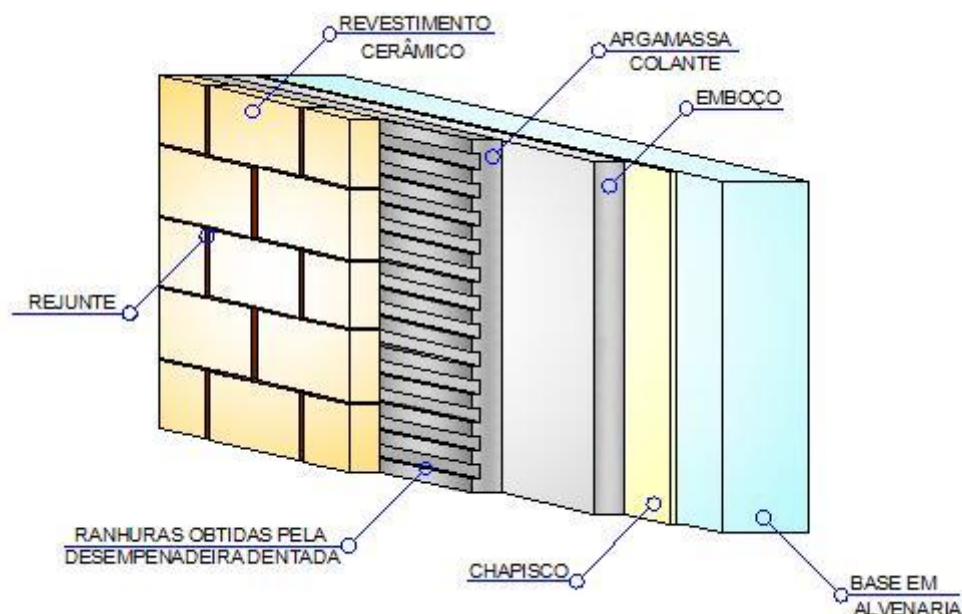


Figura 2.1 – Camadas do sistema de revestimento cerâmico.

A seguir, são mostradas as principais características de cada uma dessas camadas, bem como as propriedades que mais influenciam no aparecimento de manifestações patológicas nos revestimentos, sobretudo o descolamento de placas cerâmicas.

#### 2.2.1.1 - Base

Em obras convencionais, a base é constituída por componentes de alvenaria de diferentes tipos (por exemplo, os blocos cerâmicos e os blocos de concreto) ou pelos elementos estruturais de concreto (vigas, pilares, etc.).

As características dos materiais constituintes da base que influenciam na aderência estão relacionadas com a sua porosidade (capacidade de sucção da água) e com a sua textura superficial (rugosidade).

A capacidade de sucção da base é de suma importância, já que é ela que determina a quantidade de água da argamassa de emboço que será “perdida” para a base. Segundo Paes (2004) esta interação provoca um transporte de água da argamassa fresca para o substrato, de forma que este processo depende das características da argamassa, da natureza do substrato e da espessura do revestimento.



Kazmierczak *et al.* (2007) observou que os substratos constituídos de bloco cerâmico de vedação, bloco de concreto e tijolo maciço (com e sem chapisco) apresentam capacidade de absorção de água diferentes, evidenciadas por uma sensível diferença na distribuição de poros. Especificamente neste trabalho, os autores constataram que o bloco cerâmico pode ser considerado com porosidade mediana, enquanto o bloco de concreto e o tijolo maciço podem ser considerados com elevada porosidade.

Em relação às características físicas superficiais da base, tem-se que quanto mais rugosa for a sua superfície, maior será a sua resistência de aderência ao cisalhamento (cabe ressaltar que a resistência de aderência à tração pode ou não melhorar), haja vista que as rugosidades aumentam a área de contato entre a argamassa e o substrato, o que aumenta potencialmente a aderência entre eles.

#### 2.2.1.2 - Chapisco

Como foi visto anteriormente, há uma grande variedade de materiais empregados na base dos sistemas de revestimentos, os quais por sua vez, alteram o comportamento do revestimento como um todo, principalmente a sua resistência de aderência. Dessa forma, em determinadas situações, é necessária uma “preparação da base” a fim de se uniformizar a sua sucção e a sua rugosidade, principalmente quando a superfície da base é muito lisa ou apresenta porosidade e capacidade de sucção inadequadas, ou ainda quando os revestimentos estão sujeitos a solicitações mais severas, como revestimentos externos.

Conforme Cândia e Franco (1998) o chapisco é empregado para regularizar a capacidade de sucção de água e aumentar a rugosidade superficial da base, melhorando desta forma a sua capacidade de aderência.

Portanto, constata-se que o chapisco pode melhorar consideravelmente as características dos substratos, proporcionando uma maior aderência do sistema base-revestimento, já que ele favorece a sucção nos substratos pouco absorventes, diminuem a avidez por água dos substratos muito absorventes e auxiliam na adesão no estado fresco.

### 2.2.1.3 - Emboço

O revestimento de argamassa é um dos sistemas que pode ser formado por dupla camada com a última camada pigmentada ou monocamada. Segundo a NBR 13529:1995 o emboço é a camada de revestimento que serve para cobrir e regularizar a superfície da base ou chapisco, propiciando uma superfície capaz de receber outras camadas, como o reboco ou o elemento decorativo, ou se constituir em acabamento final. Na verdade, Cândia (1997, apud Bauer, 2005) afirma que o emboço constitui o “corpo do revestimento”, devendo apresentar aderência ao substrato e textura adequada para se ancorar (aplicar) a outra camada subsequente.

Dessa maneira, é de suma importância avaliar as propriedades da argamassa para emboço que influenciam no mecanismo de aderência, e conseqüentemente no descolamento das peças cerâmicas, a saber: trabalhabilidade, capacidade de retenção de água, densidade de massa, capacidade de aderência, resistências mecânicas de corpo e de superfície, retração e capacidade de absorver deformações, as quais serão sucintamente comentadas a seguir.

Uma condição de trabalhabilidade adequada é influenciada por duas propriedades fundamentais da argamassa que são a consistência e a plasticidade. A primeira refere-se à capacidade da argamassa de resistir às deformações que lhe são impostas, ou seja, está relacionada com a sua facilidade de se deformar sob carregamento, enquanto que a segunda menciona a capacidade da argamassa manter a deformação resultante da ação de cargas externas, mesmo depois da retirada das cargas, com ausência de ruptura.

Carasek (1996) define que a trabalhabilidade da argamassa é a habilidade de fluir ou espalhar-se sob a superfície do componente do substrato, por suas saliências, protuberâncias e fissuras, definindo a intimidade do contato entre a argamassa e o substrato relacionando-se assim com a extensão<sup>1</sup> da aderência do revestimento.

O método usado para execução do emboço é influenciado pela extensão de aderência, haja vista a eficiência no preenchimento da superfície a ser aderida. Dessa forma, na interface

---

<sup>1</sup> Extensão da aderência nada mais é do que a razão entre a área de contato disponível e a área efetivamente unida (Carasek, 1996).

base/argamassa de emboço, é imprescindível que haja uma pressão uniforme em todo o pano da fachada para garantir a ancoragem.

Em face desse contexto, nota-se que a trabalhabilidade é um parâmetro importantíssimo para assegurar a qualidade da argamassa, entretanto, a avaliação da condição de trabalhabilidade de uma argamassa ainda é uma atividade bastante empírica e subjetiva que, frequentemente, é feita pelo operário a partir do manuseio da argamassa com a colher de pedreiro.

Outra propriedade da argamassa do emboço de importância significativa é a retenção de água, a qual deve ser avaliada em função das características do meio externo e da capacidade de sucção de água do substrato, tendo em vista que o emboço pode vir a “perder” a água necessária para a hidratação do cimento e a manutenção da trabalhabilidade.

Para Do Ó (2004) a retenção de água está relacionada com a capacidade da argamassa de revestimento não alterar seu comportamento reológico de forma a comprometer a sua trabalhabilidade, mantendo-se aplicável por um período máximo de tempo quando sujeita a solicitações que provoquem perda de água, seja ela por evaporação, sucção do substrato ou reações de hidratação.

Cabe ressaltar que a rápida perda de água prejudica a aderência, a capacidade de absorver deformações e a resistência mecânica do sistema de revestimento, comprometendo, conseqüentemente, a durabilidade e a estanqueidade do mesmo (Maciel *et al.*, 1998).

A densidade de massa é outra propriedade da argamassa caracterizada em laboratório que deve ser considerada. No estado fresco, ela é um indicativo do teor de ar presente na mistura e da facilidade de aplicação que a argamassa possui, tendo em vista que quanto menor a densidade de massa, menor o esforço para sua aplicação (Alves, 2002).

Já no estado endurecido, ela representa um indicativo da compacidade resultante da proporção de mistura agregado/aglomerante e da distribuição granulométrica do conjunto (Nakakura e Cincotto, 2004). Indiretamente, ela determina o volume de vazios

incorporados pelos aditivos e a quantidade de água de emassamento perdida por evaporação.

Por sua vez, a aderência da argamassa ao substrato é a propriedade de maior relevância no desempenho estrutural dos sistemas de revestimento, podendo causar inúmeras patologias (inclusive o descolamento das cerâmicas) por causa da sua elevada variabilidade. De acordo com Gonçalves e Bauer (2005), a dispersão nos valores de aderência resulta do processo executivo do revestimento, dos materiais utilizados e das condições climáticas. Somado a isso, os autores constataram que a aderência da argamassa ao substrato não ocorre de maneira homogênea em um plano de revestimento devido a sua alta variabilidade natural.

A aderência representa a capacidade do revestimento em se manter estável sobre o substrato quando submetido às diversas solicitações. Paes (2004) mostrou que o processo de desenvolvimento da aderência pode ser entendido em três fases complementares:

- ✓ *Adesão inicial*: Está ligada às características reológicas da pasta aglomerante, sendo que a adesão física da argamassa ao substrato ocorre devido à baixa tensão superficial da pasta. Este processo permite que a argamassa permaneça aderida ao substrato momentaneamente após a sua aplicação.
- ✓ *Adesão*: Caracteriza-se pelo transporte intenso de água da argamassa. Ela ocorre durante o período de tempo no qual a argamassa está à espera do sarrafeamento, em que se observa uma diminuição nítida de sua plasticidade e aumento da sua consistência. A partir deste instante, tem-se a aderência propriamente dita.
- ✓ *Aderência*: É marcada pelo enrijecimento completo da argamassa. Nesse momento, o mecanismo de intertravamento mecânico passa a ser determinante para esta propriedade.

Outro efeito considerável no mecanismo de aderência é a retração por secagem da argamassa de emboço, a qual provoca uma diminuição de volume do revestimento em virtude da perda de água. Esta contração gera solicitações de tração e compressão nas

camadas do revestimento que tendem a levar ao aparecimento de fissuras, o que posteriormente pode vir a provocar o deslocamento de peças cerâmicas, comprometendo assim a qualidade e a durabilidade do revestimento.

Para minimizar os efeitos da retração é importante respeitar os tempos de execução das diversas camadas, diminuindo assim a movimentação da base decorrente da retração hidráulica, propriedade comum aos produtos cimentícios. Tais movimentações geram tensões superficiais, muitas vezes de magnitude superior as que o conjunto cerâmica/argamassa colante é capaz de suportar, ocasionando assim o descolamento.

Bastos (2001) constatou que as argamassas ricas em cimento são mais propícias ao aparecimento de fissuras durante a secagem. Além disso, o valor de retração obtido nas primeiras 24 horas corresponde a uma parcela significativa dos resultados obtidos aos 28 dias.

Por fim, têm-se as propriedades relacionadas com a resistência mecânica e o módulo de elasticidade. A primeira refere-se à capacidade dos revestimentos de apresentarem um estado de coesão interna capaz de suportar os esforços mecânicos (tração, compressão e cisalhamento) a que são submetidos, enquanto que a segunda representa a capacidade da argamassa em absorver deformações (na argamassa fresca, devido à perda de água decorrente da sucção da base e pela evaporação ao ambiente; e na argamassa endurecida em virtude das tensões geradas por gradientes de temperatura, umidade, vibrações, sobrecargas e outros) sem apresentar fissuras.

Essas propriedades apresentam comportamentos inversamente proporcionais, como pode ser visualizado na Equação 2.1 em que a deformabilidade do material ( $\varepsilon$ ), para um mesmo carregamento ( $\sigma$ ), é tanto maior quanto menor for a sua capacidade de absorver deformações (E).

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (2.1)$$

onde:

$\varepsilon$  = deformação unitária (mm/m)

$\sigma$  = tensão (MPa)

E = módulo de deformação (GPa)

Sendo assim, a capacidade de absorver deformações é uma característica imprescindível para todas as camadas que compõem o revestimento externo, uma vez que a edificação diariamente está sujeita às mais diferentes solicitações (de origem térmica, hidráulica, etc.) que geram, por sua vez, movimentações diferenciais entre os componentes. Com isso, constata-se que o conhecimento desta propriedade é fundamental para se evitar o aparecimento de fissuras na argamassa, sobretudo em regiões de clima quente como a cidade de Brasília.

Por outro lado, sabe-se que a argamassa de emboço convencional tem como constituinte principal o cimento que é um material que apresenta elevada rigidez. Assim, o acréscimo na quantidade de cimento para incrementar a resistência mecânica da argamassa pode não proporcionar um desempenho satisfatório quanto à sua deformabilidade. Daí a necessidade de um estudo de dosagem adequado.

#### 2.2.1.4 - Argamassa colante

A principal função da argamassa colante é promover a aderência das placas cerâmicas às camadas que lhe servem de base. Para Medeiros e Sabbatini (1999) a argamassa colante proporciona as seguintes vantagens quando usada de forma adequada: racionalização do processo executivo e redução de custos; manutenção das características dos materiais; maior uniformização do serviço; facilidade de controle; menor consumo de material; maior possibilidade de adequação às necessidades de projeto; e grande potencial de aderência.

No entanto, têm-se observado inúmeros problemas nos revestimentos cerâmicos, principalmente em decorrência das tensões que surgem entre a argamassa de emboço e a argamassa colante e entre a peça cerâmica e a argamassa colante fruto da falta de conhecimento das propriedades deste material. Em face desse contexto, a seguir são apresentadas as principais propriedades deste tipo de material.

De acordo com a NBR 14081:1998 as argamassas colantes podem ser classificadas em quatro tipos diferentes de acordo com o seu local de aplicação conforme mostrado na

Tabela 2.1. Entretanto, vale ressaltar que esta norma não leva em consideração a flexibilidade das argamassas e não é considerada uma norma de projeto.

Tabela 2.1 – Classificação das argamassas colantes segundo seu local de aplicação.

<b>CLASSES</b>	<b>LOCAL DE APLICAÇÃO</b>
ACI	Uso interior, com exceção de saunas, churrasqueiras, estufas e outras aplicações especiais.
ACII	Uso externo. Apresenta resistência à esforço de ciclos térmicos e higrotérmicos da ação da chuva e/ou vento e movimento de pedestres e máquinas e equipamentos.
ACIII	Uso em saunas, piscinas, estufas e ambientes similares. Apresenta alta aderência à tração superior.
ACIII-E	Similar ao tipo III com tempo em aberto estendido.

Silva e Cincotto (2004) apresentam uma série de requisitos que podem ser exigidos na especificação da argamassa colante. Entretanto, acredita-se que as propriedades mais significantes da argamassa colante se comparadas com a argamassa comum são a resistência de aderência à tração e a retenção de água. A primeira está relacionada com a capacidade da argamassa colante em suportar esforços de tração direta normais ao plano de referência, e tangenciais de cisalhamento.

Já a segunda possibilita a aplicação da argamassa colante em camada fina, sem a necessidade de molhar as peças cerâmicas nem tampouco o substrato, o que aumenta a produtividade do processo executivo. A retenção de água está relacionada com o tempo em aberto teórico da argamassa, definido na NBR 14083:1998 como o intervalo de tempo máximo entre a extensão da argamassa sobre o substrato padrão e o assentamento da placa cerâmica que resulte em aderência média de 0,5MPa.

O tempo em aberto é considerado como um dos principais requisitos para o desempenho adequado da argamassa colante. De acordo com Chew (1992 apud Silva e Cincotto, 2004) quando as placas cerâmicas são assentadas após o tempo em aberto da argamassa colante, ocorre a diminuição da resistência de aderência em virtude da formação de uma película que compromete a adesão inicial.

Cabe ressaltar que a escolha da argamassa colante a ser empregada no revestimento cerâmico depende do tipo de cerâmica especificado.

#### 2.2.1.5 - Cerâmica

As placas cerâmicas quando comparadas com outros tipos de revestimentos apresentam inúmeras vantagens, tais como versatilidade, facilidade de limpeza, estabilidade de cores, durabilidade, etc. Entretanto, além de contribuir para a estética da edificação, as placas cerâmicas devem apresentar algumas propriedades para assegurar o prolongamento da vida útil do revestimento de fachada.

As principais solicitações sobre as cerâmicas do sistema de revestimento estão relacionadas com as movimentações higroscópicas (conhecida como EPU<sup>2</sup>) decorrentes da absorção de água da placa cerâmica oriundas de chuva e da umidade relativa do ar, e com as movimentações geradas pela variação de temperatura.

Segundo a ANFACER para minimizar as movimentações higroscópicas deve-se optar por peças cerâmicas com absorção de água  $\leq 6\%$ , já que estas movimentações solicitam a interface argamassa colante/base, submetendo-a a tensões tangenciais que podem resultar no descolamento das peças cerâmicas. Apesar das normas brasileiras não mencionarem os limites de absorção de água para cerâmicas usadas em fachadas, a Tabela 2.2 indica a classificação da placa cerâmica em função da sua capacidade de absorção de água.

Tabela 2.2 – Grupos de absorção de água das placas cerâmicas (ANFACER, 2009).

<b>CLASSIFICAÇÃO</b>	<b>ABSORÇÃO</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>
Porcelanatos	0, a 0,5%	Baixa absorção e resistência mecânica alta.
Grês Baixa	0,5 a 3,0%	Absorção e resistência mecânica média.
Semigrês	3,0 a 6,0%	Média absorção e resistência mecânica média.
Semiporoso	6,0 a 10,0%	Média alta absorção e resistência mecânica baixa.
Poroso	10,0 a 20,0%	Alta absorção e resistência mecânica baixa.

<sup>2</sup> A NBR 13818:1997 recomenda que as placas cerâmicas não devem apresentar expansão por umidade superior a 0,6mm/m a fim de se evitar o aparecimento de patologias.



Outro aspecto que deve ser levado em conta é a dimensão da peça cerâmica a fim de se diminuir o peso próprio da peça, bem como os percentuais de dilatações da mesma. Segundo Cichinelli *et al.* (2006), embora qualquer tamanho de placa seja suscetível ao problema de descolamento, quanto menor a peça cerâmica, mais estável será o sistema de revestimento, tendo em vista a maior quantidade de juntas existentes para dissipar as tensões internas do revestimento. Entretanto, quanto maiores forem as placas cerâmicas, maiores os esforços de cisalhamento induzidos na interface de aderência e maiores serão os riscos de descolamento, sobretudo, em virtude da diminuição da quantidade de juntas de assentamento para dissipar as tensões internas do revestimento.

Em relação ao comportamento mecânico da cerâmica, para Saraiva (1998) os materiais cerâmicos apresentam módulo de elasticidade maior que os outros materiais em virtude da força das suas ligações interatômicas. Quanto à resistência mecânica, com exceção de certos materiais (por exemplo, a argila), os materiais cerâmicos caracterizam-se pela alta resistência ao cisalhamento e pela baixa resistência à tração.

Por outro lado, as peças cerâmicas apresentam fratura frágil, isto é, elas apresentam pouca ou nenhuma deformação plástica considerável e sua resistência ao impacto é bastante reduzida (baixa tenacidade à fratura), o que impede que elas sejam mais empregadas para fins estruturais. Segundo Zanotto e Migliore (1991) esta situação ainda é agravada pela elevada variabilidade da resistência à fratura das peças de um mesmo lote de maneira que a resistência máxima de algumas cerâmicas seja o dobro da mínima.

#### 2.2.1.6 - Juntas

As juntas de assentamento (cujos materiais são os rejuntes) são usadas para permitir a movimentação unitária da peça cerâmica, a propagação de vapor de água (possibilitando a estanqueidade do revestimento) e o alívio de tensões.

De acordo com Junginger (2003), a principal função do rejunte é absorver os esforços decorrentes da movimentação da cerâmica e da base de forma a aliviar as tensões sobre o sistema de revestimento, prolongando desta forma a sua vida útil.

Sendo assim, geralmente o rejunte é formado por uma argamassa de cimento misturada com resinas com a finalidade de reduzir a sua permeabilidade e torná-lo menos rígida, daí a razão dele normalmente ser industrializado.

Já as juntas de movimentação (Figura 2.2) servem para aliviar as tensões decorrentes não só das movimentações da cerâmica como também de todas as camadas que envolvem o revestimento. Constituem-se de um corte no emboço, o qual é preenchido com um material resiliente<sup>3</sup> e complementado com material selante<sup>4</sup> até a face da cerâmica. A NBR 13755:1996 recomenda os espaçamentos necessários tanto para a execução das juntas horizontais como para as verticais.

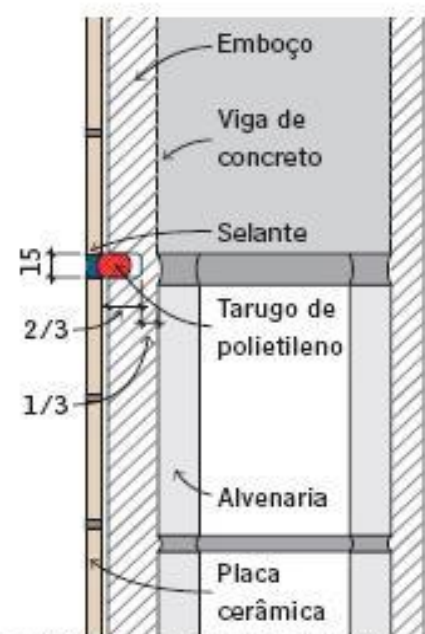


Figura 2.2 – Detalhe da junta horizontal de movimentação (Medeiros, 2006).

A partir destas definições, verifica-se que as juntas são consideradas pontos críticos nos projetos de fachadas. Os primeiros sinais de que as juntas estão se deteriorando aparecem quando há perda de estanqueidade do revestimento. Isto pode ser observado nos primeiros

---

<sup>3</sup> material resiliente: geralmente são empregados espumas de polietileno expandido, já que elas são inertes e têm a função de limitar a profundidade do selante, evitar a sua adesão ao fundo da junta e uniformizar a base, facilitando a sua aplicação.

<sup>4</sup> material selante: são usados materiais impermeáveis e flexíveis à base de silicone, poliuretano, acrílico, dentre outros.

instantes após a sua execução, através de procedimentos de limpeza inadequados associados a solicitações mecânicas decorrentes de movimentações estruturais ou variação de temperatura, o que podem vir a causar fissuração e, conseqüentemente bem como a infiltração de água, levando o revestimento ao colapso (descolamento de placas cerâmicas).

Além disso, a perda de estanqueidade pode ocorrer em virtude de a junta estar preenchida apenas superficialmente, formando uma capa frágil que pode se desagregar após alguns meses da entrega da obra. Isto acontece em casos em que a junta é muito estreita ou quando o rejunte perde a trabalhabilidade rapidamente devido a temperatura ambiente elevada.

Em relação às tensões nas regiões dos rejuntas, Saraiva *et al.* (2002) cita que a tensão na interface junta/argamassa colante aumenta de acordo com a capacidade de deformabilidade da argamassa colante, uma vez que um módulo de elasticidade baixo permite um maior deslocamento relativo entre peças cerâmicas e argamassa colante, de maneira a “forçar” com mais intensidade a saída do rejunte.

Além disso, os autores observaram que há tensões de tração abaixo das juntas na região entre a argamassa colante e a cerâmica. Isto ocorre em virtude do rejunte ser mais deformável que a cerâmica, o que acaba provocando uma tendência de flambagem das peças cerâmicas e de “expulsão” do rejunte, já que a camada de argamassa colante acaba impedindo o seu deslocamento para baixo. Com isso, há o aparecimento de tensões de tração nesta região e tensões de compressão na interface argamassa colante/emboço (Figura 2.3).

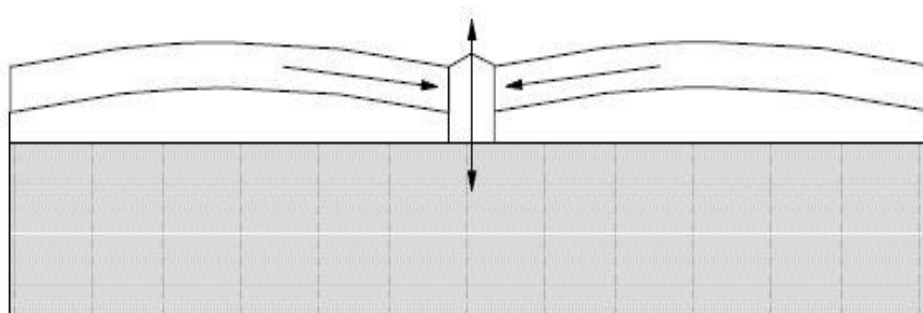


Figura 2.3– Comportamento das juntas, salientando a tendência à tração no rejunte (Saraiva *et al.*, 2002)

## 2.2.2 - Normas brasileiras e classificação da argamassa de emboço

Após essa breve discussão sobre as camadas que compõem o sistema de revestimento cerâmico, nota-se que elas precisam apresentar alguns requisitos para cumprir adequadamente com o papel que lhe foi atribuído e evitar o aparecimento de manifestações patológicas, sobretudo o descolamento de placas cerâmicas.

Nesse sentido, tem-se a NBR 13281:2005 que estabelece que tanto a argamassa mista como a argamassa industrializada deve apresentar, no mínimo, os requisitos das Tabelas abaixo.

Tabela 2.3 – Retenção de água.

MÉTODOS DE ENSAIO	CLASSE	RETENÇÃO DE ÁGUA (%)
NBR 13277:2005	U1	$\leq 78$
	U2	72 a 85
	U3	80 a 90
	U4	86 a 94
	U5	91 a 97
	U6	95 a 100

Tabela 2.4 – Densidade de massa no estado fresco.

MÉTODOS DE ENSAIO	CLASSE	DENSIDADE DE MASSA (kg/m <sup>3</sup> )
NBR 13278:2005	D1	$\leq 1.400$
	D2	1.200 a 1.600
	D3	1.400 a 1.800
	D4	1.600 a 2.000
	D5	1.800 a 2.200
	D6	$> 2.000$

Tabela 2.5 – Densidade de massa aparente no estado endurecido

<b>MÉTODOS DE ENSAIO</b>	<b>CLASSE</b>	<b>DENSIDADE DE MASSA (kg/m<sup>3</sup>)</b>
NBR 13280:2005	M1	≤ 1.200
	M2	1.000 a 1.400
	M3	1.200 a 1.600
	M4	1.400 a 1.800
	M5	1.600 a 2.000
	M6	> 1.800

Tabela 2.6 – Resistência mecânica.

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>MÉTODO DE ENSAIO</b>	<b>CLASSE</b>	<b>LIMITES</b>
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)	NBR 13279:2005	P1	≤ 2,0
		P2	1,5 a 3,0
		P3	2,5 a 4,5
		P4	4,0 a 6,5
		P5	5,5 a 9,0
		P6	> 8,0
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO (MPa)	NBR 13279:2005	R1	≤ 1,5
		R2	1,0 a 2,0
		R3	1,5 a 2,7
		R4	2,0 a 3,5
		R5	2,7 a 4,5
		R6	> 3,5

### 2.2.3 - Mecanismo do descolamento em sistemas de revestimentos

O processo de descolamento pode ser entendido como a perda de aderência entre a placa cerâmica e a argamassa de emboço ou entre a camada de emboço e a base em virtude das solicitações impostas ultrapassarem a resistência de aderência entre essas camadas.

Na verdade, Sabbatini e Barros (2001) explicam que, dentre outros fatores, o descolamento é provocado basicamente pelas tensões decorrentes da instabilidade do suporte (acomodação do edifício e deformação lenta da estrutura de concreto) e das variações higroscópicas e de temperatura.

Sendo assim, considerando que o deslocamento de placas cerâmicas ocorre principalmente devido às tensões térmicas existentes nas interfaces argamassa de emboço/argamassa colante/cerâmica, a seguir é mostrado o efeito da temperatura no revestimento, bem como as solicitações de tensões decorrentes da variação de temperatura a fim de auxiliar o entendimento do mecanismo do descolamento de placas cerâmicas.

#### 2.2.3.1 - Efeito da temperatura nos sistemas de revestimentos

O sistema de revestimento cerâmico frequentemente está submetido à ação de agentes externos de várias naturezas que provocam deformações em uma de suas camadas e, conseqüentemente, o aparecimento de tensões em todo o sistema.

Dentre os agentes atmosféricos, neste trabalho será enfatizada a ação da temperatura, já que ela provoca diversas alterações físicas e/ou químicas nas fachadas dos edifícios, merecendo destaque a variação dimensional (dilatação ou contração) que causa o aparecimento de tensões que por sua vez podem levar ao aparecimento de deformações ou até mesmo à ruptura do revestimento.

Isso pode ser constatado na região do Distrito Federal e entorno, onde as variações cíclicas de temperatura diárias são bastante visíveis, o que acaba provocando com mais freqüência o processo de deslocamento de peças cerâmicas nas fachadas dos edifícios. Na verdade, isto ocorre porque após certo número de ciclos, mesmo que a tensão térmica atuante no revestimento seja inferior ao seu limite de resistência, este sistema pode vir a romper por fadiga.

Diante dessas considerações, é de suma importância conhecer o efeito das tensões térmicas atuantes nas fachadas, tendo em vista que elas podem provocar a fadiga no revestimento cerâmico e, conseqüentemente, o fenômeno do deslocamento. As tensões térmicas serão

avaliadas a partir da deformação de um elemento causada pelo seu aquecimento ou resfriamento (alongamento ou contração). A seguir, são apresentadas as equações que regem as tensões geradas por solicitações uniaxiais em uma barra (Fiorito, 1994). Posteriormente, tais conceitos serão estendidos para a avaliação do revestimento cerâmico.

A Figura 2.4 ilustra uma barra de comprimento  $L$  com material homogêneo sendo resfriada, verificando-se que sua temperatura passa de  $T_1$  para  $T$  ( $T > T_1$ ).

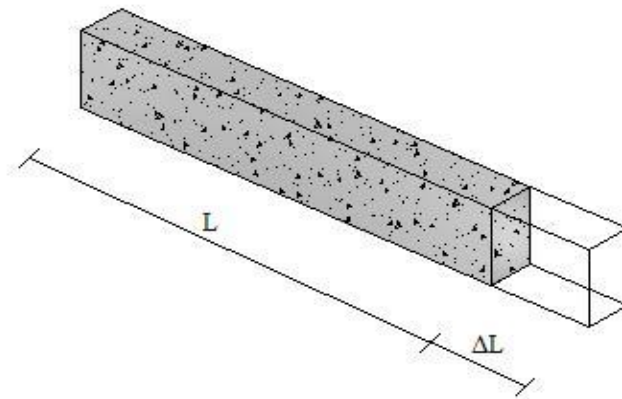


Figura 2.4 – Expansão de uma barra causada por variação de temperatura.

A dilatação sofrida pela barra pode ser determinada pela Equação 2.2:

$$\Delta L = L \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (2.2)$$

onde:

$L$  = comprimento inicial da barra

$\alpha$  = coeficiente de dilatação térmica do material

$\Delta L$  = dilatação da barra

$\Delta T = (T_2 - T_1)$  = variação de temperatura

Caso as extremidades dessa barra estejam fixas de modo a impedir sua dilatação, ela ficará submetida a um estado de tensão regido pela Lei de Hooke (Figura 2.5):

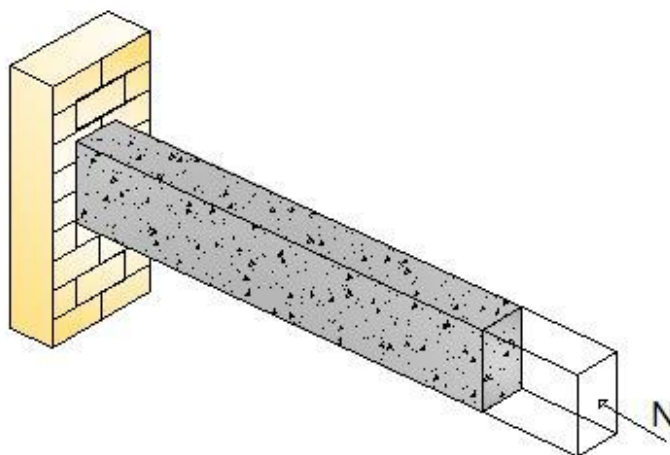


Figura 2.5 – Barra fixa submetida a variação térmica.

A força axial que impedirá tal dilatação é dada por

$$N = -E.S.\frac{\Delta L}{L} \quad (2.3)$$

onde:

N = força normal que impede a contração

E = módulo de elasticidade do material

S = seção transversal da barra

Substituindo a equação (2.2) em (2.3), chega-se a tensão de compressão a que a barra fica submetida que pode ser determinada por

$$\sigma = -\alpha.E.\Delta T \quad (2.4)$$

Aplicando essas definições no sistema de revestimento cerâmico, observa-se que a magnitude das tensões térmicas que atuam neste sistema é dependente do coeficiente de dilatação térmica linear ( $\alpha$ ) e do módulo de deformação (E) das diversas camadas, além das condições de exposição ao meio ambiente, uma vez que a variação de temperatura ( $\Delta T$ ) entre as camadas produz deformações distintas nas mesmas. Por exemplo, como o coeficiente de dilatação térmica linear da argamassa e do concreto é o dobro do coeficiente da cerâmica, na medida em que houver redução da temperatura no sistema, ocorrerá tensões de compressão no revestimento.



Portanto, os principais aspectos que influenciam o fluxo de calor e as temperaturas que atuam sobre os sistemas de revestimento de fachadas são a intensidade da energia solar incidente (latitude, longitude, etc.), o coeficiente de absorção térmica (cor da superfície) e a condutância térmica (Bauer, 2005b).

#### 2.2.3.2 - Distribuição das tensões nos sistemas de revestimentos cerâmicos

Como visto anteriormente, as camadas dos sistemas de revestimentos devem estar intimamente ligadas para que este cumpra as funções que lhe foram designadas. Dessa forma, a deformação em qualquer uma delas provocará tensões atuantes no sistema de revestimento cerâmico que aplicadas repetidamente pode levar ao colapso do sistema. Isto quer dizer que a execução de várias camadas sobrepostas implica que cada uma delas deve suportar os esforços provenientes das demais a fim de se garantir a estabilidade do sistema de revestimento conforme citado por Junginger (2003).

Assim, segundo Fiorito (1994), dentre as principais deformações relacionadas aos sistemas de revestimentos, destacam-se: o recalque das fundações, a dilatação higroscópica dos elementos cerâmicos, as deformações oriundas da variação da umidade relativa do ar, a retração da argamassa, e, principalmente, as provenientes de variações térmicas.

No entanto, independente da origem das deformações, elas sempre levam o revestimento a dois estados principais de tensão - tração e compressão (Junginger, 2003). Sendo assim, as tensões podem se compensar ou se somar, produzindo neste último caso, uma tensão de compressão máxima que se ultrapassar a resistência do material poderá causar a ruptura do sistema de revestimento.

Neste estudo, serão enfatizadas apenas as tensões principais de origem térmica que atuam nos revestimentos cerâmicos, uma vez que elas são consideradas as principais responsáveis pelo fenômeno da fadiga. Ou seja, os movimentos de dilatação e contração do revestimento diminuem a aderência, contribuindo desse modo para o deslocamento que, por sua vez, tem como uma das causas a fadiga. Assim, é de suma importância entender estes mecanismos de movimentação, cujos fundamentos teóricos são baseados no Círculo de

Mohr, para avaliar o desempenho mecânico do sistema de revestimento, e particularmente da argamassa de emboço, em relação à fadiga.

Para visualizar melhor a distribuição das tensões, bem como o seu efeito no sistema de revestimento cerâmico, considere um revestimento sujeito à tração. De acordo com Junginger (2003) esta situação ocorre quando a expansão da placa cerâmica for inferior do que aquela apresentada pelo seu substrato. Isso pode ser visualizado nas fachadas quando esta é aquecida pelo sol e, seguidamente, sofre choque térmico por causa da ocorrência de chuva, ou seja, inicialmente, há uma elevação na temperatura seguida de um decréscimo (Figura 2.6).

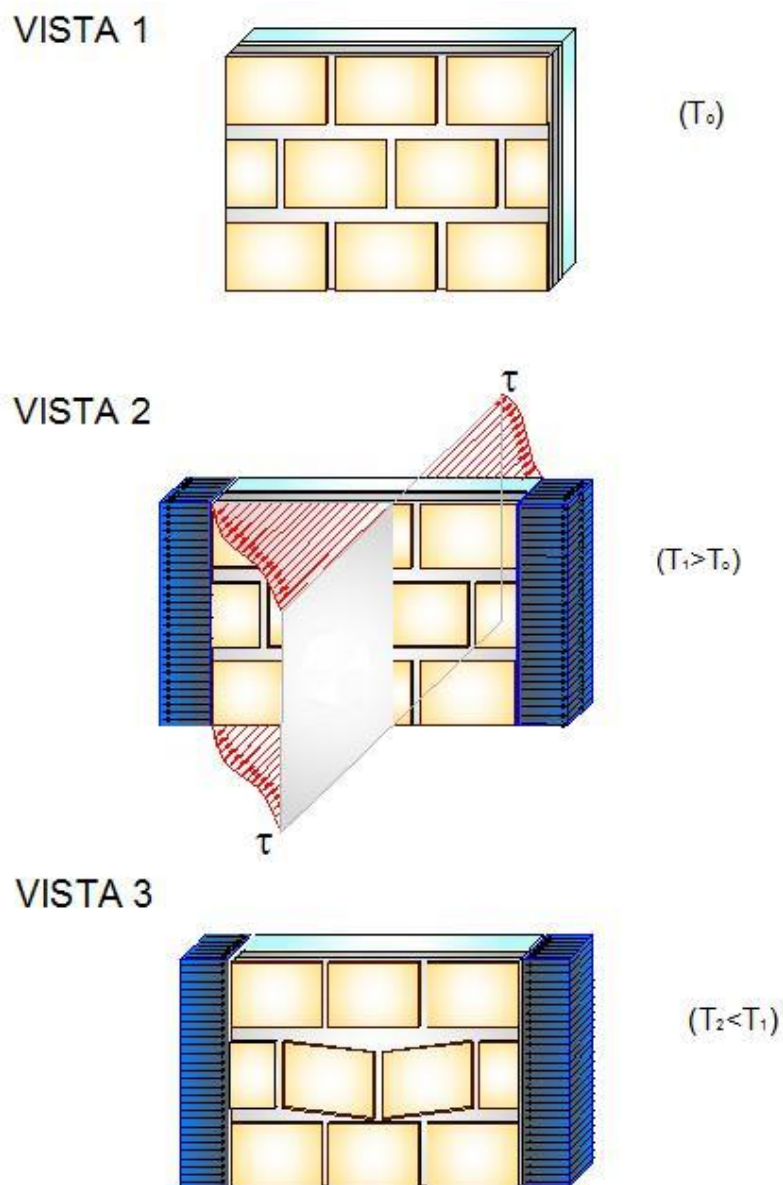


Figura 2.6 – Revestimento sujeito à esforço de tração.

Na Figura 2.6 – Vista 1, o revestimento está sob uma temperatura ambiente ( $T_0$ ). Com o aumento gradativo da temperatura ( $T_1 > T_0$ ), as peças cerâmicas tendem a se afastar umas das outras; conseqüentemente, as juntas tendem a se abrir, produzindo assim tensões de cisalhamento na interface tardo das peças cerâmicas/argamassa colante, e tensões de tração nas extremidades da placa do revestimento (Figura 2.6 – Vista 2). Uma vez que a resistência de aderência entre a cerâmica e a argamassa colante seja inferior à tensão de cisalhamento atuante, tem-se a tensão cisalhante de ruptura que provoca o desprendimento das peças da base. Em seguida, caso haja uma diminuição gradual de temperatura ( $T_2 < T_1$ ) e, conseqüentemente, o encurtamento da base, essas peças soltas ficariam na forma de um “V” (Figura 2.6 – Vista 3). Para maiores detalhes ver Fiorito (1994).

Agora, para visualizar as tensões de compressão que atuam no sistema de revestimento cerâmico (Figura 2.7), sobretudo, na interface emboço/argamassa colante/cerâmica, considere a retração do emboço. Fiorito (1994) afirma que as tensões de compressão em um sistema de revestimento cerâmico de fachadas são causadas quando a temperatura externa é menor que a temperatura interna (períodos de frio) ou ainda quando há a diminuição brusca da temperatura em períodos de calor.

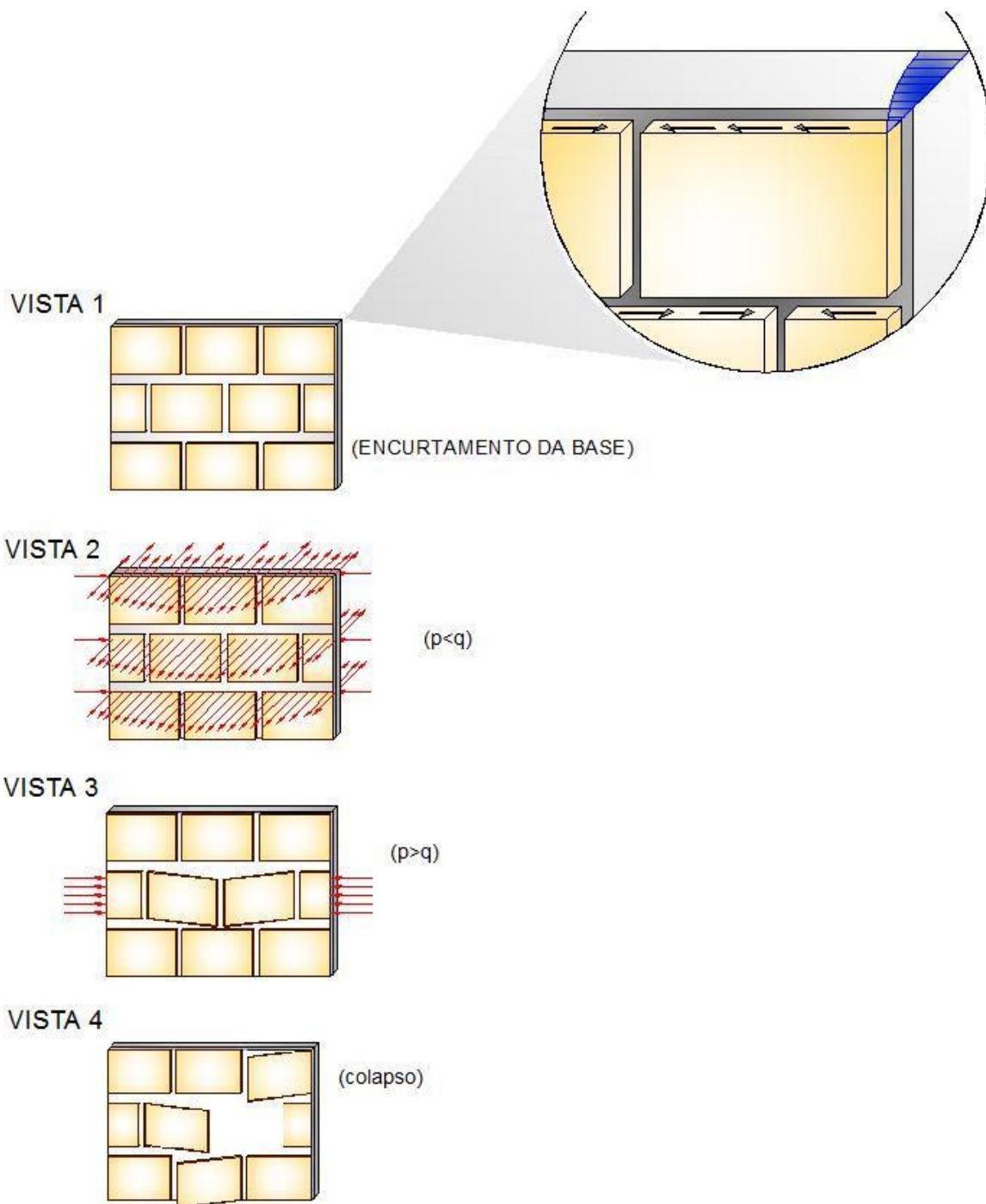


Figura 2.7 – Revestimento sujeito à esforço de compressão.

Com isso, as peças cerâmicas tendem a se aproximar umas das outras (Figura 2.7 – Vista 1), tendendo a originar o processo de flambagem da placa. Na verdade, o que ocorre é que no centro da placa surgem tensões de compressão que atuam transversalmente às peças cerâmicas e nas extremidades aparecem tensões de cisalhamento entre a peça cerâmica, argamassa colante e o emboço.

Essas tensões de compressão originam componentes verticais “p” de tração que tendem a arrancar a cerâmica da base. Opondo-se a estas, têm-se as componentes verticais “q” de aderência proporcionada pela argamassa colante (Figura 2.7 – Vista 2). Assim, conforme Fiorito (1994) podem ser visualizadas duas situações distintas:

- ✓  $q > p$ : Tem-se compressão, mas o sistema de revestimento continua estável (Figura 2.7 – Vista 2);
- ✓  $q < p$ : Tem-se tração simples, as quais provocam o arrancamento das cerâmicas da base que, por sua vez, geram o abaulamento (Figura 2.7 – Vista 3) e, posteriormente, o colapso (Figura 2.7 – Vista 4) da placa de revestimento.

Cabe ressaltar que a componente “p” é nula nas extremidades e atinge seu valor máximo no centro do trecho considerado do sistema de revestimento. Já a componente “q” apresenta valores irregulares em virtude das falhas no processo executivo. Para maiores detalhes ver Fiorito (1994).

Portanto, assim como no caso do sistema de revestimento cerâmico submetido à tração, a compressão é causada por uma variação de tamanho entre as placas cerâmicas e a camada de emboço (Junginger, 2003).

Por outro lado, caso as tensões de cisalhamento venham a provocar a ruptura da ligação entre as peças cerâmicas e a argamassa colante (Figura 2.7 – Vista 3), as cerâmicas ficariam soltas. Com isso, haveria uma diminuição do comprimento “d” da placa cerâmica e, conseqüentemente, diminuiria também a probabilidade de flambagem do sistema de revestimento conforme a fórmula de Euler (Timoshenko, 1961) visualizada na Equação 2.5:

$$N = \frac{\pi^2 EI}{d^2} \quad (2.5)$$

onde:

$N$  = carga de flambagem

$E$  = módulo de elasticidade

$I$  = momento de inércia

$d$  = comprimento de flambagem

Nesta equação, nota-se que quanto menor o comprimento “d” da cerâmica, menor será a probabilidade de flambagem da placa. Daí a necessidade das juntas entre as peças cerâmicas a fim de se reduzir o comprimento da placa de revestimento, tornando-a mais “flexível” e diminuindo com isso o risco de flambagem.

## **2.3- PROCESSO DE FADIGA EM SISTEMAS DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS**

Antes de entrar no estudo da fadiga propriamente dito é de suma importância conhecer alguns conceitos básicos da Mecânica da Fratura.

### **2.3.1-Mecânica da Fratura**

A mecânica da fratura é considerada a mecânica das trincas, cujo objetivo é determinar um limite de capacidade de carga, tendo como principal parâmetro o valor da carga crítica. Ela está subdividida em mecânica da fratura linear elástica (MFLE) e mecânica da fratura elasto-plástica (MFEP).

Neste estudo será levado em consideração os princípios da MFLE, uma vez que a argamassa de emboço é considerada um material frágil e, portanto, tem sua ruptura à fadiga no regime elástico.

A MFLE surgiu a partir da necessidade de se analisar o comportamento de materiais que apresentam descontinuidades internas e superficiais. Ela descreve a magnitude e a distribuição do campo de tensões (linear elástico) nas proximidades da trinca, sendo os seus princípios aplicáveis em situações onde há possibilidade de ocorrer fratura sem ser precedida de extensa deformação plástica.

Nesse contexto, a determinação da tenacidade<sup>5</sup> à fratura se dá sob condições de deformação plana e o processo de fratura é controlado pelas tensões elásticas presentes na ponta da trinca.

Dessa forma, a intensidade do campo de tensões, em torno de uma trinca em uma peça predominantemente elástica, é quantificada pelo fator de intensidade de tensão (K). No entanto, independente do tipo de sollicitação em uma trinca, ela se enquadra em três modos de carregamento possíveis conforme pode ser visualizado na Figura 2.8.

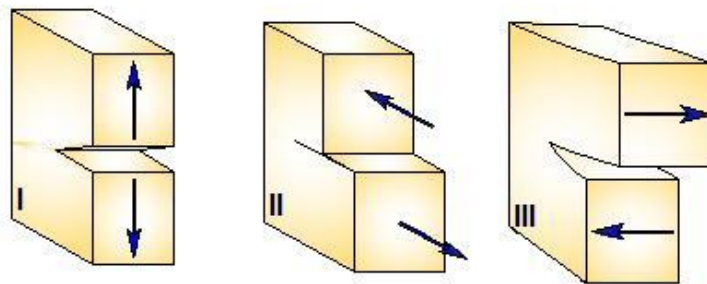


Figura 2.8 – Modos básicos de carregamento em uma trinca.

Os carregamentos ilustrados nas Figuras 2.8 são:

- ✓ Carregamento I – Tração ou abertura da ponta da trinca: Ocorre quando as faces da trinca são separadas
- ✓ Carregamento II – Cisalhamento puro: Ocorre quando o deslocamento das superfícies da trinca paralelamente a si mesmas e perpendiculares à frente de propagação; e
- ✓ Carregamento III – Rasgamento ou cisalhamento anti-plano: Ocorre quando as superfícies da trinca movem-se paralelamente em relação à aresta de propagação e relativamente uma às outras.

---

<sup>5</sup> A tenacidade à fratura é a resistência do material à propagação da trinca ou resistência à fratura frágil

O modo I de carregamento é encontrado na maioria das aplicações de engenharia e, portanto, apresenta um maior desenvolvimento nos métodos analíticos e experimentais se comparados aos outros modos. A seguir será mostrado o campo de tensões que se desenvolve na ponta da trinca deste modo de carregamento (Figura 2.9).

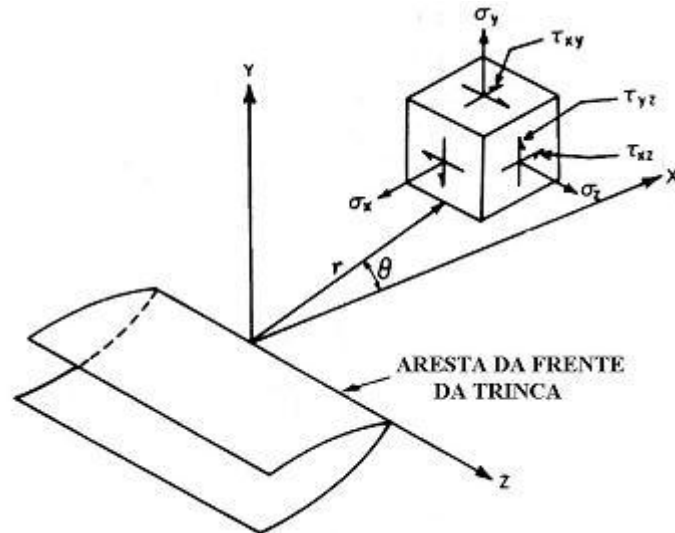


Figura 2.9 – Distribuição de tensões na ponta de uma trinca.

Considerando o eixo de coordenadas polares com a origem na frente da trinca (Figura 2.9), o campo de tensões em um material elástico trincado pode ser dado pela expressão:

$$\sigma_{ij} = \left( \frac{k}{\sqrt{r}} \right) \cdot f_{ij}(\theta) + \sum_{m=0}^{\infty} A_m \cdot r^{\frac{m}{2}} \cdot g_{ij}^{(m)}(\theta) \quad (2.6)$$

onde:

$\sigma_{ij}$  = tensor de tensões

$r$  e  $\theta$  = são definidos na Figura 2.9

$k$  = constante relacionada ao fator de intensidade de tensões ( $K = k\sqrt{\pi a}$ )

$f_{ij}$  = função de  $\theta$

De maneira que na região infinitesimal próxima da trinca, as tensões normais e de cisalhamento são:

$$\sigma_x = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \left[ 1 - \text{sen} \frac{\theta}{2} \cdot \text{sen} \frac{3\theta}{2} \right] \quad (2.7)$$



$$\sigma_y = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \left[ 1 + \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \cdot \operatorname{sen} \frac{3\theta}{2} \right] \quad (2.8)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \cdot \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3\theta}{2} \quad (2.9)$$

A partir dessas equações, observa-se que as componentes de tensões tenderiam ao infinito quando o raio “r” se aproximasse de zero, porém isto não ocorre porque a ponta da trinca sofre deformação plástica e neste estágio as equações acima não são mais aplicáveis.

Além disso, nota-se que a distribuição de tensões em torno de qualquer trinca em uma estrutura é similar e depende somente dos parâmetros r e  $\theta$ . Assim, a diferença entre um componente trincado e outro reside na grandeza do parâmetro “K”, o qual serve como um fator de escala para definir a magnitude do campo de tensões.

### 2.3.2-Aspectos gerais do processo de fadiga

Sabe-se que as pesquisas sobre o aspecto mecânico da fratura surgiram a partir da necessidade de se prever falhas em construções mecânicas. Nesse sentido, para Pastoukhov e Voorwald (1995) a fadiga é um tipo especial de fratura que se caracteriza pela significativa duração das ações externas (carregamento mecânico, temperatura e meio ambiente) que, por sua vez, provoca alterações no elemento estrutural durante este período.

Segundo Balbo (2000) a ruptura por fadiga é atribuída a um processo de micro-fissuração progressiva na estrutura de um material, degradando paulatinamente sua microestrutura cristalina, que acaba por culminar na fratura da peça estrutural, denotada por uma ou mais superfícies de ruptura. Este fenômeno ocorre mesmo que as deformações impostas apresentem magnitudes inferiores à deformação de ruptura, ou seja, em condições de solicitações de magnitude inferior à capacidade resistente do material.

Ribeiro (2002) cita que as trincas por fadiga iniciam-se em um ponto da superfície onde há concentração de tensões e se propagam na direção perpendicular à tensão principal, constatando-se uma ruptura (frágil ou dúctil) quando o material perde a sua capacidade resistente. Desta forma, tem-se que no processo de fadiga frágil, os materiais apresentam

nenhuma ou deformações plásticas desprezíveis, enquanto que na fratura dúctil, os materiais possuem deformações plásticas consideráveis.

Especificamente em relação às argamassas de revestimento, elas apresentam fratura de natureza frágil, isso implica que a ruptura ocorre sob deformação plana e tensões elásticas, e geralmente a superfície de fratura é perpendicular ao carregamento aplicado. Isto quer dizer que os ciclos de carregamento são totalmente absorvidos elasticamente, sendo necessários carregamentos de baixa intensidade com elevado número de ciclos para que ocorra a ruptura por fadiga (fadiga de alto ciclo).

Com isso, considera-se que o processo de fadiga apresenta quatro etapas principais que compreendem a nucleação das trincas(1), o crescimento da microtrinca (2), o crescimento da macrotrinca (3) e a ruptura final (4) conforme pode ser visualizado na Figura 2.10:

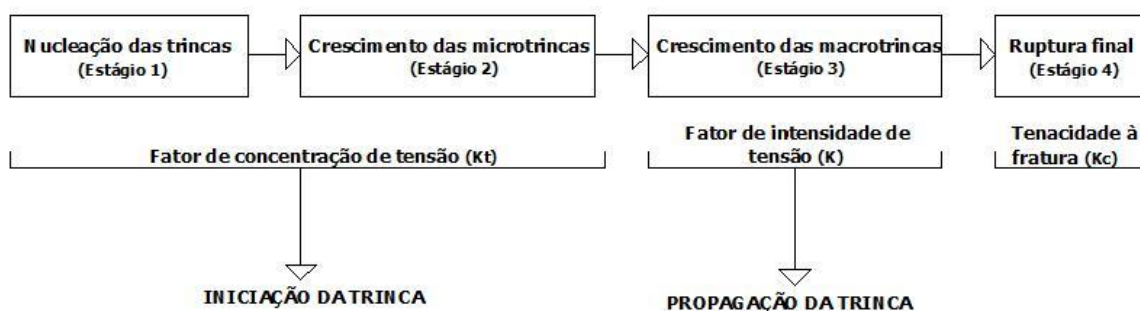


Figura 2.10 – Estágios do processo de fadiga.

O primeiro estágio ocorre em função da iniciação de uma ou mais fissuras (micro-fissuras) geralmente invisíveis em algum ponto onde há concentração de tensões decorrentes de defeitos no material, ou em virtude de algumas discontinuidades ou micro-fissuras pré-existentes decorrentes do processo construtivo da argamassa. Assim, de acordo com Ribeiro (2002), a nucleação de uma trinca se dá preferencialmente na superfície do material e numa zona em que a tensão é máxima. Nesse sentido, esta etapa ocorre com apreciável lentidão, caracterizando-se pela formação de concentrações locais de tensões e conseqüente início de fratura.

No segundo e terceiro estágios, as trincas crescem gradualmente por efeito de cada ciclo (crescimento macroscópico). Em geral, as trincas permanecem finas e de difícil detecção

até o instante em que elas se encontram próximas de produzir a ruptura do elemento. Esta etapa é mais rápida em função do aumento de intensidade de tensões na ponta da trinca, o que faz que a propagação da trinca ocorra numa velocidade cada vez maior. Porém, o componente apresenta uma área resistente suficientemente adequada para suportar as tensões atuantes.

No último estágio, o elemento continua seu processo de deterioração através do crescimento das fissuras. No instante em que elas atingem seu tamanho crítico, ou seja, quando a perda de seção for considerável e o elemento não for capaz de resistir aos esforços solicitantes, tem-se a ruptura. Esta etapa é extremamente rápida e caracteriza-se pela acentuada redução da área resistente do componente, resultando numa fratura final do tipo frágil.

Portanto, a falha começa na forma de pequenas fissuras, que vão crescendo e reduzindo a seção resistente, até que uma sobrecarga provoque a ruptura final, por uma propagação brusca da fissura.

Em face desse contexto, observa-se que a vida em fadiga de um material apresenta duas etapas principais que são o período de iniciação da trinca e o período de propagação da trinca. Na primeira etapa, as condições de superfície (por exemplo, a rugosidade) exercem forte influência, o que já não acontece no crescimento das trincas. Outra diferença considerável reside nos métodos de previsão de fadiga em que se observa que o fator de concentração de tensão ( $K_t$ ) é um importante parâmetro para previsões da iniciação da trinca, enquanto que o fator de intensidade de tensão ( $K$ ) é usado para previsões do crescimento da trinca.

É importante diferenciar o fator de intensidade de tensões “ $K$ ” do fator de concentração de tensões “ $K_t$ ”. O primeiro é considerado um fator de escala usado para definir a magnitude do campo de tensões. Ele varia com o nível de carregamento aplicado e com o comprimento da trinca. Vale salientar que se o fator de intensidade de tensões de uma determinada amostra é conhecido, então é possível determinar o máximo fator de intensidade de tensões que causaria falha. Esse valor crítico “ $K_c$ ” é conhecido como tenacidade à fratura do material.

Já o fator de concentração de tensão surge em componentes que possuem descontinuidades ou mudanças abruptas na sua seção.

### 2.3.3-Ciclos de carregamento do processo de fadiga

Como o processo de fratura por fadiga de um material é induzido por carregamentos cíclicos, torna-se de fundamental importância conhecer as definições de um ciclo de carregamento que geralmente é representada por uma curva senoidal em que os valores de tensão são representados no eixo das ordenadas (y) e o tempo é representado no eixo das abscissas (x), podendo ser visualizado na Figura 2.11:

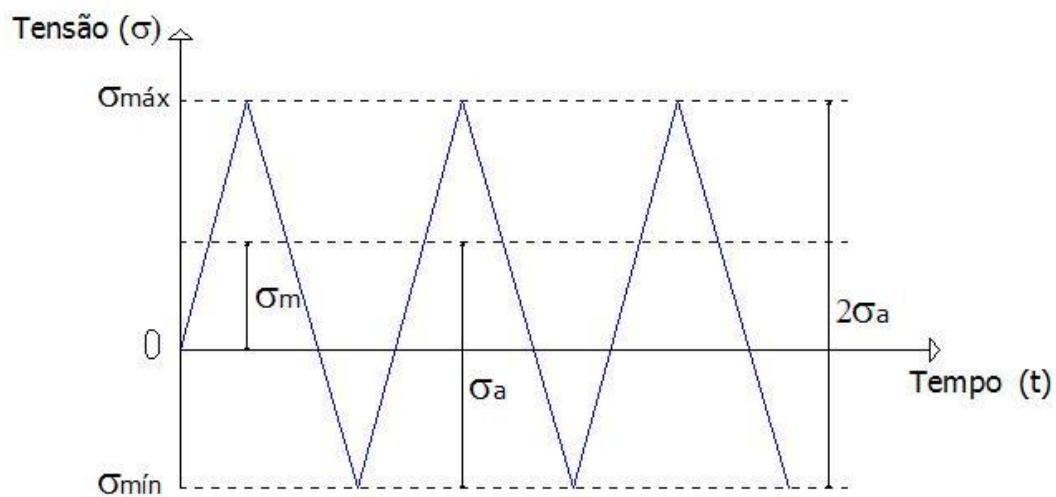


Figura 2.11 – Ciclo de carregamento.

Nesta curva podem ser visualizados os seguintes parâmetros:

- ✓ Tensão média ( $\sigma_m$ )  $\rightarrow \sigma_m = \frac{(\sigma_{máx} + \sigma_{mín})}{2}$
- ✓ Tensão alternada ou amplitude de tensão ( $\sigma_a$ )  $\rightarrow \sigma_a = \frac{(\sigma_{máx} - \sigma_{mín})}{2} = \sigma_{máx} - \sigma_m$
- ✓ Intervalo de tensão ( $\Delta\sigma$ )  $\rightarrow \Delta\sigma = \sigma_{máx} - \sigma_{mín} = 2\sigma_a$
- ✓ Razão (R)  $\rightarrow R = \frac{\sigma_{mín}}{\sigma_{máx}}$

onde  $\sigma_{máx}$  é tensão máxima e  $\sigma_{mín}$  é a tensão mínima.

No estudo do comportamento de um material sob fadiga é de extrema importância determinar a sua vida à fadiga ( $N_f$ ) que pode ser definida como o número de ciclos necessários para a sua ruptura em um nível de tensão específico, podendo ser calculado pela Equação abaixo (Ribeiro, 2002; Pastoukhov e Voorwald, 1995):

$$N_f = N_{inicial} + N_{propagação} \quad (2.10)$$

onde:

$N_{inicial}$  = período de iniciação (nucleação)

$N_{propagação}$  = período de propagação (crescimento de micro e macrotrincas + fratura)

A contribuição de cada parcela para a vida à fadiga do elemento depende do material e das condições de ensaio. No caso das argamassas de revestimentos, a qual é submetida à fadiga de alto ciclo (baixos níveis de tensão), a parcela predominante é a de iniciação de fissura.

### **2.3.4-Representação dos ensaios de fadiga**

Por volta de 1860, Wöhler realizou estudos em componentes estruturais submetidos a carregamentos axiais e observou que a vida à fadiga diminui com o aumento da intensidade da tensão aplicada, de maneira que abaixo de um determinado valor de tensão, o elemento parece ter vida infinita.

A partir destes estudos, os resultados dos ensaios laboratoriais de fadiga passaram a ser representados através da curva S-N ou curva Wöhler que relaciona a tensão alternada (em inglês, “stress”) aplicada em função do número de ciclos (em inglês, “number of cycles”) necessários para a ruptura (Figura 2.12).

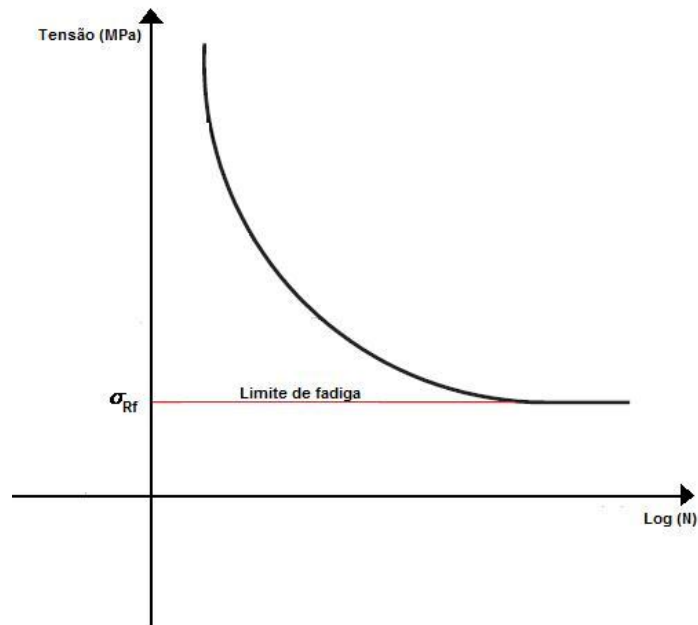


Figura 2.12 – Curva S-N qualitativa.

Nota-se na Figura 2.12 que à medida que se diminui a tensão aplicada, o material resiste a um maior número de ciclos. Diminuindo-se continuamente a tensão, chega-se a certo nível em que a curva tende a se tornar horizontal, o que significa que o número de ciclos para o rompimento do material torna-se praticamente infinito. Neste patamar, atinge-se o limite de resistência à fadiga ( $\sigma_{Rf}$ ) que pode ser entendida como o nível de tensão máximo que pode ser aplicado repetitivamente sob um número infinito de vezes sem que haja a ruptura do material, ou seja,  $\sigma_{Rf}$  é o valor de tensão limite abaixo do qual o material não sofrerá ruptura por fadiga.

Como a curva S-N também pode ser representada analiticamente, diversos autores buscaram desenvolver equações que representassem a ruptura por fadiga de materiais frágeis (argamassas e concretos).

Sendo assim, Uchôa (2007) propôs as Equações abaixo para representar a ruptura das argamassas de revestimento sob carregamentos cíclicos:

✓ Para  $N < 2 \times 10^5$

$$\frac{S}{f_t} = 0,925 - 0,096 \log(N) \quad (2.11)$$

$$\frac{S}{f_c} = 0,925 - 0,096 \log(N) \quad (2.12)$$

onde:

$S$  = resistência à fadiga sob tração ou compressão (MPa)

$f_t, f_c$  = tensões de tração ou compressão (MPa)

✓ Para  $N > 2 \times 10^5$

$$\frac{S}{f_t} = 0,396 \quad (2.13)$$

$$\frac{S}{f_c} = 0,396 \quad (2.14)$$

Já Cervo (2004) propôs a Equação abaixo geral para representar a ruptura sob fadiga do concreto:

$$\frac{\sigma_{máx.}}{f_{ct}} = a + b \cdot \log N \quad (2.15)$$

onde:

$\sigma_{máx.}$  = nível de tensão máximo aplicado no concreto

$f_{ct}$  = resistência à tração na flexão estática do concreto

$a$  e  $b$  = constantes empíricas ou experimentais referentes ao material, obtidas por regressão dos dados

Tepfers e Kutti (1979) também realizaram estudos em concretos submetidos à tensão de fadiga sob compressão, sendo proposta a seguinte Equação:

$$\frac{f_{cmáx.}}{f_c'} = 1 - 0,0685 \cdot (1 - R) \cdot \log N \quad (2.16)$$

onde:

$f_{cmáx.}$  = tensão máxima alternada

$f_c'$  = resistência à compressão estática

$R$  = relação entre a tensão mínima e a tensão máxima aplicada  $\left( R = \frac{\sigma_{mín}}{\sigma_{máx}} \right)$

$N$  = número de ciclos à fadiga

De acordo com a equação 2.16, nota-se que para  $R=0$  e  $N=1$ , o valor da tensão alternada é igual à resistência estática à compressão, ou seja,  $f_{cmáx.} = f_c'$ . Posteriormente, os autores verificaram a partir de estudos estatísticos que esta expressão também poderia ser estendida para os ensaios à fadiga em tração.

### 2.3.5-Fatores que influenciam no processo de fadiga

Dentre os inúmeros fatores que afetam a vida em fadiga dos materiais frágeis, cabe destacar a concentração de tensões, o acabamento superficial, o tamanho da peça, a temperatura, a frequência e a amplitude tensão (Maggi, 2004; Cervo, 2004).

#### 2.3.4.1 - Fator de concentração de tensões ( $K_t$ )

Em geral, as relações de tensões da mecânica clássica consideram que os materiais apresentam seções retas e ausência de irregularidades. Porém, sabe-se que a maioria destes, e aí se incluem as argamassas de revestimento, apresentam irregularidades (entalhes, furos, ranhuras) que alteram a distribuição de tensões, provocando nessas regiões um aumento da concentração de tensões que tende a levar ao surgimento de microfissuras.

Assim, a concentração de tensões é um efeito localizado sendo definida pelo fator de concentração de tensões ( $K_t$ ) que é dado pela razão entre a tensão real máxima no entalhe ( $\sigma_{máx.}$ ) e a tensão nominal ( $\sigma_{nom.}$ ):

$$K_t = \frac{\sigma_{máx.}}{\sigma_{nom.}} \quad (2.17)$$

Muitos métodos vêm sendo usados para determinação desse fator, merecendo destaque o trabalho de Arrivabene (1994), no qual ele mostra vários exemplos em que os fatores de concentração de tensão variam em função da geometria dos corpos-de-prova e dos esforços a que estes estão sujeitos.



#### 2.3.4.2 - Acabamento superficial

Em geral, todas as falhas por fadiga iniciam na superfície do componente já que ela está sujeita às maiores solicitações. Sendo assim, a natureza do acabamento superficial do material sob fadiga é determinante na vida em fadiga de um material. Dessa maneira, a diminuição das irregularidades superficiais aumenta consideravelmente a resistência à fadiga, pois, como foi visto anteriormente, entalhes macroscópicos e irregularidades superficiais microscópicas geram concentradores de tensão que facilitam a formação de trincas de fadiga.

#### 2.3.4.3 - Tamanho da peça

Quanto maior é o corpo-de-prova, menor é a sua resistência à fadiga. De uma maneira mais simples, pode-se associar a influência do tamanho da peça na vida em fadiga, simplesmente considerando o efeito do acabamento superficial. Ou seja, com o aumento da dimensão do elemento ensaiado, maior será a dificuldade de se conseguir um bom acabamento superficial e, conseqüentemente, menor será a resistência à fadiga.

#### 2.3.4.4 - Temperatura

O efeito da temperatura na resistência à fadiga vem sendo amplamente estudado, tendo em vista que quando o material trabalha em temperaturas diferentes do ambiente, as suas propriedades mecânicas sofrem alterações e, portanto a resistência à fadiga também é influenciada. Com isso, um ensaio de fadiga realizado sob temperatura inferior à do ambiente, observa-se um aumento da resistência à fadiga do material. Em condição oposta, o material quando submetido a elevadas temperaturas apresenta um decréscimo de sua resistência à fadiga.

Além disso, tem-se ainda a fadiga térmica que ocorre quando o material é submetido a ciclos consecutivos de aquecimento e resfriamento, fazendo com que a fratura do material seja causada não pelas tensões mecânicas, mas sim pelas tensões térmicas no interior do mesmo. No caso dos sistemas de revestimentos cerâmicos de fachada, eles estão submetidos a uma variação de temperatura diariamente, a qual provoca o aparecimento de

tensões de compressão e tração que podem levar à ruptura do sistema através do deslocamento das placas cerâmicas.

Para Balbo (2001 apud Cervo, 2004) o gradiente de temperatura determina a magnitude da tensão que está ocorrendo, de maneira que quanto maior for a diferença de temperatura, maior será a intensidade da tensão no material.

#### 2.3.4.5 - Frequência

Como foi mostrado anteriormente, segundo Cervo (2004) e Zhang *et al.* (1996) o aumento da frequência de carregamento provoca um aumento da resistência à fadiga do concreto. Este comportamento também pode ser adotado para as argamassas de revestimento, partindo-se do princípio de que ambos são materiais frágeis.

#### 2.3.4.6 - Amplitude de tensão

Em relação ao efeito da amplitude de tensão na vida à fadiga ( $N_f$ ) de um material, observa-se que quanto maior for a amplitude, menor será o número de ciclos que ele suportará (Figura 2.13). Isto implica que a vida à fadiga do componente depende do tipo de material usado e também do modo em que ele está sendo solicitado.

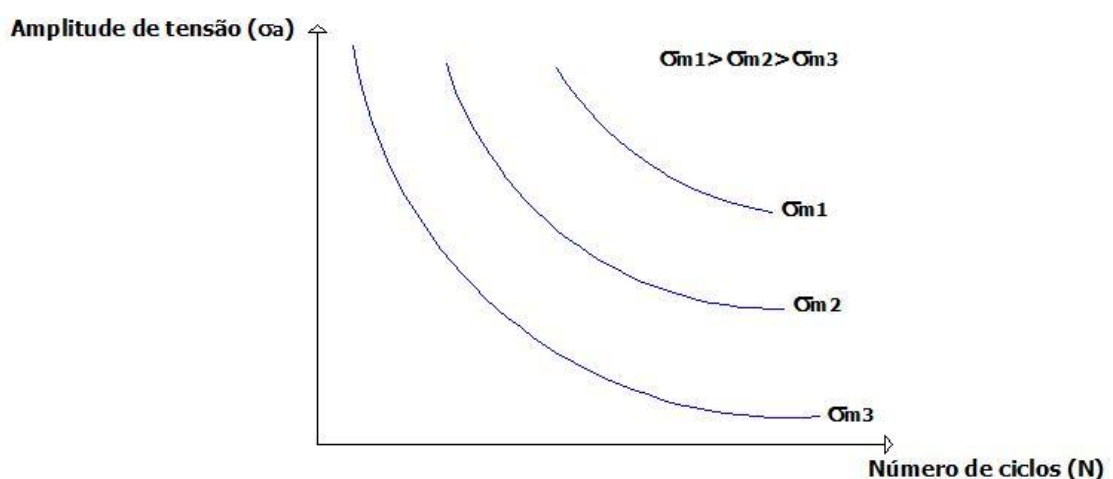


Figura 2.13 – Curvas qualitativas de Wohler.

### 2.3.6-Avaliação do processo de fadiga em sistemas de revestimentos

Para se avaliar o comportamento à fadiga das camadas do sistema de revestimento cerâmico que é composto somente por materiais frágeis (não apresentam limite de escoamento, sendo o diagrama tensão-deformação uma linha contínua até o ponto de fratura conforme visualizado na Figura 2.14, e em geral, a resistência à compressão tende a ser maior que a resistência à tração), serão levados em conta os princípios da teoria de Rankine, Coulomb-Mohr, e da teoria de dano acumulado.

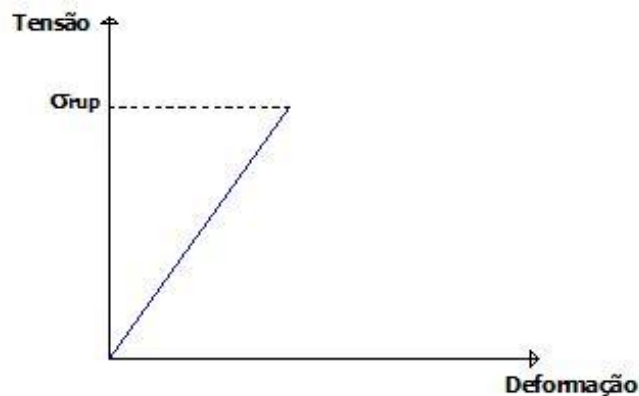


Figura 2.14 – Diagrama qualitativo tensão-deformação para materiais frágeis.

#### 2.3.4.1 - Teoria de Rankine

Sabendo-se que a fadiga nos sistemas de revestimentos é provocada por tensões principais, tem-se que as tensões no estado plano podem ser de dois tipos:

✓ Tensão máxima:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (2.18)$$

✓ Tensão mínima:

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (2.19)$$

A teoria de tensão normal máxima ou teoria de Rankine é aplicada para materiais frágeis que apresentam diagramas tensão-deformação similares quando submetidos a esforços de tração e esforços de compressão.

Esta teoria prevê que para que não ocorra ruptura no material, as tensões principais no estado de tensões analisado devem ser menores que a máxima tensão normal encontrada para o material em ensaios uniaxiais de tração.

A teoria de tensão normal máxima define que a fratura ocorrerá quando uma das três tensões principais for equivalente ao limite de resistência do material sob tração ( $\sigma_t$ ) ou sob compressão ( $\sigma_c$ ), também chamado de resistência de ruptura do material. Assim, supondo que as tensões principais estão dispostas nessa ordem  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ , a fratura ocorrerá quando  $\sigma_1 = \sigma_t$  ou  $\sigma_3 = \sigma_c$  (Shigley e Mischke, 1989).

Colocando essas tensões em um sistema de coordenadas cartesianas, pode-se visualizar melhor o efeito desta teoria no processo de falha (Figura 2.15).

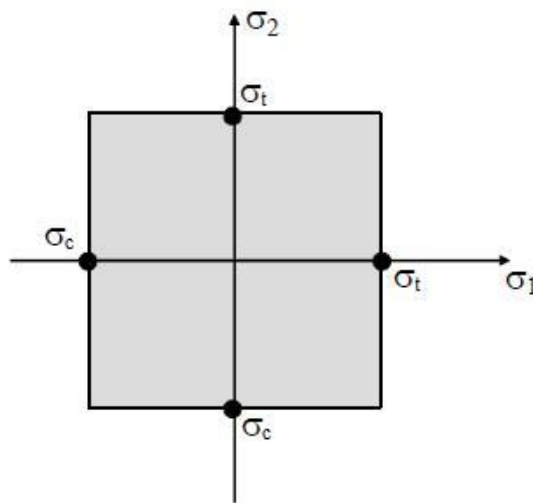


Figura 2.15 – Teoria da tensão normal máxima em duas dimensões.

A partir da Figura 2.15, nota-se que no estado biaxial de tensões ( $\sigma_c > \sigma_t$ ), segundo a teoria de Rankine quando um ponto, cujas coordenadas são as tensões principais ( $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ ), cai nos limites ou dentro do gráfico, não haverá ruptura (Collins, 1993; Shigley e Mischke, 1989).

### 2.3.4.2 - Teoria de Coulomb-Mohr

Os princípios de Coulomb-Mohr podem ser considerados como uma variação da teoria de tensão normal máxima proposta por Rankine, entretanto, ela deve ser empregada em materiais que apresentam comportamentos diferentes se submetidos a tensões de tração e tensões de compressão.

A Figura 2.16 apresenta a curva envolvente das circunferências de Mohr das tensões principais dos estados de tensão que provocam ruptura do material. Assim, o círculo de Mohr de centro  $O_c$  representa tensão máxima de compressão simples de valor  $\sigma_c$ , enquanto que o círculo de centro  $O_t$  indica a tensão máxima de tração simples  $\sigma_t$ .

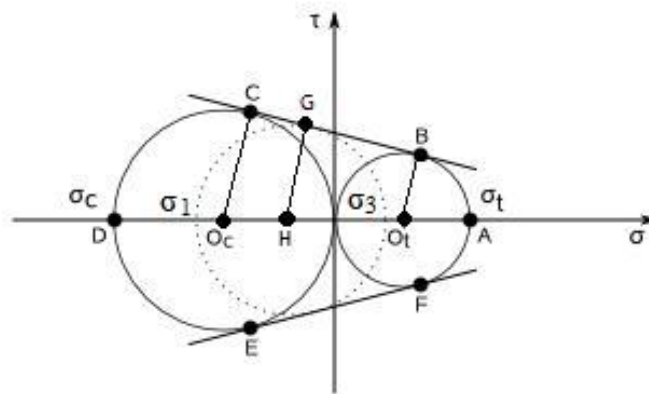


Figura 2.16 – Círculo de Mohr para tração e compressão.

Uma vez traçada a envolvente de Mohr para um material é possível verificar se um determinado estado de tensão provoca ou não a sua ruptura, traçando-se a circunferência de Mohr das tensões principais máximas e mínimas e verificando se ela intercepta ou não esta curva. Para simplificar este método, Mohr admitiu que a envolvente de todas as circunferências pode ser aproximada com suficiente precisão através de duas retas, as quais podem ser traçadas a partir dos resultados de ensaios de tração e compressão uniaxiais do material conforme visualizado na Figura 2.16.

Na ruptura, o estado de tensão representado pelas tensões extremas  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$  é tangente à envolvente. Estas tensões podem ser relacionadas com as tensões de ruptura do material

em tração e compressão uniaxiais ( $\sigma_c$  e  $\sigma_t$ ) através das relações abaixo obtidas a partir da Figura 2.16:

$$\overline{O_c C} = \frac{\sigma_c}{2} - \frac{\sigma_t}{2} \quad (2.20)$$

$$\overline{HG} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_t}{2} \quad (2.21)$$

$$\overline{O_c O_t} = \frac{\sigma_c}{2} + \frac{\sigma_t}{2} \quad (2.22)$$

$$\overline{HO_t} = \frac{\sigma_t}{2} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad (2.23)$$

Além disso, é possível verificar por semelhança de triângulo que a circunferência definida pelas tensões principais  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$  do estado de tensões analisado não ultrapassam a envolvente de resistência (ou seja, não há ruptura) enquanto houver a condição:

$$\frac{\overline{O_c C}}{\overline{O_c O_t}} > \frac{\overline{HG}}{\overline{HO_t}} \Rightarrow \frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_c + \sigma_t} > \frac{\sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_t}{\sigma_t - \sigma_1 - \sigma_3} \quad (2.24)$$

A partir da relação acima, observa-se que no caso das tensões principais serem todas de tração, a teoria de Mohr fornece resultados diferentes daqueles obtidos experimentalmente. Neste caso, devem-se empregar os princípios de Rankine que foi abordado anteriormente.

Por outro lado, como o material não suporta tensões de tração superiores a  $\sigma_t$  e a Equação 2.24 fornece bons resultados somente para  $\sigma_t < 0$ , o termo  $\sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_t$  é sempre positivo. Sendo assim, a Equação 2.25 é equivalente à condição abaixo que traduz os princípios de Mohr para previsão de ruptura de materiais frágeis.

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_t} - \frac{\sigma_3}{\sigma_c} < 1 \quad (2.25)$$

A Figura 2.17 representa o critério de falha de Mohr para as tensões principais  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  representadas no plano.

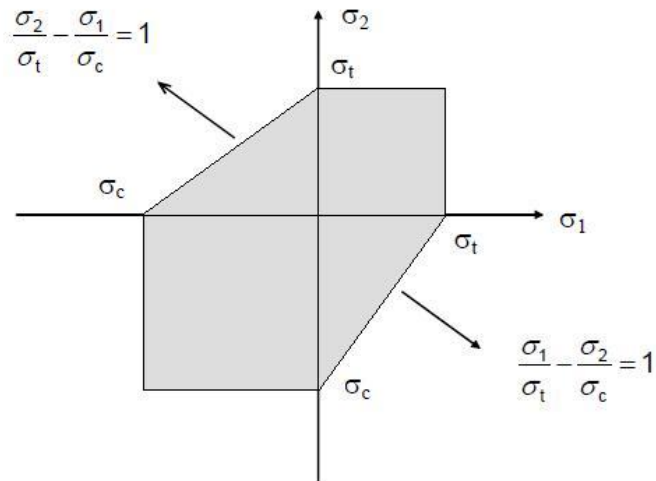


Figura 2.17 – Representação gráfica da teoria de Coulomb-Mohr para estado de tensão biaxial.

Como tanto a teoria de Rankine como a teoria de Coulomb-Mohr se utilizam das tensões principais para prever a ruptura do material é interessante comparar as duas teorias através da representação gráfica dos resultados experimentais de vários materiais sujeitos a tensões biaxiais conforme Figura 2.18.

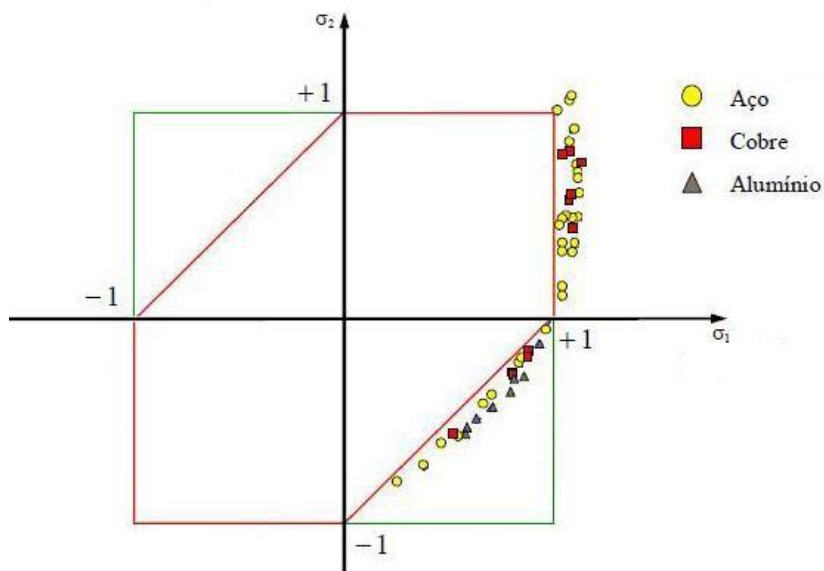


Figura 2.18 – Superposição das curvas de Coulomb-Mohr e de tensão normal máxima.

Na Figura 2.18 observa-se que no primeiro e no quarto quadrantes, as duas teorias são praticamente equivalentes, podendo ser empregadas qualquer uma delas para se prever a vida à fadiga. Já as principais diferenças entre essas duas teorias podem ser visualizadas no

quarto quadrante, no qual se verifica que a teoria de Coulomb-Mohr é relativamente mais conservadora, tendo em vista que a maioria dos pontos caiu fora do gráfico.

#### 2.3.4.3 - Teoria de Palmgren-Miner ou regra linear de dano acumulado

O elemento estrutural sofre ações variáveis, de amplitude não necessariamente constante, ao longo do tempo, o que dificulta a análise do comportamento da estrutura sob fadiga. Nesse sentido, um processo simples foi proposto por Palmgren e representado por Miner, ficando conhecido como a regra de Palmgren-Miner ou regra linear de acúmulo de dano. De acordo com essa regra, o dano que a peça sofreu sob a ação de uma dada amplitude da tensão cíclica é diretamente proporcional ao número de ciclos suportados naquela amplitude de tensão. Ou seja, o dano (D) provocado por esta sollicitação cíclica é determinado em função do número de ciclos aplicados no i-ésimo nível de tensão ( $n_i$ ) e do número de repetições que causaria a ruptura por fadiga no i-ésimo nível de tensão ( $N_i$ ), o que corresponde ao número de ciclos até a falha desse nível.

$$D = f\left(\frac{n_i}{N_i}\right) = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots + \frac{n_i}{N_i} \quad (2.26)$$

Dessa forma, a falha ocorrerá quando o dano total atingir 100%, ou seja:

$$D = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (2.27)$$

Por outro lado, observou-se que a expressão de acúmulo linear de danos apresenta algumas inconsistências (Schijve, 2001):

- ✓ *Efeito do ciclo de cargas com amplitudes de tensão abaixo do limite de fadiga:* A regra de Miner não prevê danos com ciclos de carga abaixo do limite de fadiga. Entretanto, em carregamentos com ciclos de amplitudes variáveis foi comprovado que pode ser iniciada uma trinca com tensões mais elevadas que o limite de fadiga e a mesma progredir com tensões abaixo do limite de fadiga;
- ✓ *Efeito da seqüência do carregamento:* Em carregamentos com duas seqüências de tensões observa-se na seqüência decrescente (tensão alta seguida de tensão baixa)



que o resultado do dano acumulado é menor que 1,0. Enquanto na seqüência de carregamento crescente (tensão baixa seguida de tensão alta), o resultado é maior do que 1,0.

Apesar dessas contradições, a regra de Palmgren-Miner é muito usada como uma orientação preliminar, pois não existe uma alternativa prática e tão simples quanto a regra linear de acúmulo de dano. Assim, é recomendável seguir os princípios da regra de Palmgren-Miner, porém deve-se ter mente as limitações da regra, bem como as dispersões inerentes do processo de fadiga.

### **3- PROGRAMA EXPERIMENTAL**

O programa experimental foi desenvolvido tendo em vista o cumprimento dos objetivos propostos. Assim, foi feito o levantamento das principais propriedades mecânicas da argamassa a ser empregada em emboço e do seu comportamento à fadiga. Para isso foram avaliadas duas argamassas diferentes, sendo uma argamassa industrializada e uma argamassa mista dosada e produzida no laboratório.

Nesse sentido, as particularidades de cada etapa relacionadas com os fatores de estudo, os materiais empregados, os ensaios de caracterização, os ensaios mecânicos e o ensaio de fadiga incluindo o projeto piloto são descritas a seguir. Vale salientar que os ensaios de caracterização foram realizados no Laboratório de Ensaios de Materiais (LEM), os ensaios de granulometria a laser foram feitos no Laboratório de Geotecnia e os ensaios de fadiga foram realizados no Laboratório de Ensaios da Engenharia Mecânica (GAMMA), todos da Universidade de Brasília.

#### **3.1- FATORES DE ESTUDO**

Nesta etapa, definiu-se que os fatores de análise seriam dois tipos de argamassas, uma industrializada e uma mista. A caracterização das mesmas foi feita através dos ensaios de densidade de massa, penetração de cone, mesa de espalhamento, *Vane Test*, retenção de água, teor de ar incorporado, absorção de água por capilaridade, absorção total, índice de vazios, massa específica e retração. Por fim, com o objetivo de se conhecer o comportamento mecânico das argamassas foram realizados os ensaios de resistência à tração na flexão, resistência à compressão, resistência de aderência à tração e fadiga. O fluxograma com as etapas do estudo está apresentado na Figura 3.1, a partir da qual é possível ter uma visão global do estudo.

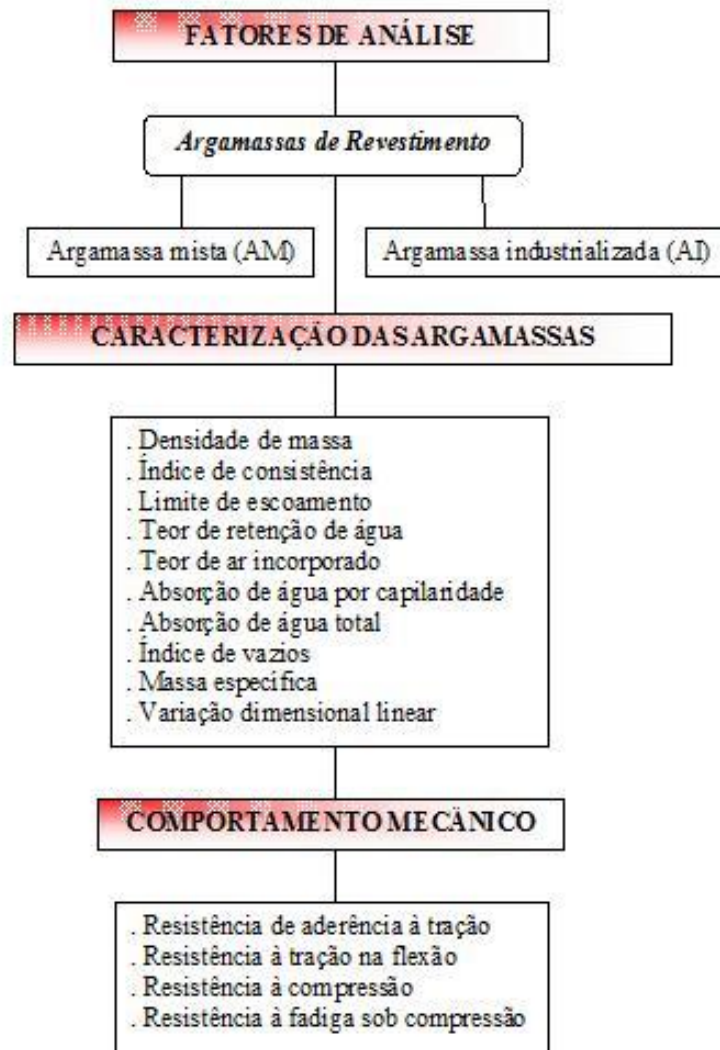


Figura 3.1 – Fluxograma com as variáveis de estudo.

### 3.2- MATERIAIS UTILIZADOS

A escolha dos materiais empregados nesta pesquisa justifica-se pela facilidade de obtenção destes materiais e por serem comumente empregados nas argamassas de revestimentos das obras de Brasília e entorno, sendo assim eles apresentam as características desejáveis para a pesquisa desenvolvida.

#### 3.2.1 - Cimento

Na produção das argamassas mistas foi empregado o cimento Portland CII-F32 da marca CIPLAN, cuja composição apresenta teores de clínquer + sulfatos de cálcio e material

carbonático (NBR 11578:1991). As características deste material encontram-se nas Tabelas 3.1 e 3.2 e a sua curva granulométrica pode ser visualizada na Figura 3.2.

Tabela 3.1 – Características físico-mecânicas do cimento.

CARACTERÍSTICAS		MÉTODO DE ENSAIO	RESULTADOS	LIMITES*
Finura	Resíduo na peneira 200 (%)	NBR 11579:1991	1,62	-
Massa Específica Real (g/cm <sup>3</sup> )		NBR NM 248:2001	3,161	-
Massa Específica Aparente (kg/dm <sup>3</sup> )		NBR NM 248:2001	1,06	-
Água da Pasta de Consistência Normal (%)		NBR NM 43:2002	29,2	-
Tempos de Pega	Início de Pega (hora:min.)	NBR 9776:1987	3:46	≥ 1
	Fim de Pega (hora:min.)		4:40	≤ 10
Expansibilidade de Le Chatelier	a frio (mm)	NBR MB 3435:1991	1,6	≤ 5
	a quente (mm)		0,7	≤ 5
Resistência à compressão (Mpa)	3 dias	NBR 7215:1996	27,13	≥ 10
	7 dias		30,64	≥ 20
	28 dias		40,35	≥ 32

\* NBR 11578:1991

Tabela 3.2 – Características químicas do cimento.

CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA*	MÉTODO DE ENSAIO	RESULTADOS
Resíduo insolúvel (%)	NBR 5744:1989	4,25
Perda ao fogo (%)	NBR 5743:1989	1,65
Óxido de cálcio - CaO (%)	NBR 9203:1985	59,60
Óxido de ferro - Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)		2,73
Dióxido de silício - SiO <sub>2</sub> (%)		22,14
Óxido de alumínio - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)		4,77
Óxido de magnésio - MgO (%)		4,78
Trióxido de enxofre - SO <sub>3</sub> (%)	NBR 5745:1989	3,13
Óxido de potássio - K <sub>2</sub> O (%)	NBR 8347:1991	0,98
Óxido de sódio - Na <sub>2</sub> O (%)		0,25

\* A caracterização química do cimento foi feita no Laboratório da Votorantim em Brasília.

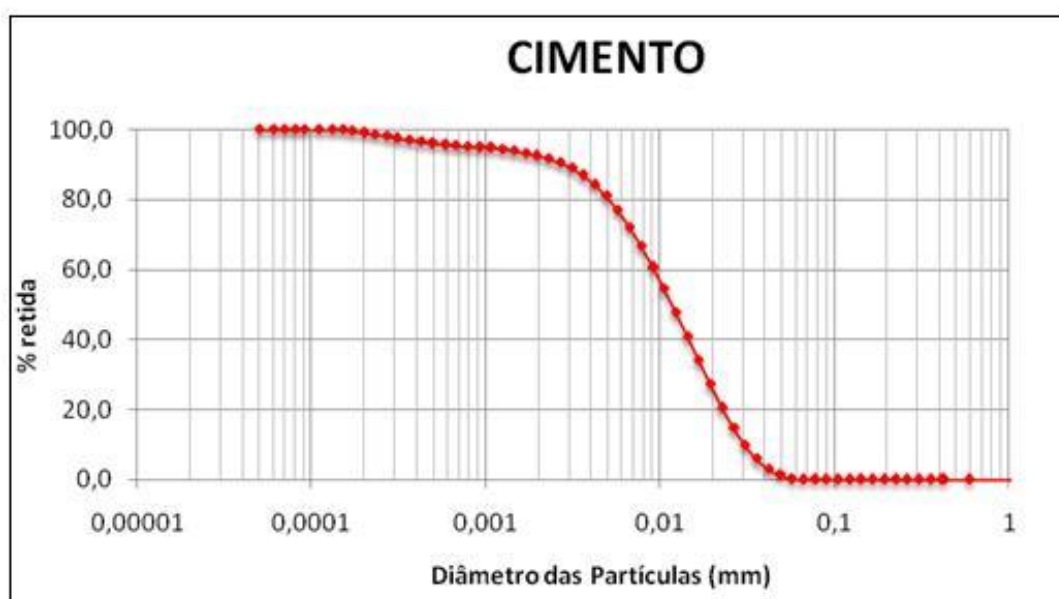


Figura 3.2 – Curva granulométrica do cimento obtida a partir do ensaio de granulometria a laser.

### 3.2.2 - Cal

Na composição das argamassas mistas foi usada a cal hidratada CHIII da marca Supercal ICAL. As Tabelas 3.3 e 3.4 mostram as características físicas e químicas, respectivamente, da cal e a Figura 3.3 representa a sua curva granulométrica.

Tabela 3.3 – Características físicas da cal.

CARACTERÍSTICAS	MÉTODO DE ENSAIO	RESULTADOS
Massa Específica Real (g/cm <sup>3</sup> )	NBR 9776:1987	1,704
Massa Específica Aparente (kg/dm <sup>3</sup> )	NBR 7251:1982	0,52

Tabela 3.4 – Características químicas da cal.

CARACTERÍSTICAS	MÉTODO DE ENSAIO	RESULTADOS
Perda ao fogo (%)*	NBR 5743:1989	26
Resíduo insolúvel (%)**	-	< 6
Óxidos não-hidratados (%)**	-	0
Óxidos totais (%)**	-	> 90
Anídrico carbônico (%)**	-	< 10

\* Ensaio realizado no Laboratório de Materiais da UnB.

\*\* Dados retirados do site do fabricante [www.ical.com.br](http://www.ical.com.br).

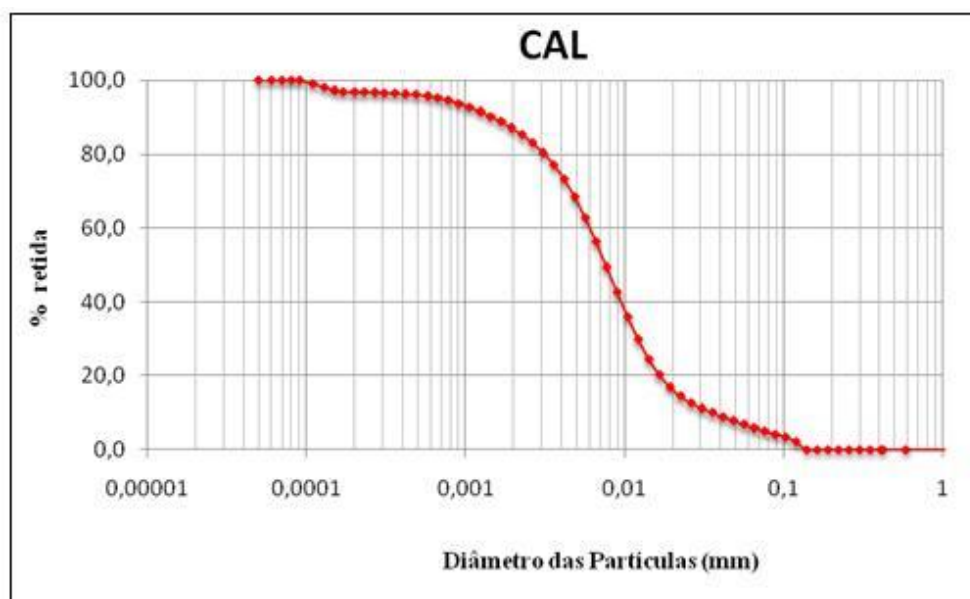


Figura 3.3 – Curva granulométrica da cal obtida através do ensaio de granulometria a laser.

### 3.2.3 - Areia

A areia empregada nas argamassas mistas é proveniente de depósitos aluvionares do Rio Corumbá no estado de Goiás. Anteriormente à sua caracterização, realizou-se a sua secagem em estufa por no mínimo 48 horas. Posteriormente, fez-se o seu quarteamento

conforme a NBR NM 27:2000 com o auxílio de um separador mecânico para agregado miúdo (Figura 3.4).



Figura 3.4 – Detalhe do quarteamento dos agregados miúdos.

A caracterização deste agregado pode ser visualizada na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Características físicas da areia.

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>MÉTODO DE ENSAIO</b>	<b>RESULTADOS</b>
Módulo de Finura	NBR NM 248:2001	2,23
Dimensão Máxima Característica (mm)	NBR NM 248:2001	4,80
Massa Unitária (kg/dm <sup>3</sup> )	NBR 7251:1982	1,61
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	NBR 9776:1987	2,64
Índice de vazios (%)	-	39,00
Material Pulverulento (%)	NBR NM 46:2003	3,83
Teor de Inchamento (%)	NBR 6467:2006	29

Conforme se observa na Tabela 3.5, a areia usada apresenta módulo de finura igual a 2,23. Vale salientar que, buscando-se uma argamassa com textura e trabalhabilidade adequada, a areia era previamente peneirada de forma que apenas o material passante na peneira 2,4mm era usado. A Tabela 3.6 e a Figura 3.5 mostram a distribuição granulométrica desta areia.

Tabela 3.6 – Distribuição granulométrica da areia.

<b>PENEIRAS (mm)</b>	2,4	1,2	0,6	0,3	0,15	0,075
<b>% RETIDA ACUMULADA</b>	0,14	26,56	44,26	65,02	93,43	100,00

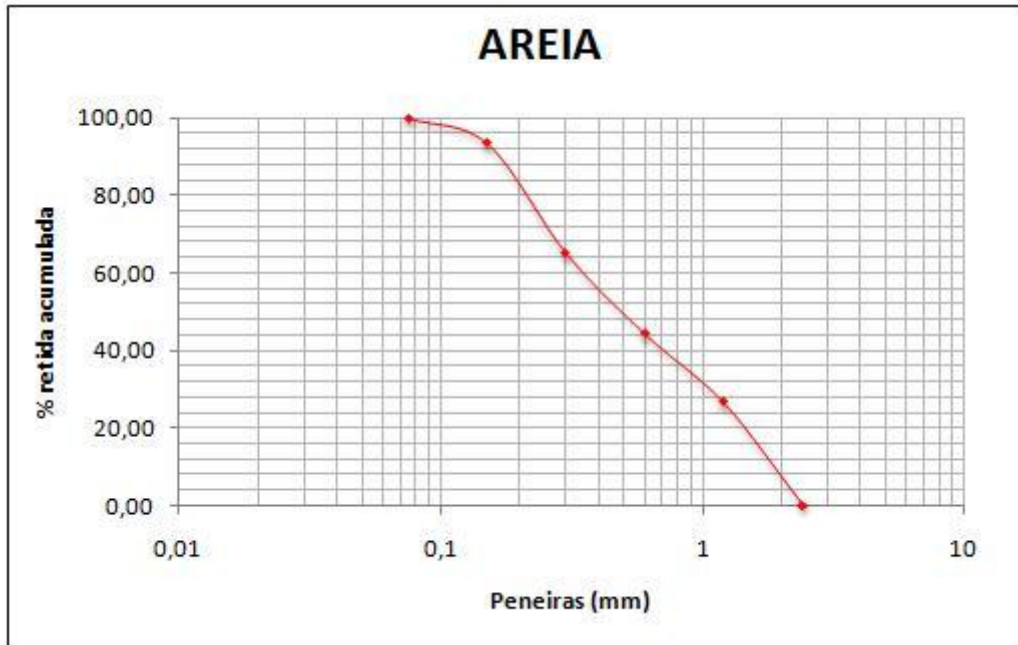


Figura 3.5 – Curva granulométrica da areia.

### 3.2.4 - Argamassa industrializada

Neste estudo foi utilizada a argamassa Votomassa de múltiplo uso da marca Votorantim Cimentos. A Tabela 3.7 mostra os componentes presentes nesta argamassa e a curva granulométrica deste material pode ser visualizada na Figura 3.6.

Tabela 3.7 – Composição da argamassa industrializada Votomassa de múltiplo uso.

<b>COMPOSIÇÃO*</b>
CPIIF-32
Areia cálcarea fina
Areia média fina
Filler (pode ser calcítico, dolomítico, silicoso)
Retentor de água Tylose (Éter de celulose)
Incorporador de ar Texapon

\* Dados fornecidos pelo Laboratório da Votorantim em Brasília/DF



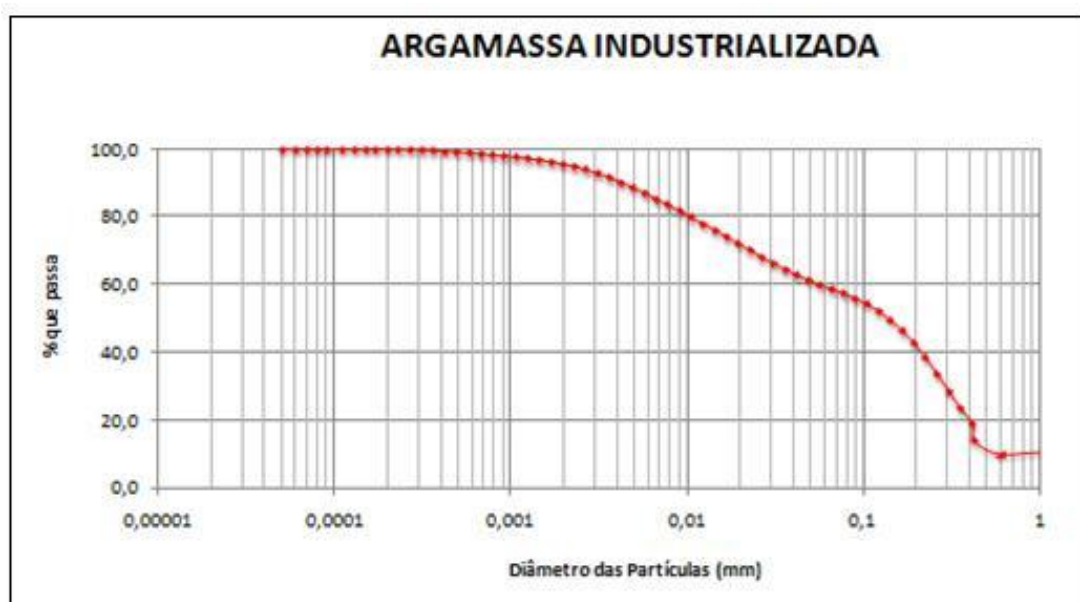


Figura 3.6 – Curva granulométrica da argamassa industrializada obtida através do ensaio de granulometria a laser.

### 3.3- METODOLOGIA DA PESQUISA

#### 3.3.1 - Estudo de dosagem

Como as argamassas de revestimento não possuem métodos de dosagem totalmente reconhecidos no meio técnico nacional, a argamassa mista usada nessa pesquisa foi produzida a partir de um estudo de dosagem que seguiu o método adotado no Laboratório de Ensaio de Materiais da Universidade de Brasília (LEM/UnB) que, por sua vez, foi baseado nos conceitos de Selmo (1989). Este método leva em conta o parâmetro de dosagem “E” que pode ser calculado pela Equação abaixo:

$$E = \frac{(\text{areia} + \text{cal})}{\text{cimento}} \quad (3.1)$$

Este método consiste na fixação da quantidade de agregados miúdos para se determinar a quantidade de cimento para um determinado valor de “E” (nesta etapa, considera-se a quantidade de cal nula). Com a quantidade de cimento e areia determinada, segue-se testando a quantidade de cal e água através da avaliação táctil-visual de sua trabalhabilidade. Uma vez determinada as quantidades consideradas apropriadas de cal e

água, é possível calcular o valor “real” do parâmetro “E” da mistura. Neste estudo, variou-se o parâmetro “E” nos valores usuais (estimados) de 6, 7, 9, 10 e 12, de forma a se obter as relações necessárias ao estudo da composição das argamassas.

Para a produção das argamassas propriamente dita, seguiu-se as etapas abaixo:

- ✓ Pesagem de todos os materiais (cimento, areia, cal e água);
- ✓ Umedecimento da areia;
- ✓ Pré-mistura do cimento e da areia com o auxílio de uma espátula;
- ✓ Uma vez homogeneizado os materiais, foram acrescentados a água de amassamento e a cal até se atingir a trabalhabilidade adequada (Figura 3.7), o que era feito através de uma avaliação táctil-visual (Figura 3.8).



Figura 3.7 – Sequência do processo de produção das argamassas.



Figura 3.8 – Avaliação táctil-visual de argamassas de diversos traços.

Com isso, foram determinados vários traços tendo como parâmetro de qualidade o índice de consistência das mesmas pré-estabelecido em  $55 \pm 5$  mm (Tabela 3.8). Vale salientar que no estudo de dosagem foi usada a areia seca em estufa até constância de peso.

Tabela 3.8 – Caracterização do estudo de dosagem.

$E_{nom.}$	$E_{real}$	CONE (mm)	DENS. DE MASSA ( $kg/m^3$ )	cal/cim	água/cim	TRAÇO EM MASSA (cimento:cal:areia:água)
6	6,31	61	1.949	0,31	1,28	1:0,26:6:1,28
<b>7</b>	<b>7,47</b>	<b>59</b>	<b>1.923</b>	<b>0,47</b>	<b>1,52</b>	<b>1:0,47:7:1,52</b>
9	9,63	58	1.915	0,63	1,98	1:0,47:9:1,98
10	10,75	57	1.902	0,75	2,28	1:0,47:10:2,28
12	12,95	55	1.881	0,95	2,80	1:0,86:12:2,80

Baseando-se nos resultados obtidos na Tabela 3.8, foram traçadas curvas de dosagem (Figuras 3.9 e 3.10) a fim de se obter os parâmetros iniciais da dosagem das argamassas mistas usadas no decorrer desta pesquisa.

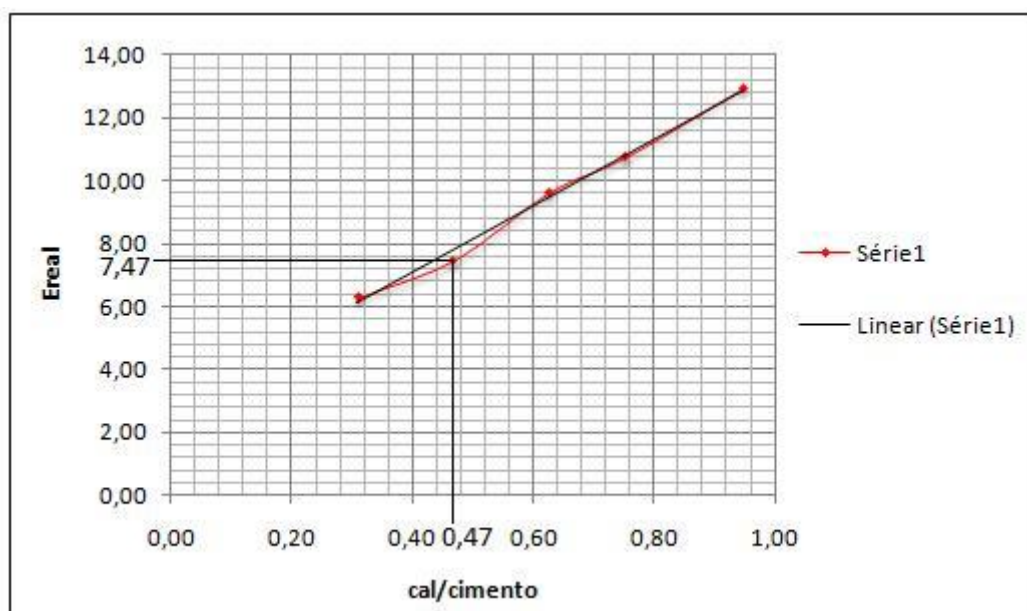


Figura 3.9 – Relação entre cal/cim. versus parâmetro “E”.

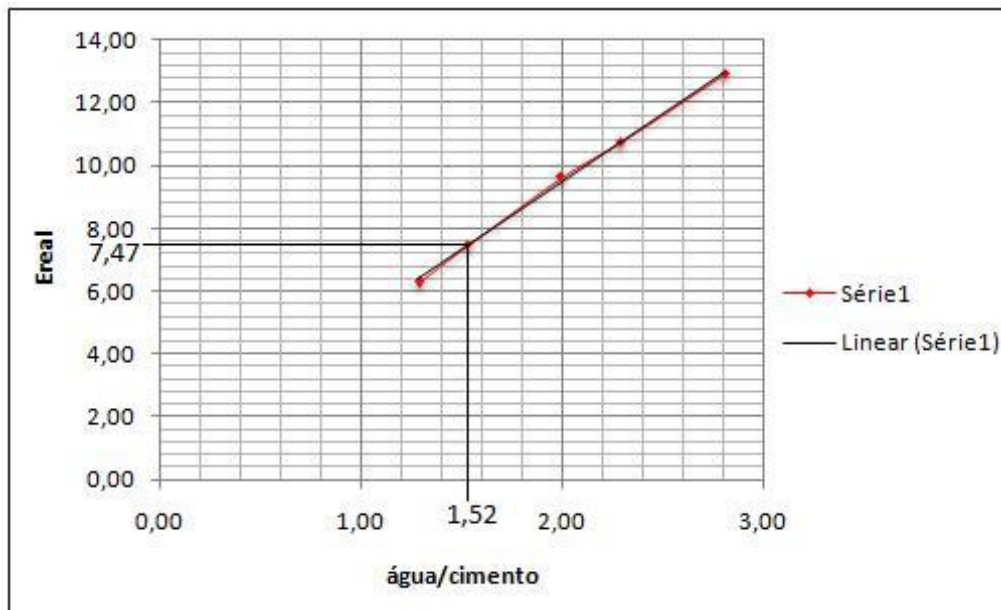


Figura 3.10 – Relação entre água/cim. versus parâmetro “E”.

Em face dos resultados obtidos na Tabela 3.8 e nas Figuras 3.9 e 3.10 associados a uma avaliação táctil-visual, definiu-se que o traço empregado na produção das argamassas mistas é o **1:0,47:7:1,52** do “ $E_{\text{estimado}}=7$ ”.

### 3.3.2 - Produção das argamassas

Com as proporções dos materiais empregados nas argamassas previamente definidas, partiu-se para a produção das argamassas.

As argamassas empregadas nos ensaios de caracterização foram produzidas em um misturador mecânico, da marca Hobart, modelo N-50, utilizando-se em cada mistura 2500 g de material anidro. Os procedimentos adotados foram baseados na NBR 13278:2005 e são detalhados abaixo:

- ✓ Pesagem dos materiais em quantidades definidas pelo traço adotado;
- ✓ Pré-mistura (com o auxílio de uma espátula) no recipiente do misturador do cimento, cal e areia;
- ✓ Adição da água de amassamento e homogeneização dos materiais no recipiente do misturador durante 2 minutos em velocidade baixa;

- ✓ Raspagem (com o auxílio de uma espátula) da argamassa aderida na superfície interna e no fundo do misturador;
- ✓ Remistura dos materiais por mais 2 minutos em velocidade baixa.

Já a produção das argamassas mistas usadas no estudo de fadiga foi feita em betoneiras com eixo inclinado com capacidade de aproximadamente 120 litros, utilizando-se em cada mistura 35.000g de material anidro suficientes para moldagem de 10 corpos-de-prova cilíndricos 10x20cm. Os procedimentos adotados foram os mesmos da preparação das argamassas para caracterização, diferenciando-se apenas o tempo de mistura (90 segundos).

Para o preparo da argamassa industrializada foram seguidas as recomendações do fabricante que constam na embalagem do material. Assim, para cada 50 kg de material seco, foram acrescentados 8 litros de água com um tempo de mistura equivalente a 90 segundos.

É de suma importância destacar que tanto as argamassas produzidas para o ensaio de caracterização como para o ensaio de fadiga apresentaram características semelhantes, tendo em vista que era feito um controle no tocante ao teor de ar incorporado e ao índice de consistência logo após cada mistura.

### **3.3.3 - Caracterização das argamassas no estado fresco**

Sabendo-se que as propriedades das argamassas variam em função de seus componentes, do traço, da quantidade de água utilizada e do uso de aditivos ou adições, esta caracterização foi feita com o propósito de se obter os principais fatores qualitativos das argamassas de revestimento estudadas.

Cabe salientar que os ensaios foram realizados imediatamente após a preparação da argamassa e o resultado de cada ensaio corresponde à média de três determinações consecutivas realizadas em amostras diferentes de uma mesma argamassa. A seguir, são mostrados os ensaios executados para caracterização das argamassas no estado fresco.

### 3.3.3.1 - Densidade de massa

A densidade de massa nada mais é do que a massa unitária da argamassa que é definida como a relação entre a massa de material sólido e o volume, incluindo os vazios impermeáveis. O ensaio foi feito conforme preconiza a NBR 13278:2005, cumprindo-se as seguintes etapas:

- ✓ Calibragem do recipiente cilíndrico em PVC para determinar a sua massa e o seu volume;
- ✓ Preenchimento com argamassa do recipiente cilíndrico de PVC em três camadas de alturas aproximadamente iguais, adensando-as com 20 golpes cada uma, uniformemente distribuídos. Atenção especial foi dada para que na primeira camada, a espátula não batesse fortemente contra o fundo do recipiente e, nas demais camadas, aplicou-se apenas a força necessária para que a espátula penetrasse apenas na superfície da camada imediatamente inferior;
- ✓ Execução de três quedas do recipiente com altura aproximada de 3 cm a fim de se eliminar os vazios existentes entre a argamassa e o recipiente;
- ✓ Rasamento da superfície da argamassa com o auxílio de uma espátula;
- ✓ Limpeza do recipiente e em seguida, registro da massa do conjunto.

Para a determinação da densidade de massa da argamassa no estado fresco, os resultados obtidos nos ensaios devem ser inseridos na equação abaixo:

$$d = \frac{(m_c - m_v)}{v_r} 100 \quad (3.2)$$

onde:

$d$  = densidade de massa ( $\text{kg/m}^3$ )

$m_c$  = massa do recipiente cilíndrico com argamassa (g)

$m_v$  = massa do recipiente cilíndrico vazio (g)

$v_r$  = volume do recipiente cilíndrico ( $\text{cm}^3$ )



Figura 3.11 – Ensaio de densidade de massa.

#### 3.3.3.2 - Penetração de cone

Este ensaio foi realizado de acordo com a norma internacional ASTM C780:1996 com o objetivo de se avaliar a consistência da argamassa através da resistência de penetração de um cone metálico sob ação da gravidade. Os procedimentos para realização desse ensaio são:

- ✓ Preenchimento do recipiente cilíndrico com argamassa, adotando-se os mesmos procedimentos do ensaio de densidade de massa;
- ✓ Rasamento da superfície da argamassa com o auxílio de uma espátula;
- ✓ Posicionamento do cone rente à superfície da argamassa, efetuando-se a leitura inicial;
- ✓ Liberação do cone para que este penetre na argamassa, realizando-se a leitura final.

O índice de consistência da argamassa ensaiada corresponde à diferença entre a leitura inicial e a leitura final, expressa em milímetros.

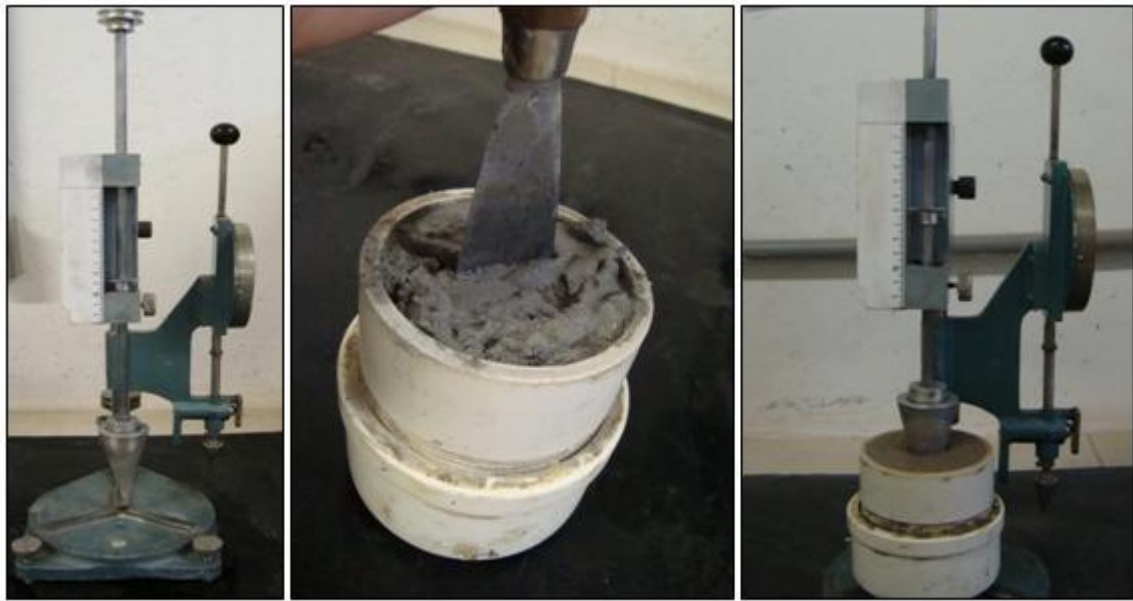


Figura 3.12 – Ensaio de penetração de cone.

#### 3.3.3.3 - Mesa de consistência

O ensaio foi feito segundo a NBR 7215:1996 a fim de se determinar a consistência da argamassa a partir do espalhamento da argamassa sobre uma mesa padronizada. As principais etapas deste ensaio são descritas abaixo:

- ✓ Lubrificação da mesa do ensaio de consistência com óleo mineral, centralizando o molde com forma de um tronco de cone sobre a mesa;
- ✓ Preenchimento com argamassa do molde em três camadas de mesma altura, com 15, 10 e 5 golpes distribuídos na primeira, segunda e terceira camada, respectivamente;
- ✓ Alisamento da superfície da argamassa com o auxílio de uma régua e limpeza da mesa ao redor do molde;
- ✓ Retirada do molde e acionamento da manivela do aparelho, de forma que a mesa caia 30 vezes em aproximadamente 30 segundos.



- ✓ Medição dos diâmetros do espalhamento da argamassa com o auxílio de um paquímetro.



Figura 3.13 – Ensaio de mesa de consistência.

O índice de consistência da argamassa corresponde à média de três medidas de diâmetros tomados em pares de pontos uniformemente distribuídos ao longo do perímetro, expressa em milímetros.

#### 3.3.3.4 - Vane Test

Este ensaio é uma adaptação da Mecânica dos Solos e, atualmente, é usado para avaliar o comportamento reológico das argamassas, especialmente a sua resistência ao cisalhamento ou tensão limite de escoamento, e assim determinar de forma indireta a consistência das mesmas, como nos trabalhos desenvolvidos por Alves (2002), Do Ó (2004), Paes (2004), Pereira (2007). A realização deste ensaio seguiu os procedimentos adotados por estes autores:

- ✓ Preenchimento do recipiente cilíndrico com argamassa, adotando-se os mesmos procedimentos do ensaio de densidade de massa;
- ✓ Introdução da palheta na amostra até submergi-la completamente;
- ✓ Aplicação manual de uma tensão de cisalhamento a uma velocidade de 90º/minuto, registrando-se na parte superior do equipamento através de um torquímetro, a deformação medida durante o ensaio até a ruptura (situação de torque máximo) da camada de argamassa presente ao redor da palheta.

O resultado obtido no ensaio multiplicado pela constante da mola gera o torque máximo. Conhecendo-se ainda a geometria da palheta (altura e diâmetro), pode-se determinar a tensão limite de escoamento pela equação abaixo:

$$T_m = \frac{\pi \cdot D^3}{2} \left( \frac{H}{D} + \frac{1}{3} \right) \tau_0 \quad (3.3)$$

onde:

$T_m$  = torque máximo (kgf.cm)

D = diâmetro da palheta (cm)

H = altura da palheta (cm)

$\tau_0$  = tensão limite de escoamento ou resistência ao cisalhamento (kgf/cm<sup>2</sup>)

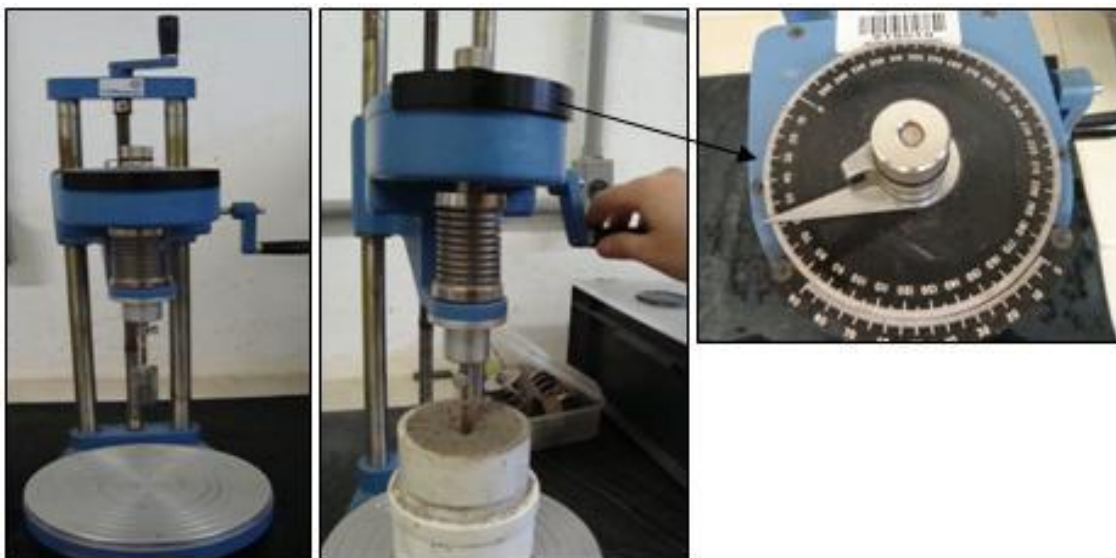


Figura 3.14 – Ensaio Vane Test.

### 3.3.3.5 - Retenção de água

O ensaio foi executado segundo a NBR 13277:2005 para determinar, em um curto período de tempo, a quantidade de água livre capaz de contribuir potencialmente para o fenômeno de exsudação das argamassas. A sua realização seguiu as etapas abaixo:

- ✓ Montagem do prato sobre o funil;
- ✓ Umedecimento do papel-filtro, colocando-o sobre o fundo do prato;
- ✓ Acionamento da bomba de vácuo de maneira a se aplicar ao conjunto prato+papel filtro úmido uma pressão de sucção de 51mmHg durante 90 segundos, pesando em seguida o conjunto;
- ✓ Preenchimento do prato com argamassa até um pouco acima da borda, adensando-a com 37 golpes de soquete (16 golpes junto à borda e 21 golpes no centro) de forma a se garantir o preenchimento uniforme do prato;
- ✓ Rasamento da superfície da argamassa e limpeza da borda do conjunto, registrando-se logo depois a sua massa;
- ✓ Acionamento novamente da bomba de vácuo, aplicando-se ao conjunto uma pressão de sucção de 51 mmHg durante 15 minutos, pesando em seguida o conjunto.

Para determinação da quantidade de água retida (em relação ao teor total de água usado), os dados obtidos nos ensaios devem ser inseridos na equação abaixo:

$$R_a = \left[ 1 - \frac{(m_a - m_s)}{AF(m_a - m_v)} \right] \cdot 100 \quad (3.4)$$

onde:

$R_a$  = retenção de água (%)

$m_a$  = massa do conjunto com argamassa (g)

$m_s$  = massa do conjunto após a sucção (g)

$m_v$  = massa do conjunto vazio (g)

$AF = \frac{m_w}{m + m_w}$  = fator água/argamassa fresca

$m_w$  = massa total de água acrescentada à mistura (g)

$m$  = massa de argamassa industrializada ou soma das massas dos componentes anidros da argamassa mista (g)



Figura 3.15 – Ensaio de retenção de água.

#### 3.3.3.6 - Teor de ar incorporado

O teor de ar incorporado representa a quantidade de ar existente em um determinado volume de argamassa. Este ensaio é feito através do método pressométrico descrito na NBR NM 47:2002, sendo usado o aparelho do tipo B da marca SOLOTEST que tem capacidade de 1 litro e é indicado para argamassas. Para a determinação do teor de ar incorporado nas amostras de argamassa são executadas as etapas abaixo:

- ✓ Preenchimento com argamassa do recipiente em três camadas de alturas aproximadamente iguais, adensando-as com 25 golpes cada uma, uniformemente distribuídos;
- ✓ Rasamento da superfície da argamassa com uma régua metálica;
- ✓ Acoplamento da tampa sobre o recipiente base, mantendo-se as torneiras laterais abertas;
- ✓ Injeção de água com o auxílio da seringa através da torneira esquerda até o instante em que todo o ar tivesse sido expelido pela torneira da direita;
- ✓ Aplicação de uma pressão inicial com o auxílio de uma bomba de ar, conforme indicado no equipamento;

- ✓ Após a constatação de que todas as torneiras estavam completamente fechadas, acionou-se a alavanca que transfere a pressão para o recipiente base, mantendo-a pressionada por alguns segundos.



Figura 3.16 – Ensaio para determinação do teor de ar incorporado.

O teor de ar existente na argamassa ensaiada corresponde à leitura realizada no equipamento após a estabilização do ponteiro do manômetro.

### **3.3.4 - Geometria e processo de moldagem dos corpos-de-prova usados nos ensaios das argamassas no estado endurecido**

#### **3.3.4.1 - Geometria dos corpos-de-prova**

Após a escolha do traço da argamassa, definiu-se a geometria dos corpos-de-prova usados nos ensaios das argamassas no estado endurecido. A seguir, são apresentados os ensaios realizados com os seus respectivos corpos-de-prova:

- ✓ Densidade de massa aparente, absorção por capilaridade, absorção total, índice de vazios, massa específica e resistência à tração na flexão: Foram empregados corpos-de-prova prismáticos com seção de 4cm de largura x 4cm de altura x 16cm de comprimento (CP prismático - 4 x 4 x 16);
- ✓ Resistência à compressão: Os corpos-de-prova ensaiados à compressão foram extraídos dos corpos-de-prova do ensaio à tração na flexão;
- ✓ Retração: Foram usados corpos-de-prova prismáticos com seção de 25mm de largura x 25mm de altura e 285 mm de comprimento, entretanto, cabe salientar que o comprimento efetivo, ou seja, o comprimento entre as extremidades internas dos pinos de medida corresponde a 250mm.

#### 3.3.4.2 - Moldagem e cura dos corpos-de-prova

Uma vez definida a geometria dos corpos-de-prova, fez-se a moldagem dos mesmos, conforme detalhado abaixo.

- ✓ A moldagem dos corpos-de-prova empregados nos ensaios de densidade de massa aparente, absorção por capilaridade, absorção total, índice de vazios, massa específica, resistência à tração na flexão e resistência à compressão, seguiu os procedimentos descritos na NBR 13279:2005, conforme descrito abaixo:
  - Fixação dos moldes prismáticos sobre a mesa de adensamento;
  - Aplicação de uma fina camada de óleo mineral nas faces internas dos moldes;
  - Preenchimento da primeira camada de argamassa em cada compartimento do molde, espalhando-a levemente a fim de que as camadas fiquem uniformes;
  - Aplicação de 30 quedas através da mesa de adensamento;
  - Preenchimento da segunda camada de argamassa em cada compartimento do molde;
  - Aplicação novamente de 30 quedas através da mesa de adensamento;
  - Rasamento dos corpos-de-prova com o auxílio da régua metálica;

- Após  $48 \pm 24$ h mantidos nos moldes em uma câmara seca (temperatura= $23 \pm 2^\circ\text{C}$  e umidade= $50 \pm 5\%$ ), os corpos-de-prova foram desmoldados;
- Cura dos corpos-de-prova nas condições do laboratório (temperatura= $23 \pm 2^\circ\text{C}$  e umidade= $60 \pm 5\%$ ) até o instante da realização do ensaio.



Figura 3.17 – Sequência de moldagem dos corpos de prova usados nos ensaios de densidade de massa, absorção, índice de vazios, massa específica, resistência à tração na flexão e resistência à compressão.

- ✓ Os corpos-de-prova usados no ensaio de retração foram moldados de acordo com a NBR 15261:2005 nas etapas abaixo:
  - Aplicação de uma fina camada de óleo mineral sobre as faces internas do molde.
  - Enroscamento dos pinos de medida, atentando-se para que eles fiquem isentos do óleo para garantir a sua aderência com a argamassa;
  - Preenchimento de cada compartimento do molde com argamassa em duas camadas com alturas aproximadamente iguais, aplicando-se 25 golpes em cada uma de modo a se obter corpos-de-prova uniformes;
  - Rasamento da superfície da argamassa com auxílio de uma régua, cobrindo-a, em seguida, com filme PVC para evitar a perda de umidade para o ambiente;
  - Após  $48 \pm 6$ h mantidos nos moldes em uma câmara seca (temperatura= $23 \pm 2^\circ\text{C}$  e umidade= $50 \pm 5\%$ ), os corpos-de-prova foram desmoldados;
  - Durante o período de medição, os corpos-de-prova ficam armazenados em câmara seca.





Figura 3.18 – Sequência de moldagem do corpo-de-prova usado no ensaio de retração.

- ✓ A preparação dos substratos padrão empregados no ensaio de resistência potencial de aderência à tração foi realizada conforme a NBR 15258:2005 nas fases descritas a seguir:
- Limpeza do substrato padrão;
  - Fixação do gabarito no substrato padrão, deixando-se uma profundidade uniforme de aproximadamente  $18\pm 2$ mm para a aplicação da argamassa;
  - Aplicação de uma primeira camada de argamassa de 5mm com o auxílio de uma colher de pedreiro, pressionando-a sobre o substrato de forma a se eliminar os vazios e cobrir toda a sua superfície com argamassa;
  - Aplicação da segunda camada de argamassa, pressionando-a novamente;
  - Rasamento da superfície da argamassa com uma régua metálica a fim de se obter um acabamento uniforme;
  - Após as primeiras 24 horas na mesma posição e nas condições de laboratório (temperatura= $23\pm 2$ °C e umidade= $60\pm 5$ %), retirada do gabarito;
  - Cura dos corpos-de-prova nas condições do laboratório até o momento da realização do ensaio.



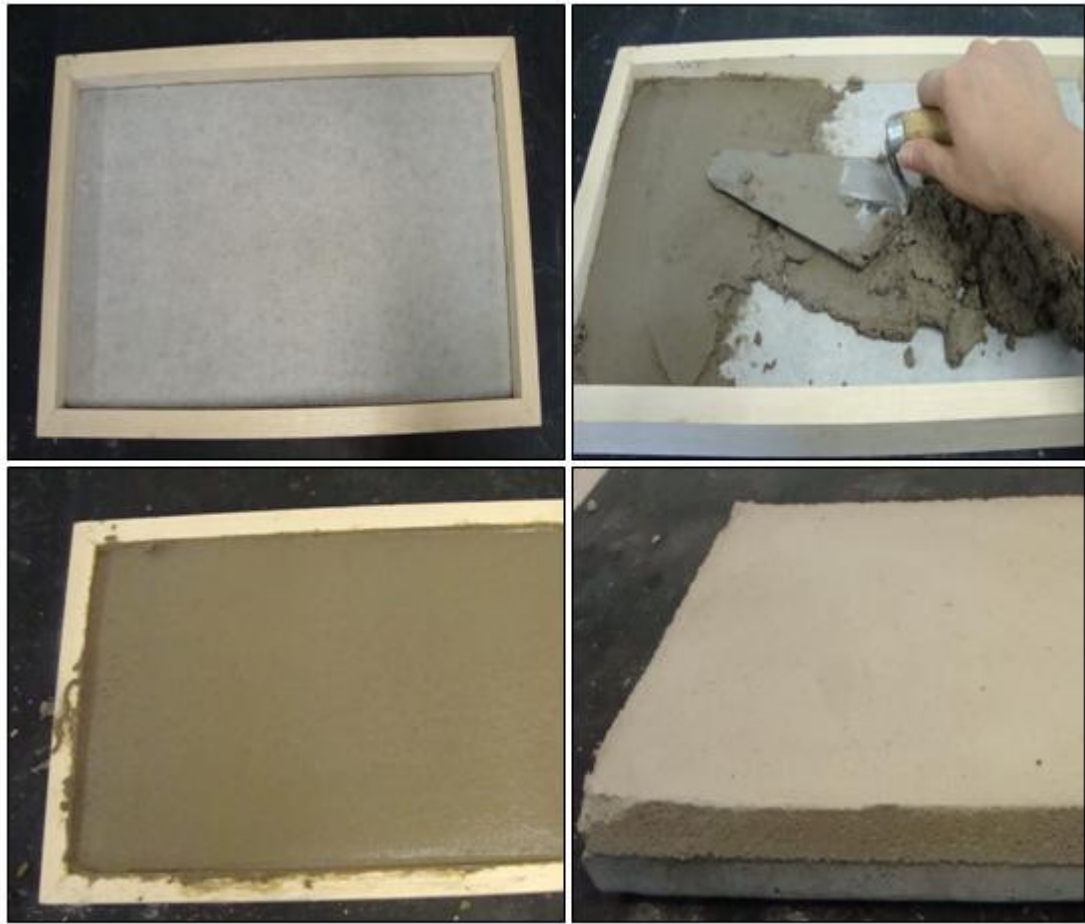


Figura 3.19 – Sequência de preparação do substrato padrão usado no ensaio de aderência.

### 3.3.5 - Ensaios no estado endurecido

Os ensaios foram realizados após o período pré-determinado de cura dos corpos-de-prova, sendo que o resultado de cada ensaio corresponde à média de três determinações consecutivas realizadas em corpos-de-prova diferentes de uma mesma argamassa. A seguir, são apresentados os ensaios realizados no estado endurecido.

#### 3.3.5.1 - Densidade de massa aparente

A densidade de massa aparente é a relação entre a massa e o volume total da argamassa após 28 dias de cura. Este ensaio foi realizado de acordo com os preceitos da NBR 13278:2005, seguindo as etapas abaixo:

- ✓ Determinação com o auxílio de um paquímetro, da altura, da largura e do comprimento do corpo-de-prova em pelo menos duas posições;
- ✓ Registro da massa do corpo-de-prova.

Para determinação da densidade de massa no estado endurecido, deve-se inserir os dados obtidos nos ensaios na equação abaixo:

$$\rho_{m\acute{a}x} = \frac{m}{v} 1000 \quad (3.5)$$

onde:

$\rho_{m\acute{a}x}$  = densidade de massa (kg/m<sup>3</sup>)

$m$  = massa do corpo-de-prova (g)

$v = l.h.c$  = volume do corpo-de-prova (cm<sup>3</sup>)

$l$  = largura (cm)

$h$  = altura (cm)

$c$  = comprimento (cm)



Figura 3.20 – Ensaio de densidade de massa aparente.

### 3.3.5.2 - Absorção por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade consiste em determinar a absorção capilar em um corpo-de-prova ao longo do tempo, em função da variação de massa até sua estabilização. Nesse sentido, quanto mais interligados forem os poros capilares, maior será

a absorção apresentada. Este ensaio foi feito após 28 dias de cura do corpo-de-prova segundo os procedimentos descritos na NBR 15259:2005, a saber:

- ✓ Abertura da torneira para preenchimento com água do recipiente de ensaio até o nível indicado no mesmo;
- ✓ Lixamento da superfície dos corpos-de-prova, registrando-se em seguida a sua massa inicial;
- ✓ Posicionamento do corpo-de-prova com a face quadrada sobre os suportes do recipiente de ensaio, atentando-se para que as outras superfícies não sejam molhadas e para que o nível de água permaneça constante a  $5\pm 1$ mm acima da face em contato com a água;
- ✓ Após 10 minutos, “secagem” da área molhada do corpo-de-prova com pano úmido, registrando-se em seguida a sua massa;
- ✓ Posicionamento novamente do corpo-de-prova no recipiente de ensaio, onde permaneceu durante 90 minutos, registrando-se a sua massa ao final desse período.

Os resultados obtidos nesse ensaio são inseridos na equação abaixo para determinação da absorção de água por capilaridade para cada tempo:

$$A_t = \frac{m_t - m_0}{16} \quad (3.6)$$

onde:

$A_t$  = absorção de água por capilaridade para cada tempo ( $\text{g}/\text{cm}^2$ )

$m_t$  = massa do corpo-de-prova em cada tempo(g)

$m_0$  = massa inicial do corpo-de-prova (g)

$t$  = corresponde aos tempos de 10min. e 90 min. (s)

16 = área do corpo de prova ( $\text{cm}^2$ )

Já o coeficiente de capilaridade representa a massa de água absorvida por metro quadrado da argamassa em contato com a água em função da raiz quadrada do tempo decorrido até atingir este ponto de absorção. Numericamente, o coeficiente de capilaridade é igual ao coeficiente angular da reta que passa pelos pontos representativos das determinações realizadas aos 10 min. e aos 90 min., considerando como abscissa a raiz do tempo e a

ordenada a absorção de água por capilaridade. Sendo assim, o coeficiente de capilaridade é calculado pela equação abaixo:

$$C = (m_{90} - m_{10}) \quad (3.7)$$

onde:

$c$  = coeficiente de capilaridade ( $\text{g}/\text{dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ )



Figura 3.21 – Ensaio de absorção por capilaridade.

### 3.3.5.3 - Absorção por imersão, índice de vazios e massa específica

Após 28 dias de cura dos corpos-de-prova, o ensaio foi executado conforme as recomendações da NBR 9778:2005, cujas principais etapas são mostradas a seguir:

- ✓ Introdução dos corpos-de-prova na estufa (à temperatura de  $105 \pm 5^\circ\text{C}$ ) até constância de massa;

- ✓ Decorridos 72 horas, registra-se a sua massa seca;
- ✓ Imersão dos corpos-de-prova em um recipiente com água, onde permaneceu por um período de 72 horas (até sua saturação);
- ✓ Alocação do conjunto recipiente+água+corpo-de-prova sobre uma chapa para ser levado à ebulição;
- ✓ Após 5 horas em ebulição, retira-se o conjunto da chapa, o qual é deixado ao ar livre para que a água esfrie naturalmente;
- ✓ Registro da massa saturada do corpo-de-prova imerso em água através de uma balança hidrostática;
- ✓ Secagem do corpo-de-prova com o auxílio de um pano úmido e registro da sua massa saturada.

Os resultados obtidos neste ensaio permitem determinar:

- Massa específica da amostra seca ( $\rho_s$ )

$$\rho_s = \frac{m_s}{m_{sat} - m_i} \quad (3.8)$$

onde:

$m_s$  = massa da amostra seca em estufa (g)

$m_{sat}$  = massa da amostra saturada em água após fervura e imersão (g)

$m_i$  = massa da amostra saturada imersa em água após fervura (g)

- Massa específica da amostra saturada ( $\rho_{sat}$ )

$$\rho_{sat} = \frac{m_{sat}}{m_{sat} - m_i} \quad (3.9)$$

- Massa específica real ( $\rho_{real}$ )

$$\rho_{real} = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (3.10)$$

➤ Absorção ( $A$ )

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} 100 \quad (3.11)$$

➤ Índice de vazios ( $I_v$ )

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} 100 \quad (3.12)$$



Figura 3.22 – Ensaio de absorção total.

#### 3.3.5.4 - Retração

O ensaio foi feito de acordo a NBR 15261:2005 com a finalidade de se avaliar a retração das argamassas de revestimento através da medição da variação da dimensão linear e da massa dos corpos-de-prova decorrentes da perda de água por evaporação e por reações de hidratação dos aglomerantes. As etapas para execução deste ensaio são descritas a seguir:

- ✓ Após a desforma dos corpos-de-prova, faz-se a identificação dos mesmos a fim de que eles possam ser colocados sempre na mesma posição no aparelho de medida;
- ✓ Realização da leitura inicial dos comprimentos dos corpos-de-prova;
- ✓ Determinação da massa inicial dos corpos-de-prova;

- ✓ Introdução dos corpos-de-prova novamente na câmara seca;
- ✓ Repetição dessa operação diariamente até o 28º dia a contar da leitura inicial.

Para determinação da contração ou expansão linear, deve-se inserir os valores das leituras obtidas nos ensaios na equação abaixo:

$$\varepsilon_i = \frac{L_i - L_0}{0,25} \quad (3.13)$$

onde:

$\varepsilon_i$  = variação dimensional na idade “i” (mm/m)

$L_i$  = leitura efetuada na idade final (mm)

$L_0$  = leitura inicial efetuada logo após a desforma (mm)

$i$  = idade de leitura (dias)

Já a determinação da variação de massa é feita através da Equação abaixo:

$$\Delta m_i = \frac{m_i - m_0}{m_0} 100 \quad (3.14)$$

onde:

$\Delta m_i$  = variação de massa na idade “i” (%)

$m_i$  = massa na idade final (g)

$m_0$  = massa após a desforma (mm)



Figura 3.23 – Ensaio de retração.

### 3.3.5.5 - Resistência potencial de aderência à tração

A resistência de aderência à tração das argamassas de revestimento corresponde à tensão máxima suportada por um corpo-de-prova, na interface em avaliação, quando submetido a um esforço normal de tração. A rotina deste ensaio foi realizada de acordo com os procedimentos descritos na NBR 15258:2005, a saber:

- ✓ Após 25 dias de cura em condições laboratoriais, executa-se, com o auxílio de uma furadeira com borda diamantada, o corte na argamassa a fim de se delimitar os corpos-de-prova;
- ✓ Limpeza da superfície dos corpos-de-prova;
- ✓ Aplicação de massa plástica na pastilha ou na argamassa;
- ✓ Pressionamento da pastilha sobre o corpo-de-prova de forma a garantir o total espalhamento da massa plástica;
- ✓ Decorridos 3 dias, acopla-se o equipamento de tração à pastilha;
- ✓ Aplicação de uma carga de tração perpendicular ao corpo-de-prova com uma taxa de carregamento constante de aproximadamente  $250 \pm 50$  N/seg até a sua ruptura;
- ✓ Medida das dimensões do o corpo-de-prova com o auxílio de um paquímetro;
- ✓ Registro da forma de ruptura do corpo-de-prova.

Os resultados obtidos são inseridos na equação abaixo para determinação da resistência potencial de aderência à tração:

$$R_i = \frac{P_i}{A_i} \quad (3.15)$$

onde:

$R_i$  = resistência potencial de aderência à tração (MPa)

$P_i$  = carga de ruptura (N)

$A_i$  = área do corpo-de-prova ( $\text{mm}^2$ )

$i$  = n° do corpo-de-prova



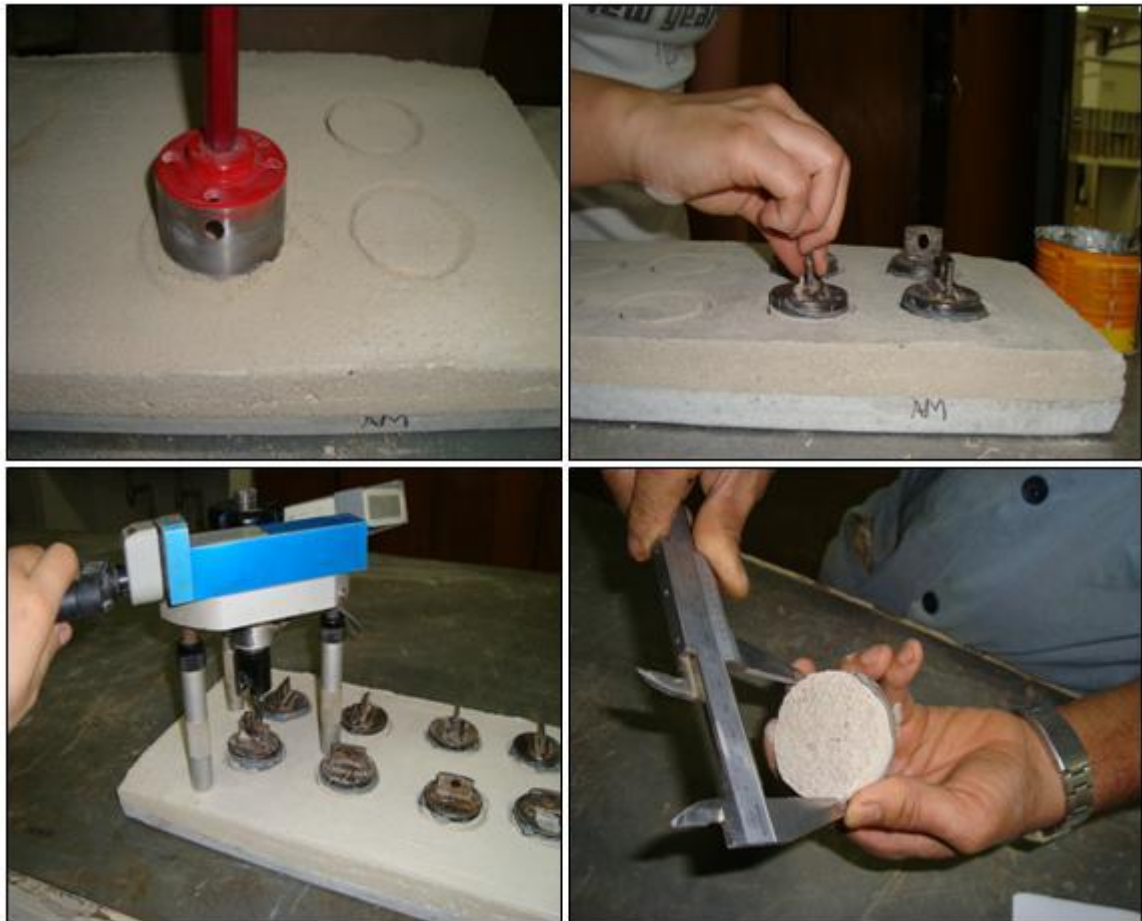


Figura 3.24 – Sequência do ensaio de aderência.

#### 3.3.5.6 - Resistência à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão consiste na aplicação de uma carga centrada sobre o corpo-de-prova bi-apoiado até a sua ruptura por flexão. O ensaio foi feito segundo as recomendações da NBR 13279:2005 nas etapas abaixo:

- ✓ Após 28 dias de cura, faz-se o posicionamento dos corpos-de-prova nos dispositivos da prensa de ensaio, atentando-se para que as suas faces não fiquem em contato com os dispositivos de apoio e nem com a célula de carga;
- ✓ Aplicação de um esforço de tração com uma taxa de carregamento aproximada de  $50 \pm 10$  N/seg até a ruptura do corpo-de-prova.

Os resultados obtidos são inseridos na equação abaixo para determinação da resistência à tração na flexão da argamassa:

$$R_f = \frac{1,5.F_f.L}{40^3} \quad (3.16)$$

onde:

$R_f$  = resistência à tração na flexão (MPa)

$F_f$  = carga aplicada no centro do prisma (N)

$L$  = distância entre os apoios (mm)

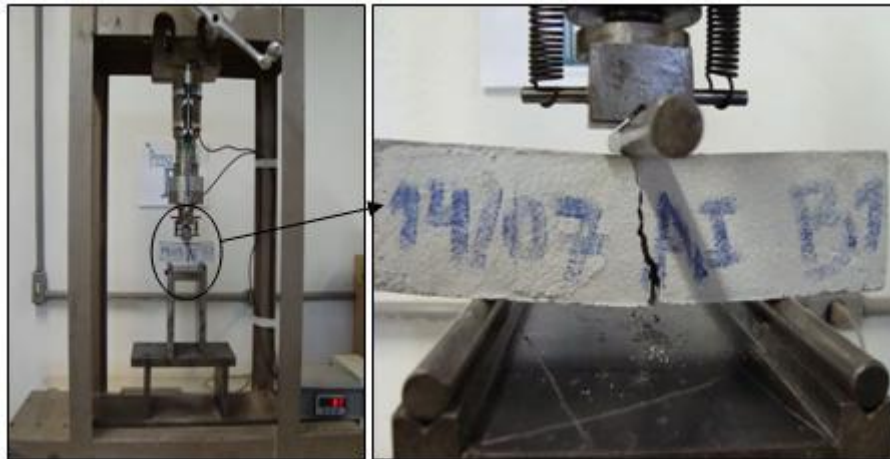


Figura 3.25 – Ensaio de resistência à tração na flexão.

### 3.3.5.7 - Módulo de deformação na flexão

O módulo de deformação das argamassas de revestimento representa a relação entre o nível de tensão aplicado em um corpo-de-prova e a deformação nele provocada por esta tensão. Sendo assim, o ensaio foi realizado de acordo com o procedimento adotado por Bastos (2001), Araújo Jr. (2004), Pereira (2007):

- ✓ Medida do deslocamento vertical (flecha) dos corpos-de-prova prismáticos no ensaio de tração na flexão, no meio do vão entre os apoios, usando extensômetro com precisão de 0,002mm.

A determinação do módulo de deformação é feita através da relação entre a tensão de tração na flexão e a deformação correspondente, sendo calculada pela equação abaixo:

$$E = \frac{Fl^3}{4\delta bd^3} \quad (3.17)$$

onde:

$E$  = módulo de deformação (MPa)

$F$  = força aplicada no meio do vão entre os apoios (N)

$l$  = distância entre os apoios (mm)

$\delta$  = deslocamento no meio do corpo-de-prova (mm)

$b$  = base do corpo-de-prova (mm)

$d$  = espessura do corpo-de-prova (mm)

Para simplificar o cálculo do módulo de deformações das argamassas, emprega-se o Módulo Corda que, de acordo com Metha e Monteiro (1994), é dado por pela declividade da reta traçada entre dois pontos da curva tensão x deformação. Sendo assim, o módulo de deformação das argamassas nos pontos correspondentes a 5% e 30% da carga de ruptura pode ser calculado pela Equação abaixo:

$$E_c = \frac{\sigma_{30} - \sigma_5}{\varepsilon_{30} - \varepsilon_5} \quad (3.18)$$

onde:

$E_c$  = módulo corda (MPa)

$\sigma_{30}$  = tensão de tração na flexão igual a 30% da tensão de ruptura (MPa)

$\sigma_5$  = tensão de tração na flexão igual a 5% da tensão de ruptura (MPa)

$\varepsilon_{30}$  = deformação longitudinal específica de tração no corpo-de-prova na posição mais distante da linha-neutra, no meio do vão entre apoios, correspondente à tensão de tração na flexão igual a 30% da tensão de ruptura (mm/mm)

$\varepsilon_5$  = deformação longitudinal específica de tração no corpo-de-prova na posição mais distante da linha-neutra, no meio do vão entre apoios, correspondente à tensão de tração na flexão igual a 5% da tensão de ruptura (mm/mm)

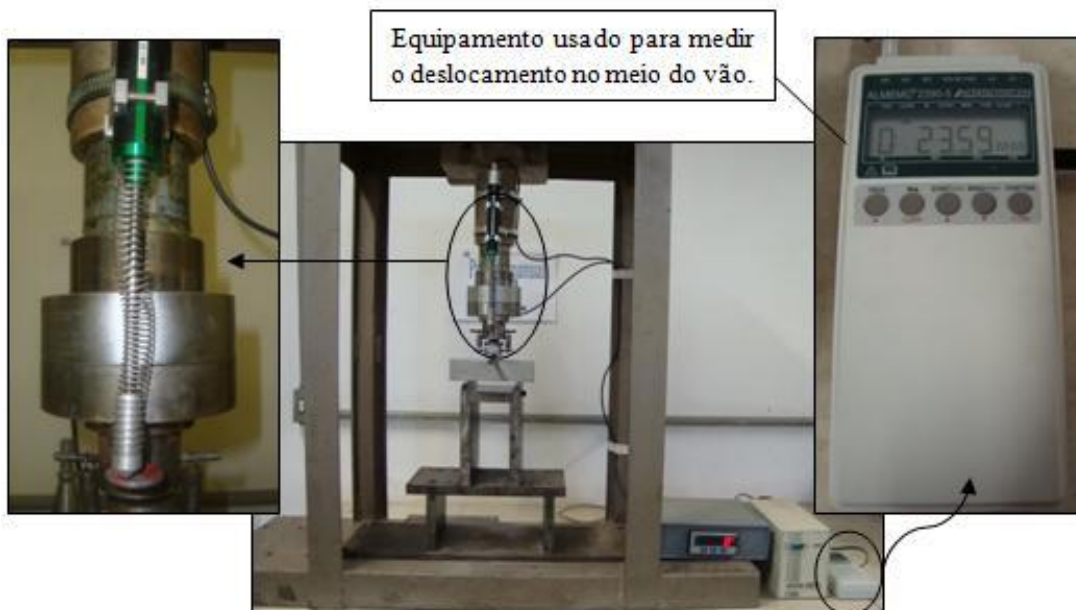


Figura 3.26 – Ensaio de módulo de deformação na flexão.

### 3.3.5.8 - Resistência à compressão

A determinação da resistência à compressão foi feita segundo os procedimentos da NBR 13279:2005, a saber:

- ✓ Após a realização do ensaio de resistência à tração na flexão, posiciona-se metade dos corpos-de-prova no dispositivo de apoio do equipamento de ensaio de forma que as suas faces não fiquem em contato com os dispositivos de apoio e nem com a célula de carga;
- ✓ Aplicação de um esforço de compressão com uma taxa de carregamento aproximada de  $50 \pm 10$  N/seg até a ruptura do corpo-de-prova.

Para determinação da resistência à compressão, os dados obtidos no ensaio são inseridos na equação abaixo:

$$R_c = \frac{F_c}{L^2} \quad (3.19)$$

onde:

$R_c$  = resistência à compressão (MPa)

$F_c$  = carga máxima aplicada (N)

$L^2$  = área da seção quadrada do dispositivo de carga 40mmx40mm (mm<sup>2</sup>)



Figura 3.27 – Ensaio de compressão.

### 3.3.6 - Ensaio de fadiga

Em virtude da carência de pesquisas realizadas no meio técnico nacional na área de fadiga de argamassas de revestimento e da ausência de uma rotina de ensaio normatizada, elaborou-se a metodologia abaixo para avaliar o comportamento das argamassas de revestimento submetidas à fadiga sob compressão.

#### 3.3.6.1 - Estudo piloto

O estudo piloto foi concebido com o objetivo de se definir a geometria dos corpos-de-prova empregados no ensaio de fadiga. Inicialmente foram realizados ensaios exploratórios nos corpos-de-prova (Figura 3.28) de mesmas dimensões usados por Uchôa (2007).



Figura 3.28 – Geometria do corpo-de-prova do ensaio à fadiga sob tração (Uchôa, 2007).

Os corpos-de-prova foram moldados com argamassa industrializada em fôrmas metálicas através do preenchimento de 3 camadas de argamassa com 4cm cada uma, sendo que cada camada era adensada com 25 golpes de soquete metálico.

Uma vez moldados, os corpos-de-prova eram cobertos com placas de vidro que impedem a perda de água por evaporação. Após 24 horas, eles foram desmoldados e armazenados para cura em câmara úmida.

Após 28 dias, os corpos-de-prova eram retirados da câmara e colocados para secagem ao ar livre por um período de 24 horas que antecede a realização do ensaio.

O primeiro teste de fadiga foi feito a uma tensão equivalente a aproximadamente dois terços do limite de resistência à compressão estática, na qual se esperava que a fratura ocorresse sob um número de ciclos muito pequeno. Entretanto, observou-se que no mecanismo adotado, proposto por Uchôa (2007) para ensaio de fadiga sob tração, há grandes dificuldades para se eliminar a excentricidade (ausência de alinhamento) nos ensaios sob compressão, o que poderia falsear os resultados obtidos.



Figura 3.29 – Detalhe da barra para fixação do corpo-de-prova na MTS (Uchôa, 2007)

Partiu-se então para a definição de outra geometria para o corpo-de-prova a ser ensaiado sob fadiga à compressão. Considerando inúmeros estudos na área de resistência à compressão uniaxial de concreto, foi escolhido os corpos-de-prova cilíndricos 10X20cm que são freqüentemente empregados nos ensaios de compressão do concreto (NBR 5739:1994). O desenho esquemático do mecanismo de fixação e do corpo-de-prova pode ser visualizado na Figura 3.30.

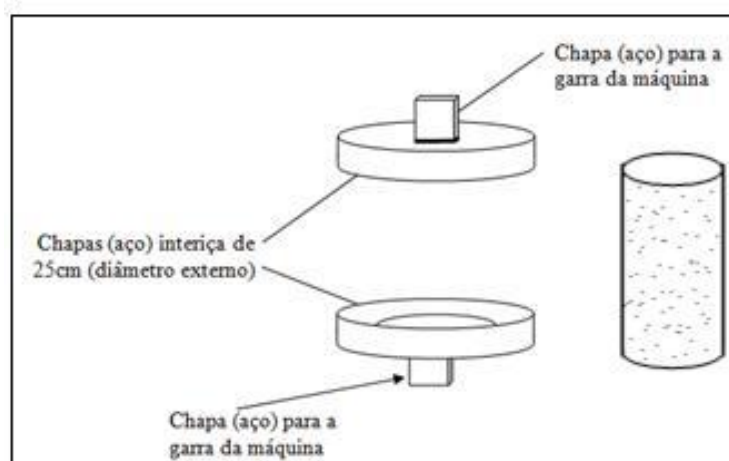


Figura 3.30 – Mecanismo de apoio para o ensaio de corpos-de-prova cilíndricos 10x20cm submetidos à fadiga sob compressão.

Em virtude da limitação da capacidade da máquina de ensaio em 100kN, fez-se a escolha de corpos-de-prova cilíndricos com dimensões 10x20cm em detrimento dos corpos-de-



prova 15x30cm que são empregados no ensaios de resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos (NBR 7222:1994).

### 3.3.6.2 - Processo de moldagem e cura dos corpos-de-prova usados no ensaio de fadiga

Há uma grande preocupação no processo de moldagem dos corpos-de-prova de argamassas, tendo em vista que naturalmente eles apresentam pequenas irregularidades que podem afetar o comportamento à fadiga do elemento ensaiado. Sendo assim, neste trabalho o processo de moldagem foi realizado com base nos procedimentos previstos na NBR 5738:2003 para moldagem de corpos-de-prova cilíndricos de concreto submetidos ao ensaio de resistência à compressão estática, cujas etapas são descritas abaixo:

- ✓ Aplicação de uma fina camada de óleo mineral sobre as faces internas dos moldes cilíndricos;
- ✓ Remistura da argamassa a fim de se garantir a sua uniformidade;
- ✓ Preenchimento com argamassa do molde cilíndrico em duas camadas de volume aproximadamente igual, sendo que na última camada deve-se colocar uma quantidade em excesso para que ao ser adensada a argamassa preencha todo o volume do molde;
- ✓ Adensamento manual com a aplicação de 12 golpes em cada camada de modo a se garantir um corpo-de-prova relativamente homogêneo; durante o adensamento, deve-se atentar para que a primeira camada seja atravessada em toda a sua espessura, evitando-se golpear a base do molde, já na segunda camada a haste deve atravessar aproximadamente 20mm da camada anterior.

Uma vez moldados em fôrmas metálicas, os corpos-de-prova foram cobertos com placas de vidro que impediam a perda de água, sendo mantidos nas condições do laboratório (temperatura =  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$  e umidade =  $60\pm 5\%$ ).

Após esta cura inicial em que eram mantidos 48 horas nos moldes, os corpos-de-prova foram desmoldados, identificados e armazenados em câmara úmida por um período de aproximadamente 6 meses.



Aproximadamente 48 horas antes da realização dos ensaios de fadiga, os corpos-de-prova eram retirados da câmara úmida para secagem à temperatura ambiente. Nesse período, as faces dos corpos-de-prova eram torneadas em uma retificadora mecânica a fim de se garantir uma superfície plana e alinhada (Figura 3.31 ).



Figura 3.31 – Processo de retificação dos corpos-de-prova usados no ensaio de fadiga.

### 3.3.6.3 – Rotina do ensaio de fadiga

Os ensaios de fadiga foram realizados com o objetivo de se determinar a vida à fadiga ( $N_f$ ) e a resistência à fadiga ( $\sigma_{Rf}$ ) das argamassas quando submetidas a carregamentos cíclicos. Dessa maneira, foi possível traçar a curva S-N das argamassas e avaliar a sua ruptura a partir da curva de Coulomb-Mohr.

O ensaio foi realizado em uma máquina do tipo MTS 810 com célula de carga com capacidade de 100kN. Os corpos-de-prova foram ensaiados com carregamento de compressão pura, sendo feito controle de força (tensão alternada e amplitude constante) ao longo do teste. Estabeleceu-se que a frequência de carregamento seria equivalente a 4Hz em virtude dos níveis de tensão empregados serem relativamente elevados. Seguiu-se os procedimentos de ensaiar pelo menos 3 corpos-de-prova para cada nível de tensão (pois desta forma, com 3 ensaios, pode-se detectar um valor médio e qualquer anomalia) tanto na argamassa mista como na argamassa industrializada.

As principais etapas desse ensaio foram:

- ✓ Acionar a bomba da máquina e o atuador hidráulico através de um programa de computador que controla a máquina de ensaio;
- ✓ Fixar os dispositivos de apoio nas garras da máquina, verificando o seu alinhamento na máquina de ensaio a fim de não provocar tensões de cisalhamento desnecessárias provocadas por possíveis desalinhamentos das garras da máquina;
- ✓ Colocar o corpo-de-prova no dispositivo de apoio do ensaio e protegê-lo a fim de que durante a sua ruptura não caia detritos na superfície da máquina, danificando-a;
- ✓ Inserir os parâmetros do ensaio, conforme exemplo mostrado na Figura 3.32.

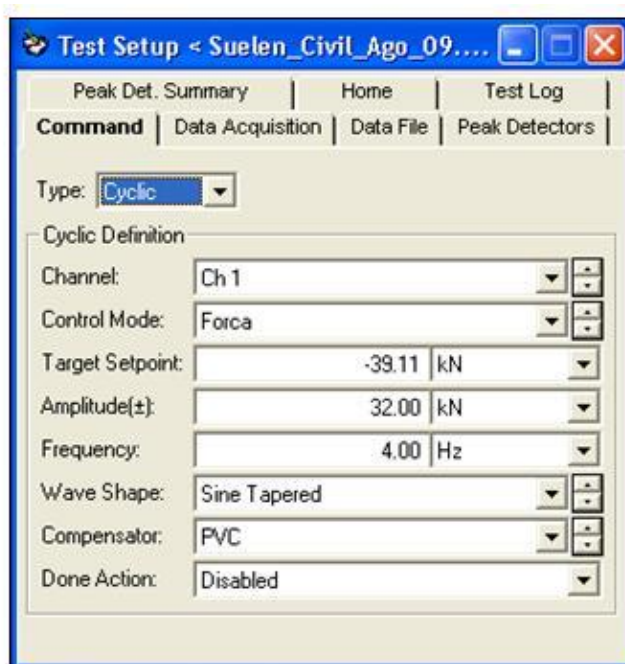


Figura 3.32 – Tela do programa para inserção dos parâmetros do ensaio de fadiga.

Na Figura 3.32, percebe-se um ensaio com as seguintes características:

- Tipo de carregamento = Cíclico
- Canal = 1
- Modo de controle = Força
- Target setpoint = -39,11 kN que corresponde a uma tensão de 8,15MPa
- Amplitude = 32kN
- Frequência do carregamento = 4Hz
- Curva semi-senoidal
- A título figurativo usou-se PVC para material frágil

Os limites dos detectores são:

- $0,50\text{mm} < \text{Deslocamento} < -5,00\text{ mm}$
- $-5,00\text{kN} < \text{Força} < 70\text{kN}$
- Extensômetros = desabilitado

Com os parâmetros ilustrados na Figura 3.32, parte-se para a realização do ensaio ilustrado na Figura 3.33, cujos resultados são mostrados no capítulo 4.



Figura 3.33 – Ensaio de fadiga.

A Figura 3.33 mostra o rompimento do corpo-de-prova de argamassa industrializada rompido com 402.267 ciclos conforme pode ser visualizado na Figura 3.34.

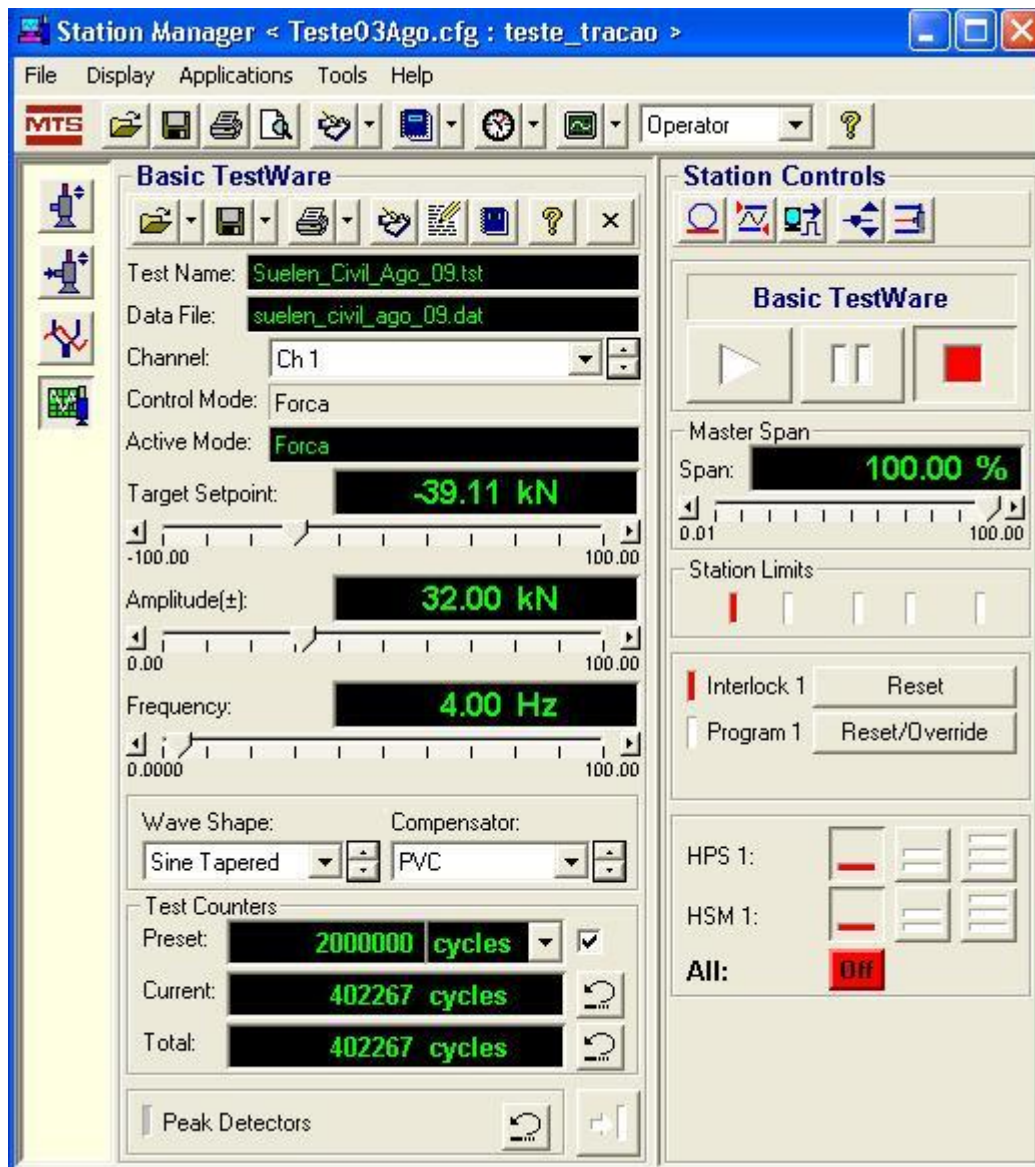


Figura 3.34 – Tela do programa após a realização do ensaio.

## **4- APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

Neste capítulo são apresentados os diversos resultados obtidos nos ensaios estáticos e cíclicos realizados no programa experimental, objeto principal desta dissertação de mestrado, acompanhando estes resultados segue-se uma discussão dos mesmos. Alguns valores aqui apresentados correspondem aos valores médios, cujos valores pontuais são listados no apêndice desta dissertação. Um exemplo disso são os parâmetros para a caracterização das argamassas aqui apresentados com valores médios dos resultados dos ensaios realizados nas argamassas mistas e industrializadas durante o programa experimental.

Desta forma, inicialmente é apresentada a caracterização da argamassa no estado fresco e no estado endurecido, o que possibilita a sua classificação segundo a NBR 13281:2005, cujas propriedades de interesse estão na Tabela 4.3. Em seguida, são mostrados os resultados dos ensaios de argamassas submetidas à fadiga sob compressão.

Nota-se mais uma vez que a tarefa primordial deste trabalho é o conhecimento do comportamento das argamassas de revestimento sob fadiga à compressão. Sendo assim, inicialmente, estudou-se as argamassas industrializadas sob carregamento cíclico de compressão, a fim de complementar os resultados dos ensaios do mesmo tipo de argamassa sob carregamento cíclico de tração levado à estudo por Uchôa (2007).

Deste modo, as hipóteses admitidas por Uchôa (2007) podem ser comparadas com os dados experimentais aqui obtidos. Recordar-se que as hipóteses admitidas pelo referido autor referem-se ao comportamento da argamassa industrializada sob compressão, comportamento este induzido a partir de resultados observados de tal argamassa sob fadiga cíclica à tração.

Posteriormente, foi levantado o comportamento das argamassas mistas sob carregamento cíclico de compressão, sendo que nos estados de tensão sob tração foram admitidas as hipóteses de Uchôa, ou seja, o comportamento sob tração foi induzido a partir dos resultados desta argamassa sob fadiga sob compressão.

A comparação entre os valores experimentais e os valores hipotetizados por Uchôa (2007) poderão ser visualizados através de tabelas, bem como por curvas de ruptura das argamassas de revestimento sob fadiga, admitindo-se o comportamento de materiais frágeis conforme o modelo clássico de Coulomb-Mohr (detalhado no capítulo 3).

#### 4.1 – CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS

Os resultados obtidos nos ensaios de caracterização das argamassas podem ser, preliminarmente, divididas em propriedades relativas ao estado fresco e ao estado endurecido das argamassas aqui estudadas – tais propriedades foram comentadas sucintamente no capítulo 2 e são a seguir apresentadas.

A Tabela 4.1 elenca os resultados da caracterização das argamassas no estado fresco no que diz respeito à sua consistência, densidade de massa, retenção de água e teor de ar incorporado.

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de caracterização das argamassas no estado fresco.

PROPRIEDADES	RESULTADOS MÉDIOS	
	AM	AI
Consistência por penetração de cone (mm)	61,7	58,3
Consistência por mesa de consistência (mm)	290	247
Densidade de massa (kg/m <sup>3</sup> )	1.723	1.474
Retenção de água (%)	78	85
Resistência ao cisalhamento por Vane Test (kPa)	1,32	1,18
Teor de ar incorporado - método pressométrico (%)	6,7	18,0

AM-Argamassa mista; AI-Argamassa industrializada

Observa-se que as duas argamassas apresentaram, para uma mesma faixa de consistência, propriedades no estado fresco diferenciadas. Tais diferenças são mais visíveis nos parâmetros relacionados ao teor de ar incorporado que refletem diretamente na sua

densidade de massa, notando-se claramente a influência dos aditivos incorporadores de ar nas argamassas industrializadas.

Outra diferença visível entre as duas argamassas diz respeito à consistência determinada pela mesa de espalhamento. Segundo Bauer *et al.* (2005), a estruturação interna da argamassa industrializada decorrente da incorporação de ar, gera uma condição suficiente para ela absorver os impactos sofridos durante o ensaio da mesa de consistência. Tal estruturação não é visível nas argamassas mistas, prevalecendo o contato íntimo (baixo teor de ar incorporado) entre as partículas, o que acaba favorecendo o espalhamento desta argamassa durante o ensaio.

Ainda de acordo com os mesmos autores, as diferenças nos valores do ensaio de mesa de consistência também podem ser justificadas pela influência dos parâmetros reológicos, tais como a resistência ao cisalhamento e a viscosidade, entretanto, é difícil caracterizar a influência de cada um destes parâmetros, haja vista que as argamassas ensaiadas apresentam propriedades bastante diferentes.

Em relação à retenção de água, a Figura 4.1 representa o perfil do percentual de água retida pelas argamassas de revestimento em relação aos seus respectivos teores total de água utilizado.

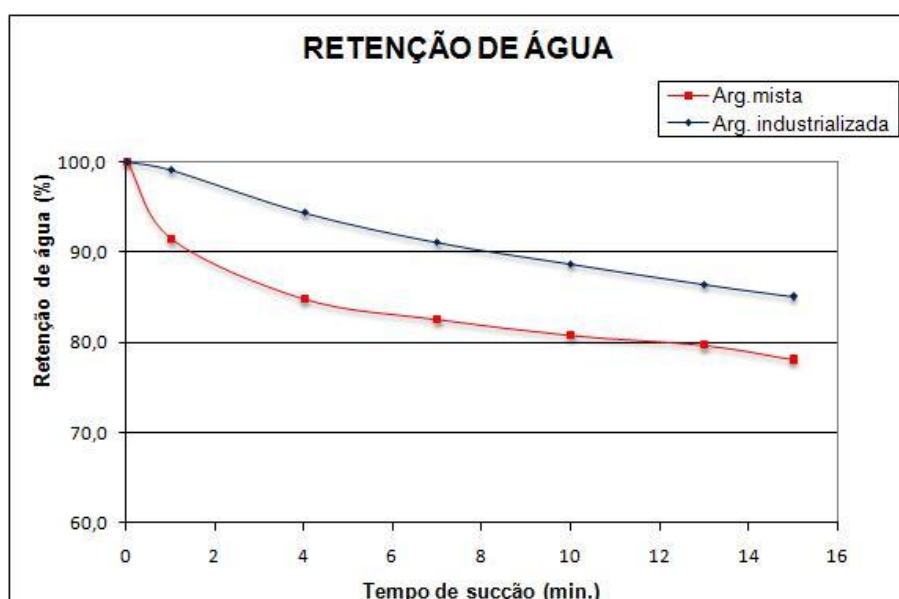


Figura 4.1 – Curvas de retenção de água das argamassas.

Na Figura 4.1 observa-se através das curvas traçadas que, embora tenham valores médios de retenção de água levemente diferenciados (Tabela 4.1), as duas argamassas apresentam comportamentos paralelos em relação à retenção de água.

A Tabela 4.2 mostra os resultados da caracterização das argamassas aos 28 dias no estado endurecido em relação à sua absorção de água, densidade de massa, resistências mecânicas, retração e módulo de deformação.

Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de caracterização aos 28 dias das argamassa no estado endurecido.

PROPRIEDADES	RESULTADOS MÉDIOS	
	AM	AI
Absorção (%)	17,27	33,87
Índice de vazios (%)	29,77	48,15
Coefficiente de capilaridade (g/dm <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup> )	2,0	1,6
Densidade de massa aparente (kg/m <sup>3</sup> )	1.646	1.424
Resistência à tração na flexão (MPa)	1,8	1,9
Resistência à compressão axial (MPa)	4,9	5,1
Resistência potencial de aderência à tração (MPa)	0,26	0,18
Varição dimensional (mm/m)	-0,60	-0,74
Varição de massa (%)	-7,36	-6,76
Módulo de elasticidade na flexão (GPa)	0,71	0,56

AM-Argamassa mista; AI-Argamassa industrializada

Comparando os resultados encontrados entre as argamassas mistas e as argamassas industrializadas, observa-se que os valores são bastante assemelhados, entretanto, os valores de absorção e índice de vazios foram notadamente diferentes, apresentando valores cerca de 100% a mais de uma para a outra.

No ponto de vista do comportamento mecânico, as duas argamassas apresentaram comportamentos bastante semelhantes, entretanto, nos ensaios de fadiga, as argamassas apresentaram resistências bastante diferentes conforme pode ser comprovado nas Tabelas 4.5 e 4.6.

Quanto à variação dimensional linear, nota-se na Tabela 4.2 que a argamassa mista apresentou 0,60mm/m, enquanto que a argamassa industrializada apresentou 0,74mm/m,



ou seja, a argamassa mista apresentou retração dimensional menor que a argamassa industrializada. Em relação à variação de massa, constatou-se um comportamento inverso, as argamassas mistas apresentaram uma diminuição de massa de 7,36% em relação à sua massa inicial ao passo que a argamassa industrializada apresentou apenas 6,76%. As Figuras 4.2 e 4.3 ilustram estas variações ao longo dos dias.

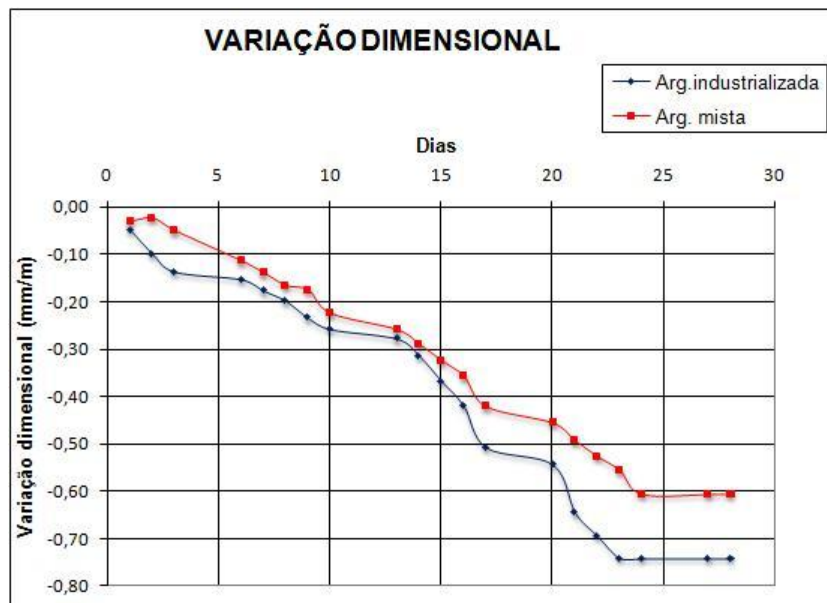


Figura 4.2 – Curva de variação dimensional linear das argamassas.

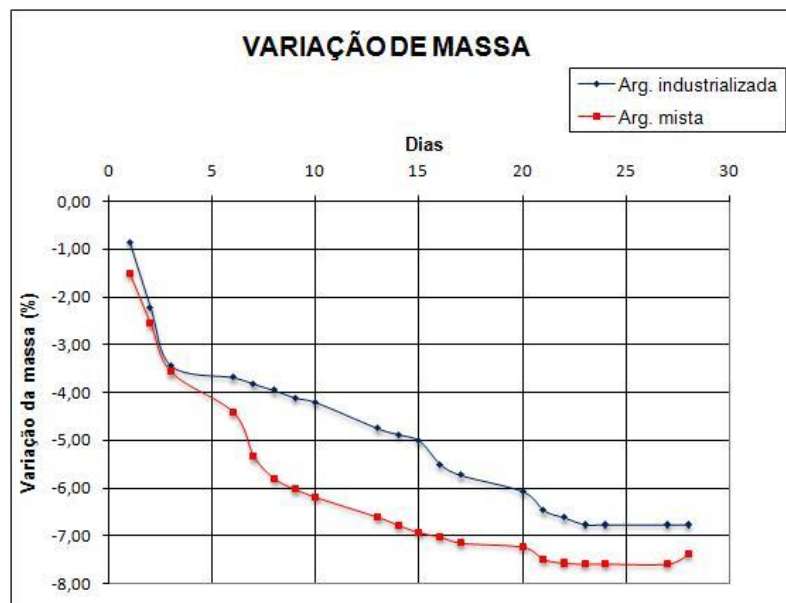


Figura 4.3 – Curva de variação de massa das argamassas.

Nas curvas traçadas, nota-se que as argamassas apresentaram comportamento paralelo ao longo dos dias de maneira que aos 24 dias as curvas tendem a se estabilizar. Na Figura 4.2,

aos 28 dias, é notório que a retração das argamassas mistas foi inferior à das argamassas industrializadas. Ao passo que na Figura 4.3, constata-se que as argamassas industrializadas apresentam menor variação de massa se comparadas com as argamassas mistas.

Como foi discutido no capítulo 2, as argamassas de revestimento precisam apresentar alguns requisitos para desempenharem satisfatoriamente as funções que lhes são esperadas. Na NBR 13281:2005 as argamassas podem ser classificadas a partir do seu enquadramento nos limites de classes em cada característica ensaiada. Isto representa um avanço, tendo em vista que o conjunto de requisitos presentes na referida norma facilita a caracterização e a classificação das argamassas, já que esta norma indica as características a serem ensaiadas, os métodos de ensaio a serem utilizados e os limites dos resultados para cada classe.

No entanto, acredita-se que o conjunto de requisitos usados na referida norma para a caracterização das argamassas ainda é limitado, uma vez que propriedades importantes como a retração, o módulo de elasticidade, dentre outros, ainda não foram incluídas.

A classificação das argamassas ensaiadas aos 28 dias de acordo com a NBR 13281:2005 é mostrada na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Classificação das argamassas ensaiadas aos 28 dias segundo a NBR 13281:2005.

<b>PROPRIEDADES</b>	<b>AM</b>	<b>AI</b>
<b>Densidade de massa no estado fresco</b>	D3	D2
<b>Densidade de massa no estado endurecido</b>	M4	
<b>Coefficiente de capilaridade</b>	C2	
<b>Retenção de água</b>	U1	U2
<b>Resistência potencial de aderência à tração</b>	A2	A1
<b>Resistência à tração na flexão</b>	R2	
<b>Resistência à compressão</b>	P4	

AM-Argamassa mista; AI-Argamassa industrializada

Por fim, cabe ressaltar que como as argamassas de emboço foram ensaiadas sob fadiga após 6 meses de cura em câmara úmida, realizou-se novos ensaios para verificar a sua resistência à tração na flexão e à compressão. Para isso, foram usados corpos-de-prova

prismáticos (4x4x16cm) extraídos dos corpos-de-prova cilíndricos (10x20cm) conforme pode ser visualizado na Figura 4.4.



Figura 4.4 – Processo de obtenção dos corpos-de-prova prismáticos a partir dos corpos-de-prova cilíndricos.

Os resultados desses ensaios estáticos com corpos-de-prova prismáticos podem ser visualizados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Ensaio mecânico das argamassas ensaiadas aos 180 dias.

PROPRIEDADES	RESULTADOS MÉDIOS	
	AM	AI
Resistência à tração na flexão (MPa)	3,2	3,5
Resistência à compressão (MPa)	6,6	7,9

AM-Argamassa mista; AI-Argamassa industrializada

Na Tabela 4.4 observa-se que houve um aumento da resistência mecânica das argamassas quando comparado com os valores de resistências obtidos aos 28 dias mostrados na Tabela 4.2. Além disso, os valores obtidos neste ensaio estático aos 180 dias são diferentes dos valores obtidos nos ensaios estáticos com corpos-de-prova cilíndricos. Esta diferença pode ser atribuída às dimensões dos corpos-de-prova ou ainda pelo simples fato de se tratar de ensaios diferentes. Sendo assim, neste trabalho será admitido que a resistência à compressão de 6,6 MPa para a argamassa mista obtida nos ensaios com corpos-de-prova prismáticos é equivalente à resistência de 8,80MPa encontrada no ensaio com corpos-de-prova cilíndricos 10x20cm. Da mesma forma, tem-se que a resistência à compressão de 7,9 para a argamassa industrializada é equivalente à resistência de 10,18MPa obtida nos ensaios com corpos-de-prova cilíndricos.

## **4.2 – FADIGA DAS ARGAMASSAS DE EMBOÇO**

Os ensaios de fadiga das argamassas de emboço foram realizados com o objetivo de se comparar, de forma ainda bastante incipiente, o comportamento à fadiga entre as argamassas industrializadas e as argamassas mistas. Para tanto, foram traçadas curvas S-N e curvas de ruptura de Coulomb-Mohr, concluindo-se com a apresentação das equações dos planos da curva de ruptura no estado tridimensional.

É importante ressaltar que a avaliação da fadiga nas fachadas é feita a partir da seleção de um transiente térmico através do qual obtém-se a variação de temperatura que, por sua vez, gera diferentes tensões termomecânicas nas camadas que compõe o sistema de revestimento de fachada. Tais tensões quando aplicadas repetidas vezes tendem a provocar ruptura por fadiga do revestimento de fachada.

### **4.2.1 - Obtenção das curvas S-N para as argamassas**

Os primeiros ensaios nas argamassas foram realizados sob carregamento estático de compressão a fim de se balizar a resistência à compressão da argamassa. Estes ensaios, devido a não disponibilidade do Laboratório da Mecânica, foram realizados após um período de aproximadamente 6 meses de cura em câmara úmida. Sendo assim, para a

resistência estática à compressão foram encontrados os valores médios de 10,18 MPa para a argamassa industrializada (AI) e 8,80 MPa para a argamassa mista (AM).

Do ponto de vista da fadiga, estes resultados estáticos correspondem a apenas 1 ciclo de carregamento. Desta forma, tensões menores que estas corresponderão a um número de ciclos maior que a unidade, conforme pode ser observado na Tabela 4.5, definindo-se portanto a Curva S-N.

Cabe ressaltar que os resultados obtidos neste ensaio estático serviram como ponto de partida para a definição dos níveis de tensão usados no ensaio de fadiga. Nota-se que se diminuiu arbitrariamente os níveis de carga entre 5 e 10% para cada ensaio de fadiga conforme pode ser visualizado nas Tabelas 4.5 e 4.6.

Tabela 4.5 – Ensaio de fadiga da argamassa industrializada.

<b>CORPO-DE-PROVA</b>	<b>NÍVEL DE TENSÃO</b>	<b>FORÇA (KN)</b>	<b>TENSÃO (MPA)</b>	<b>NÚMERO DE CICLOS</b>
AI1	100%	80	10,18	1
AI1	95%	76	9,68	33
AI2				42
AI3				24
AI1	90%	72	9,17	435
AI2				414
AI3				387
AI1	80%	64	8,15	394.221
AI2				411.654
AI3				402.267
AI1	70%	56	7,13	1.350.084
AI2				1.318.251
AI3				1.117.398

Tabela 4.6 – Ensaio de fadiga da argamassa mista.

<b>CORPO-DE-PROVA</b>	<b>NÍVEL DE TENSÃO</b>	<b>FORÇA (KN)</b>	<b>TENSÃO (MPA)</b>	<b>NÚMERO DE CICLOS</b>
AM	100%	66	8,40	1
AM1	95%	63	8,02	9
AM2				21
AM3				18
AM1	90%	60	7,64	252
AM2				306
AM3				285
AM1	80%	53	6,75	319.095
AM2				325.662
AM3				287.439
AM1	70%	47	5,98	1.191.729
AM2				1.121.055
AM3				1.158.903

A primeira série de ensaios de fadiga foi feita com um nível de tensão correspondente a 95% da carga de ruptura obtida no ensaio estático, o equivalente a 8,02MPa para a AM e 9,68 para a AI, no qual se observa que nas duas argamassas a fratura ocorre sob um número de ciclos muito pequeno correspondentes a uma média de 33 ciclos para a AI e 16 ciclos para a AM.

Na terceira e quarta série de ensaios de fadiga, buscou-se diminuir gradativamente o nível de tensão para 90% e 80% da carga de ruptura do ensaio estático, notando-se que em ambas as argamassas o número de ciclos para ruptura aumenta consideravelmente.

No nível correspondente a 70% da resistência estática das argamassas, os corpos-de-prova não romperam e o ensaio das argamassas foi interrompido, tendo em vista que o número de ciclos tinha ultrapassado  $10^6$  ciclos. Como a frequência do ensaio foi de 4 Hz, tem-se que para a AI o ensaio mais demorado foi interrompido com 1.350.084 ciclos ( $>10^6$  ciclos) que corresponde a aproximadamente 94 horas ou 4 dias de ensaio. Enquanto que para a argamassa mista o ensaio mais crítico foi cessado com 1.191.729 ciclos ( $>10^6$  ciclos), o equivalente a 82 horas ou 3,5 dias de ensaio.

Ressalta-se que  $10^6$  ciclos corresponde a  $\frac{10^6 \text{ ciclos}}{365 \text{ dias}} = 2.739 \text{ anos}$  ou aproximadamente 3 séculos de ciclos de tensões termomecânicas produzidas pela variação de temperatura ao longo do dia e da noite entre o máximo e o mínimo de tensão.

Nota-se ainda que tal padrão de ciclo (variação de temperatura ao longo do dia) foi adotado por Uchôa (2007) para avaliar a vida útil das fachadas das edificações de Brasília, o que o autor fez de forma conservadora, pois selecionou o transiente térmico mais severo ocorrido até o ano de 2006 na cidade de Brasília a partir de dados do INMET. Para maiores detalhes de como é feito o cálculo do transiente de temperatura ver a pesquisa do referido autor.

Portanto, o número de limite de  $10^6$  ciclos para as argamassas de revestimento é suficiente para a determinação do limite de fadiga ou resistência de fadiga.

Com o número de ciclos e os níveis de tensão mostrados na Tabelas 4.5 e 4.6, é possível definir a curva S-N das argamassas de revestimento ilustrada na Figura 4.5.

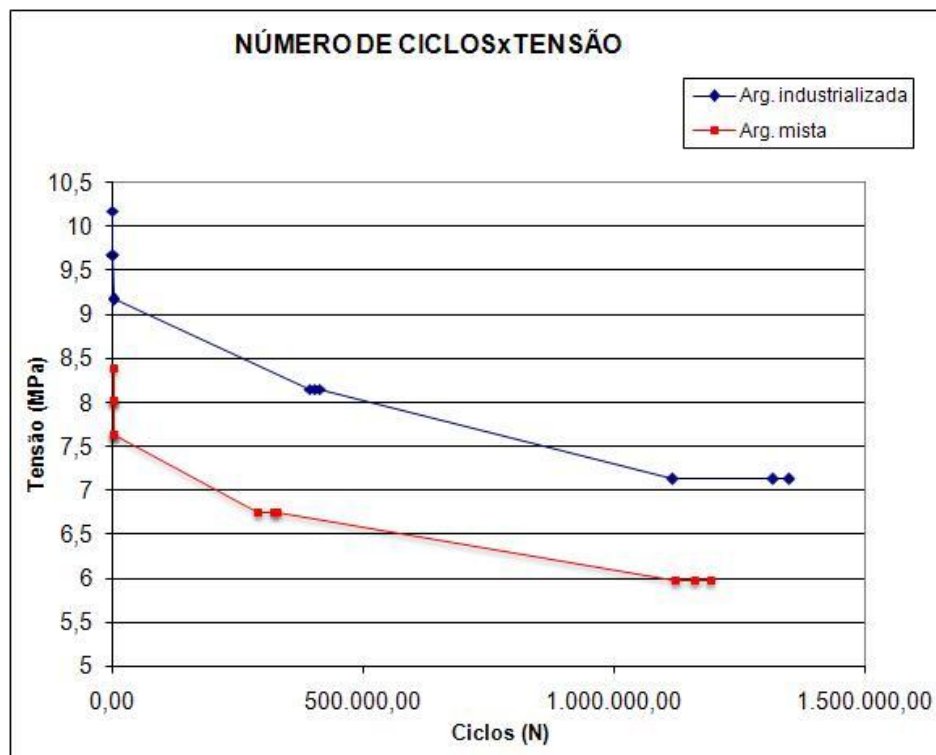


Figura 4.5 – Curva S-N com os pontos obtidos no ensaio à fadiga sob compressão.

A Figura 4.5 mostra que apesar das resistências últimas à compressão das argamassas ensaiadas apresentarem valores diferentes, observa-se que elas apresentam comportamentos semelhantes em relação à fadiga sob compressão. Dessa forma, nota-se que na medida em que se diminui o nível de tensão aplicado, o número de ciclos necessários para a ruptura dos corpos-de-prova de argamassas aumenta, o que confirma a teoria de Wöhler sobre fadiga em materiais.

Como foi visualizado nas Tabelas 4.5 e 4.6, para cada nível de tensão foram ensaiados, no mínimo, três corpos-de-prova em virtude da dispersão dos resultados encontrados decorrentes da variabilidade peculiar dos corpos-de-prova de argamassas. Sendo assim, foi feita a média aritmética do número de ciclos obtidos nos ensaios de fadiga (Tabela 4.7).

Tabela 4.7 – Ciclos médios do ensaio de fadiga das argamassas.

<b>ARGAMASSA INDUSTRIALIZADA</b>		<b>ARGAMASSA MISTA</b>	
<b>MÉDIA CICLOS</b>	<b>TENSÃO (MPA)</b>	<b>MÉDIA CICLOS</b>	<b>TENSÃO (MPA)</b>
1	10,18	1	8,40
33	9,68	16	8,02
412	9,17	281	7,64
402.714	8,15	310.732	6,75
1.261.911	7,13	1.157.229	5,98

Com o número de ciclos médios, é possível traçar a curva S-N mostrada na Figura 4.6.



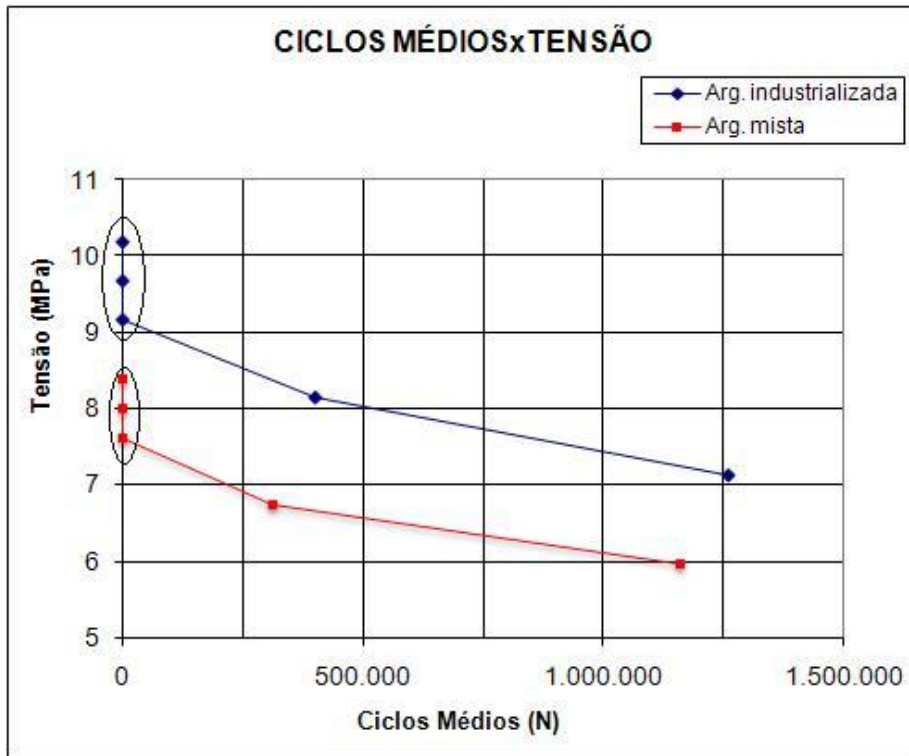


Figura 4.6 – Curva S-N com ciclos médios obtidos no ensaio de fadiga.

Na Curva S-N da Figura 4.6, verifica-se uma possível descontinuidade nos valores de tensão entre 7 e 8 MPa para a AM e 9 e 10 MPa para a AI. Entretanto, esta descontinuidade aparece no gráfico somente em virtude da escala usada conforme pode ser comprovado na Figura 4.7.

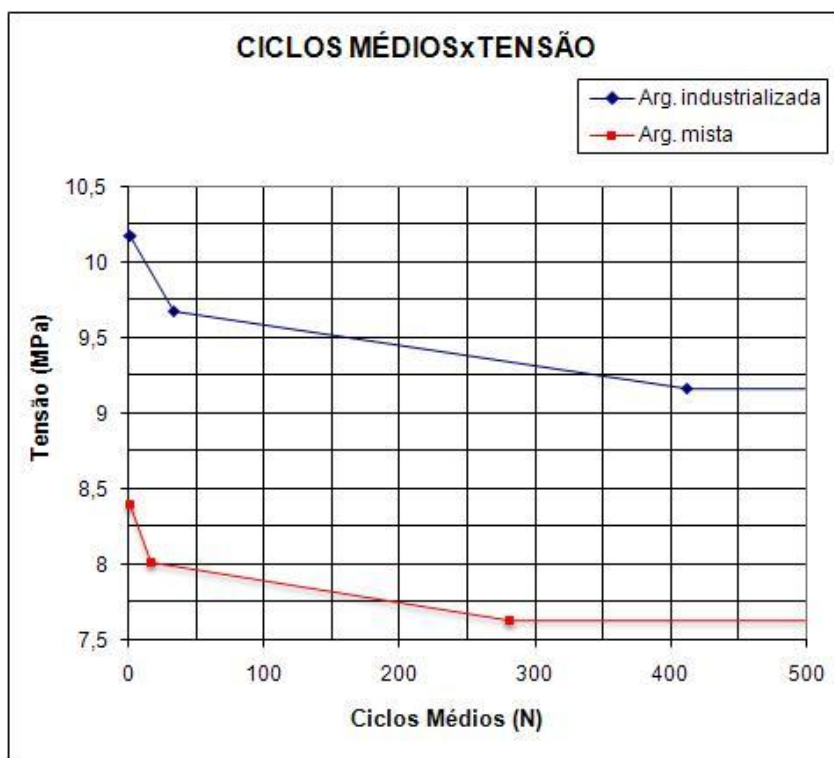


Figura 4.7 – Possível descontinuidade da curva S-N com ciclos médios.

Como foi mostrado no capítulo 2, usualmente a curva S-N é traçada em função de log do número de ciclos *versus* tensão aplicada. Sendo assim, construiu-se a Tabela 4.8 a fim de se traçar uma curva S-N com o número de ciclos (Log) *versus* tensão alternada em MPa conforme ilustrada na Figura 4.8.

Tabela 4.8 – Pontos da curva S-N linearizada para compressão.

ARGAMASSA INDUSTRIALIZADA			ARGAMASSA MISTA		
MÉDIA CICLOS	LOG (N)	TENSÃO (MPA)	MÉDIA CICLOS	LOG (N)	TENSÃO (MPA)
1	0,00	10,18	1	0,00	8,40
33	1,52	9,68	16	1,20	8,02
412	2,61	9,17	281	2,45	7,64
402.714	5,60	8,15	310.732	5,49	6,75
1.261.911	6,10	7,13	1.157.229	6,06	5,98
100.000.000	8,00	7,13	100.000.000	8,00	5,98

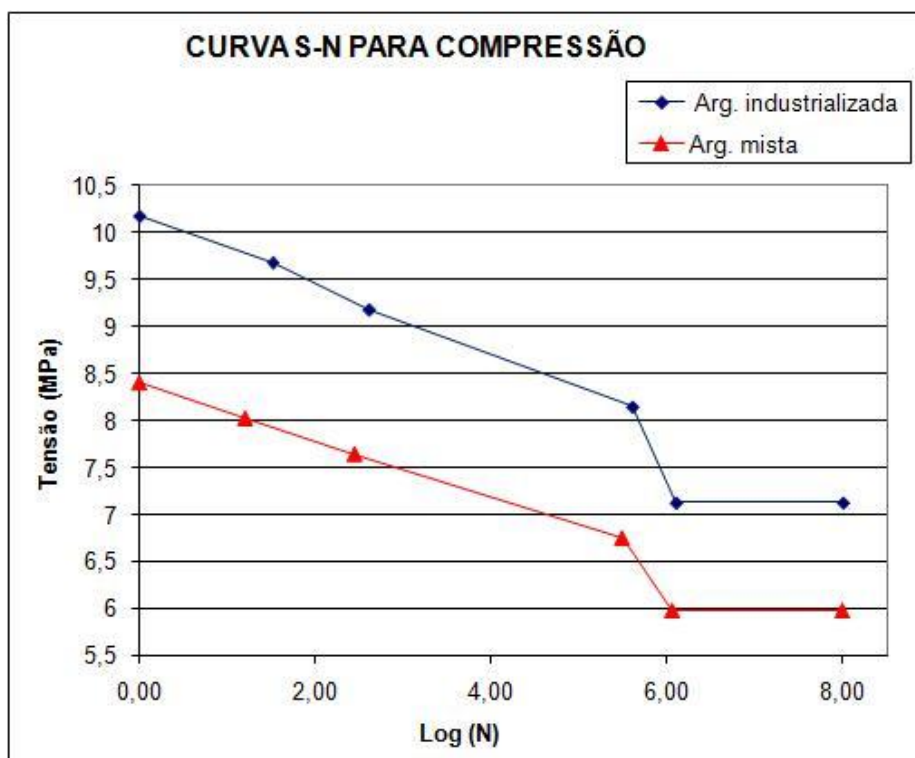


Figura 4.8 – Curva S-N das argamassas de emboço sob compressão.

Na figura 4.8 observa-se uma pequena dispersão dos pontos da curva S-N, a qual pode ser linearizada aplicando-se uma linha de tendência nas curvas semilog das argamassas mista e industrializada (Figura 4.9).

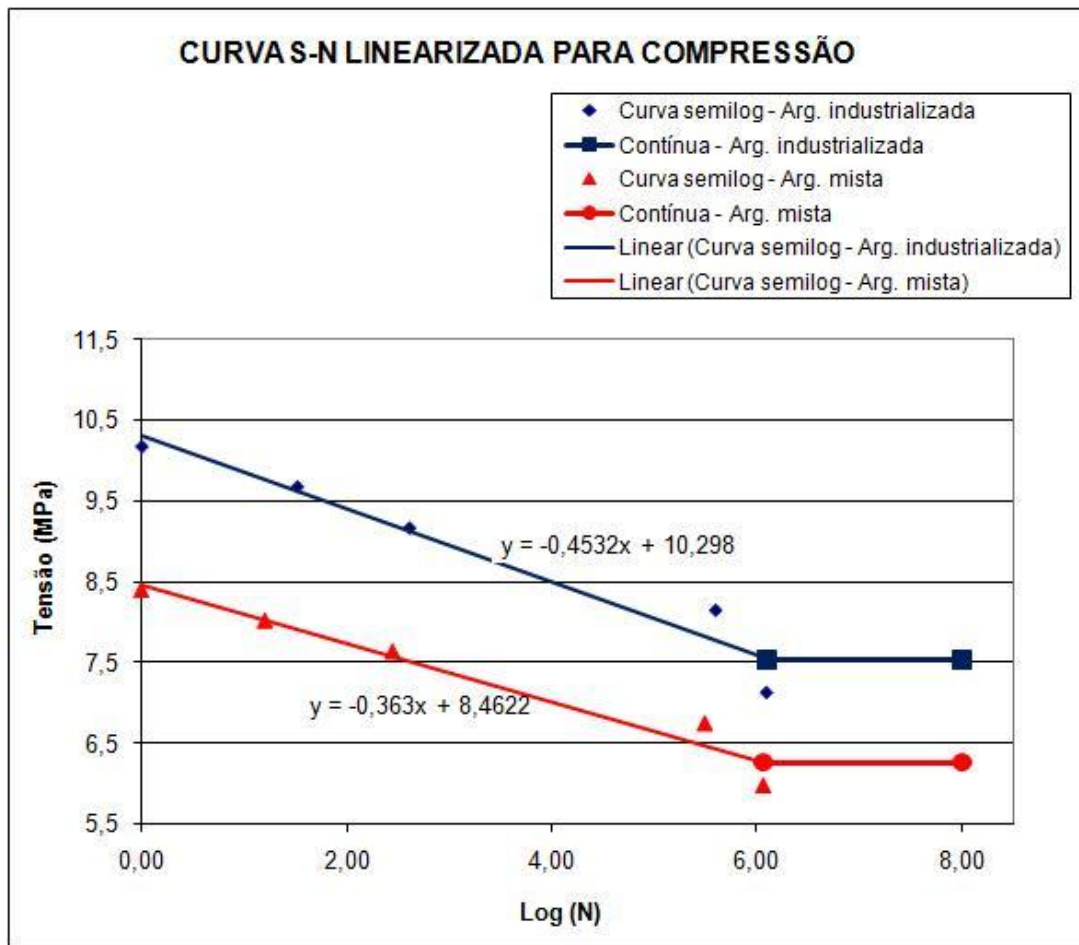


Figura 4.9 – Curva S-N linearizada das argamassas de emboço sob compressão.

Observa-se que com a linha de tendência, obteve-se as seguintes equações:

- ✓ Para a argamassa industrializada:

$$N < 10^6 \rightarrow y = -0,4532x + 10,298 \quad (4.1)$$

$$N > 10^6 \rightarrow y = 7,13 \quad (4.2)$$

- ✓ Para a argamassa mista:

$$N < 10^6 \rightarrow y = -0,363x + 8,4622 \quad (4.3)$$

$$N > 10^6 \rightarrow y = 5,98 \quad (4.4)$$

Como  $y$  é a variação de tensão  $S$  (MPa) em cada ciclo e  $x$  é a função log do número de ciclos, seguindo os procedimentos de Tepfers e Kutti (1979), Cervo (2004) e Uchôa

(2007), deduz-se as seguintes equações para as argamassas de revestimentos submetidas à fadiga sob compressão:

✓ Para a argamassa industrializada:

$$N < 10^6 \rightarrow S = 10,298 - 0,453 \log(N) \quad (4.5)$$

$$N > 10^6 \rightarrow S = 7,13 \quad (4.6)$$

✓ Para a argamassa mista:

$$N < 10^6 \rightarrow S = 8,462 - 0,363 \log(N) \quad (4.7)$$

$$N > 10^6 \rightarrow S = 5,98 \quad (4.8)$$

Dividindo-se as Equações acima pelos respectivos valores de resistência estática ( $f_c$ ) das argamassas industrializadas e das argamassas mistas, obtém-se as equações gerais para o estudo da fadiga das argamassas de revestimento:

✓ Para a argamassa industrializada:

$$N < 10^6 \rightarrow \frac{S}{f_{cI}} = 1,012 - 0,044 \log(N) \quad (4.9)$$

$$N > 10^6 \rightarrow \frac{S}{f_{cI}} = 0,70 \quad (4.10)$$

✓ Para a argamassa mista:

$$N < 10^6 \rightarrow \frac{S}{f_{cM}} = 1,007 - 0,043 \log(N) \quad (4.11)$$

$$N > 10^6 \rightarrow \frac{S}{f_{cM}} = 0,71 \quad (4.12)$$

Estas equações são aplicáveis quando  $R=0$ , ou seja, quando a relação entre a tensão mínima e a tensão máxima é nula.

Já para  $R \neq 0$ , conforme proposto por Cervo (2004) e Tepfers e Kutti (1979), tem-se as seguintes equações para a análise da fadiga de argamassas de revestimento:

✓ Para a argamassa industrializada:

$$N < 10^6 \rightarrow \frac{S}{f_{cI}} = 1,012 - 0,044(1 - R) \log(N) \quad (4.13)$$

$$N > 10^6 \rightarrow \frac{S}{f_{cI}} = 0,70 \quad (4.14)$$

✓ Para a argamassa mista:

$$N < 10^6 \rightarrow \frac{S}{f_{cM}} = 1,007 - 0,043(1 - R) \log(N) \quad (4.15)$$

$$N > 10^6 \rightarrow \frac{S}{f_{cM}} = 0,71 \quad (4.16)$$

Substituindo os valores de log (N) nas Equações acima, obtém-se resultados de tensão mais apurados conforme pode ser visualizado na Tabela 4.9:

Tabela 4.9 – Pontos da curva S-N linearizada para compressão.

ARGAMASSA INDUSTRIALIZADA		ARGAMASSA MISTA	
LOG (N)	TENSÃO-EQUAÇÃO (MPA)	LOG (N)	TENSÃO-EQUAÇÃO (MPA)
0,00	10,30	0,00	8,46
1,52	9,61	1,20	8,03
2,61	9,11	2,45	7,57
5,60	7,76	5,49	6,47
6,10	7,53	6,06	6,26
8,00	7,53	8,00	6,26

Na Tabela 4.9, nota-se que como o ensaio foi interrompido quando o número de ciclos superava  $10^6$ , ou seja,  $\log(N) > 6$ , admite-se neste trabalho que as argamassas industrializadas quando submetidas a uma tensão de compressão de 7,53MPa não se rompem quando sujeitos a um número de ciclos de carregamento abaixo de 1.261.911 ciclos. Com isso, conclui-se que teoricamente quando as argamassas industrializadas são submetidas a uma tensão menor que 7,53MPa, elas suportam um número maior que 1.261.911 de ciclos sem apresentar ruptura, admitindo-se desta maneira que ela tem vida infinita. Desta forma, considera-se que para a argamassa industrializada

ensaiada o limite de resistência à fadiga é de 7,53MPa e a sua resistência última é de 10,30MPa.

Já para a argamassa mista, admite-se que quando elas são solicitadas por uma tensão de 6,26MPa não há ruptura por fadiga para uma quantidade de ciclos abaixo de 1.157.229. Sendo assim, quando estas argamassas estão sujeitas a tensões menores que 6,26MPa, elas resistem teoricamente a uma quantidade de ciclos superiores a 1.157.229 sem apresentar falha por fadiga. Nesse sentido, tem-se que a argamassa mista apresenta limite de resistência à fadiga igual a 6,26MPa, sendo a sua resistência última de 8,46 MPa.

Nas curvas S-N traçadas na Figura 4.9, verifica-se que no nível de tensão correspondente às respectivas resistências à fadiga das argamassas mistas e industrializadas, as curvas tornam-se assíntotas, apresentando um patamar abaixo do qual as argamassas não se rompem, sendo consideradas, portanto, com vida infinita.

Uma vez determinadas as equações e as resistências à fadiga sob compressão das argamassas mistas e industrializadas, parte-se para a comparação dos resultados encontrados neste trabalho com os dados obtidos por Uchôa (2007). A Tabela 4.10 mostra um resumo do comportamento das argamassas industrializadas sujeitas à fadiga sob tração e sob compressão.

Tabela 4.10 – Pontos da curva S-N linearizada da argamassa industrializada para tração e compressão (Uchôa, 2007).

TRAÇÃO				COMPRESSÃO			
MÉDIA CICLOS	LOG (N)	TENSÃO (MPa)	EQUAÇÃO -TENSÃO (MPa)	LOG (N)	MÉDIA CICLOS	TENSÃO (MPa)	EQUAÇÃO -TENSÃO (MPa)
1	0,00	1,64	1,52	0,00	1	4,29	3,96
25	1,39	1,29	1,30	1,39	25	3,37	3,39
216	2,33	1,08	1,15	2,33	216	2,82	3,00
36133	4,56	0,86	0,80	4,56	36.133	2,25	2,09
225.967	5,35	0,65	0,68	5,35	225.967	1,7	1,77
100.000.000	8,00	0,65	0,68	8,00	100.000.000	1,7	1,77

Cabe ressaltar que na pesquisa de Uchôa (2007) foram realizados apenas ensaios de fadiga sob carregamentos cíclicos de tração. Entretanto, admitindo-se o paralelismo entre as

tensões de tração e compressão conforme proposto por Cervo (2004), o autor estendeu os resultados experimentais de tração para a fadiga sob compressão a partir de um coeficiente de proporcionalidade que é dado por

$$\eta = \frac{f_c}{f_t} = \frac{4,29}{1,64} = 2,615 \quad (4.17)$$

onde  $f_t$  é a resistência última da argamassa sob tração e  $f_c$  é a resistência última da argamassa sob compressão.

A Figura 4.10 agrupa as curvas S-N sob tração e sob compressão das argamassas mistas e industrializadas encontradas neste trabalho e na pesquisa de Uchôa (2007).

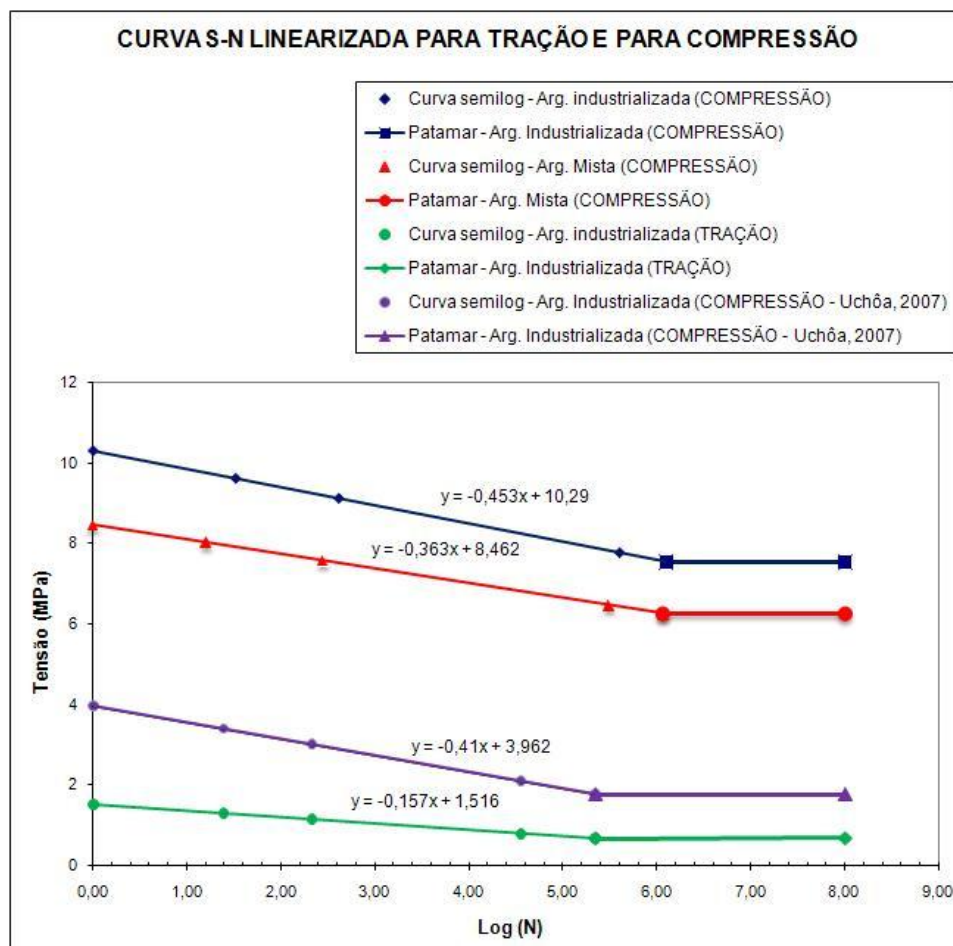


Figura 4.10 – Curva S-N linearizada das argamassas de emboço sob compressão e sob tração.

Na Figura 4.10, comparando as curvas obtidas por Uchôa (2007) e as curvas deste trabalho, observa-se que este autor considerou que os corpos-de-prova não se rompem



abaixo de  $2 \times 10^5$  ciclos. Ao passo que nesta pesquisa admitiu-se que os corpos-de-prova não se rompem abaixo de  $10^6$  ciclos. Além disso, observa-se que há um paralelismo entre as curvas de tração e compressão obtidas pelo referido autor.

#### 4.2.2 – Curva de Coulomb-Mohr para avaliação da fadiga no estado plano

Sabendo-se que há diferença no comportamento das argamassas de revestimento à fadiga sob compressão e sob tração, a seguir são apresentadas 4 casos das curvas de ruptura no estado plano de acordo com a Teoria de Coulomb-Mohr. Estas curvas são expressas em termos das tensões principais que correspondem às tensões de tração e compressão.

**CASO 1:** A Figura 4.11 apresenta a curva de Coulomb-Mohr das argamassas industrializadas com os valores experimentais obtidos neste trabalho dos ensaios de fadiga à compressão e no trabalho de Uchôa (2007) os resultados referentes aos ensaios de fadiga à tração.

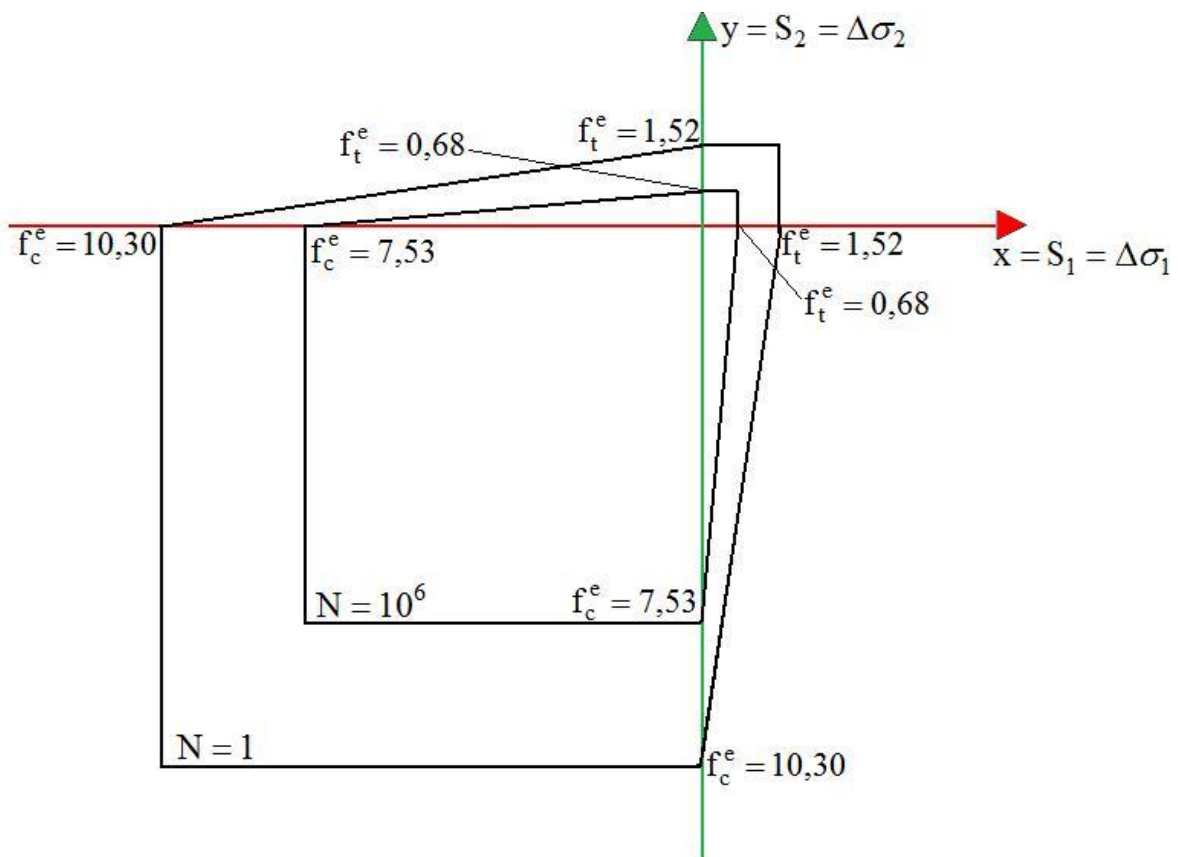


Figura 4.11 – Curva de Coulomb-Mohr das argamassas industrializadas obtida com resultados experimentais de compressão e de tração.

Na Figura 4.11, observa-se que para 1 ciclo de carregamento, a resistência à fadiga sob compressão é de 10,30MPa e a resistência à fadiga sob tração é de 1,52MPa. Ao passo que o aumento no número de ciclos para  $10^6$ , a resistência à fadiga sob compressão diminui para 7,53 MPa e sob tração o valor passa a ser 0,68MPa.

Isso significa que o aumento no número de ciclos, diminui a resistência à fadiga até se chegar a um limite de resistência em que não haverá mais ruptura por fadiga. Assim, infere-se que se um ponto do ensaio de fadiga cair nos limites ou no interior desta segunda curva de resistência, não haverá ruptura por fadiga.

**CASO 2:** A Figura 4.12 ilustra a curva de Coulomb-Mohr no estado plano obtida com os dados do ensaio de fadiga da argamassa industrializada estudada por Uchôa (2007).

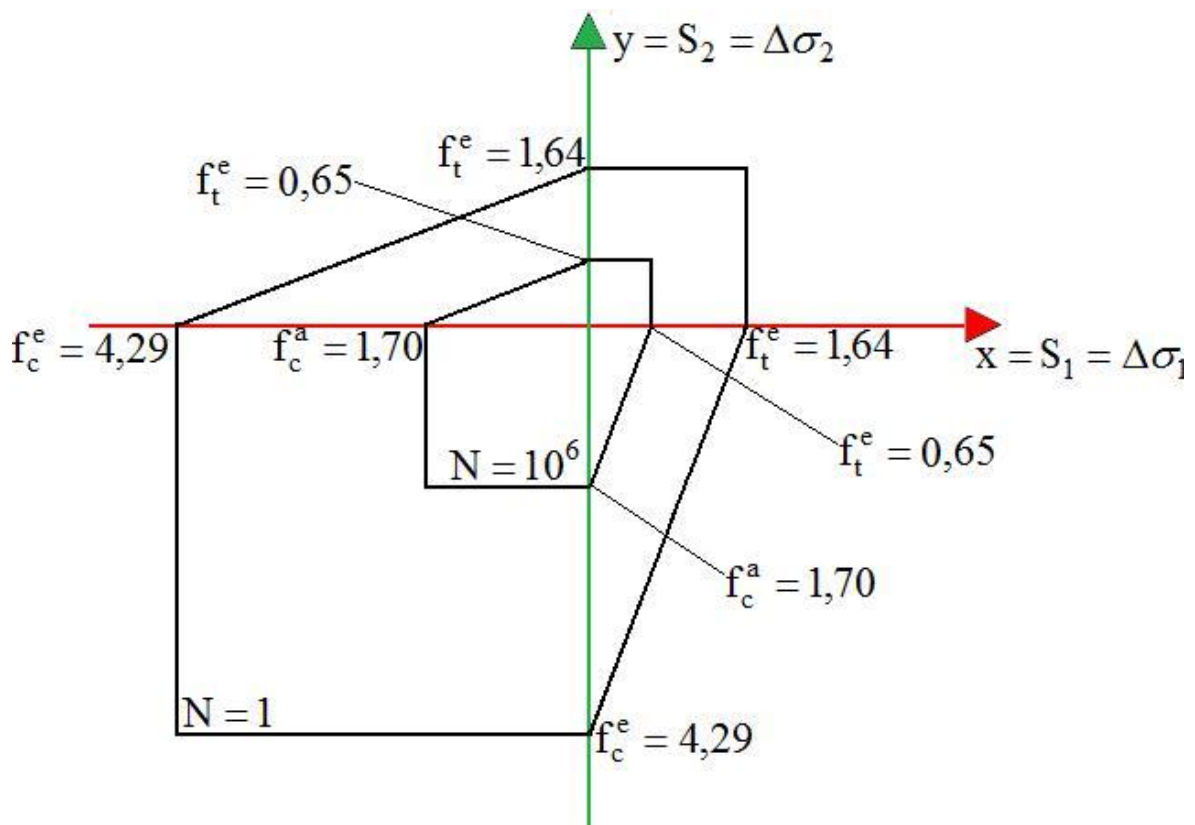


Figura 4.12 – Curva de Coulomb-Mohr da argamassa industrializada estudada por Uchôa (2007).

Na Figura 4.12, verifica-se que os dados das curvas de tração são experimentais, enquanto que os das curvas de compressão são experimentais e avaliados. Com isso, observa-se que

para 1 ciclo de carregamento, a resistência à fadiga sob compressão é de 4,29 MPa e sob tração é de 1,64MPa.

Experimentalmente, determinou-se que para  $10^6$  ciclos, a resistência à fadiga sob tração é de 0,65MPa. Admitindo-se que o coeficiente de proporcionalidade ( $\eta$ ) entre as tensões de tração e compressão é de 2,615, obtém-se a resistência de fadiga sob compressão equivalente a 0,65MPa quando da aplicação de  $10^6$  ciclos.

Além disso, é possível determinar um coeficiente de proporcionalidade entre as resistências à fadiga para 1 ciclo e para  $10^6$  ciclos, conforme pode ser visualizado nas relações abaixo:

$$\kappa = \frac{f_{c(1\text{ ciclo})}}{f_{c(10^6\text{ ciclos})}} = \frac{4,29}{1,70} = 2,523 \quad \text{ou} \quad \kappa = \frac{f_{t(1\text{ ciclo})}}{f_{t(10^6\text{ ciclos})}} = \frac{1,64}{0,65} = 2,523 \quad (4.18)$$

Desta forma, observa-se que o aumento no número de ciclos, diminui a resistência à fadiga até se chegar a um limite de resistência em que não haverá mais ruptura por fadiga. Assim, infere-se que se um ponto do ensaio de fadiga cair nos limites ou no interior desta segunda curva de resistência equivalente a  $10^6$  ciclos, não haverá ruptura por fadiga.

**CASO 3:** A Figura 4.13 mostra a curva de Coulomb-Mohr dos dados experimentais (resistências à tração e à compressão para 1 ciclo de carregamento) do ensaio de fadiga da argamassa mista e dos dados avaliados (resistência à tração e à compressão para  $10^6$  ciclos de carregamento) através do coeficiente ( $\kappa = 2,523$ ) inferido das relações usadas por Uchôa (2007).

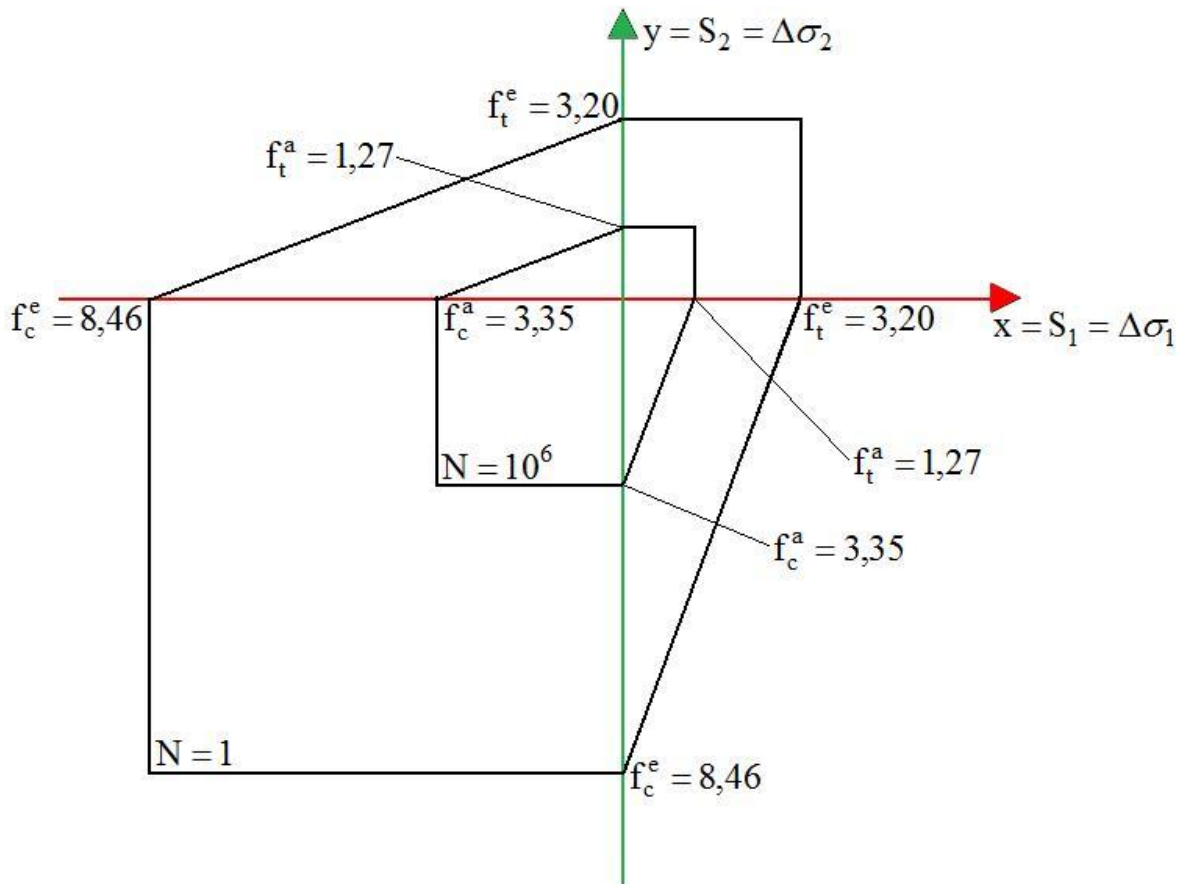


Figura 4.13 – Curva de Coulomb-Mohr das argamassas mistas obtida com resistências experimentais para 1 ciclo e resistências avaliadas para  $10^6$  ciclos.

Na Figura 4.13, percebe-se que os valores das resistências à fadiga para 1 ciclo de carregamento são experimentais, enquanto que os valores das resistências para  $10^6$  ciclos são avaliados. Sendo assim, a resistência à fadiga sob tração é de 3,20MPa e a resistência à compressão é de 8,46MPa quando se aplica apenas 1 ciclo de carregamento.

Para  $10^6$  ciclos de carregamento, aplicando-se o coeficiente de proporcionalidade ( $\kappa$ ) de 2,523 nos valores de resistência à fadiga para 1 ciclo de carregamento, chega-se a uma resistência à fadiga sob compressão de 3,35MPa e sob tração de 1,27MPa.

Observa-se também que a resistência diminui na medida em que se aumenta o número de ciclos, de forma que quando um ponto, cujas coordenadas são as tensões principais, cai nos extremos ou no interior da curva de  $10^6$  ciclos, não há ruptura por fadiga.

**CASO 4:** A Figura 4.14 ilustra a curva de Coulomb-Mohr da argamassa mista obtida com os valores experimentais obtidos nos ensaios de fadiga (resistência à tração e à compressão para 1 ciclo de carregamento; e resistência à compressão para  $10^6$  ciclos de carregamento) e com o valor de resistência à fadiga sob tração para  $10^6$  ciclos avaliado.

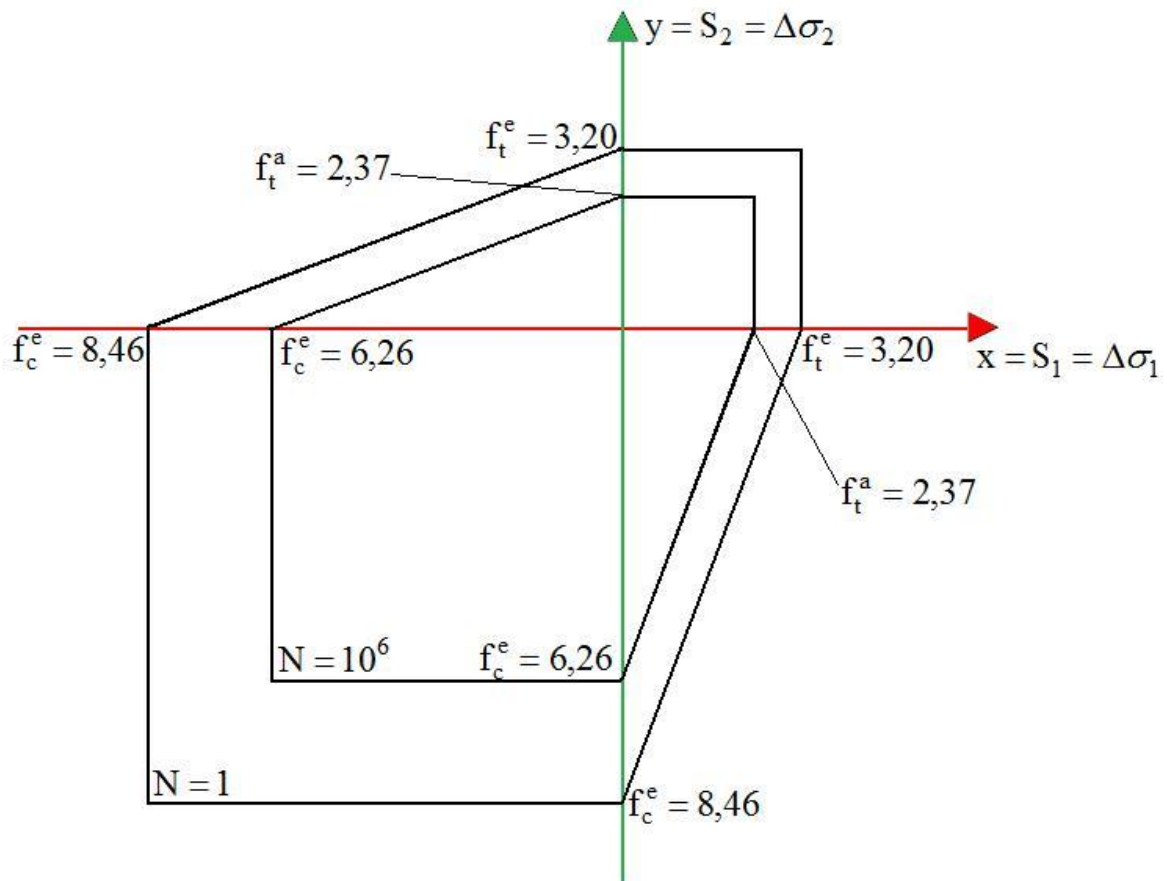


Figura 4.14 – Curva de Coulomb-Mohr das argamassas mistas obtida com resistências experimentais e resistência à tração avaliada para  $10^6$  ciclos.

Na Figura 4.14, nota-se que os resultados das curvas de tração são experimentais e avaliados, ao passo que os valores das curvas de compressão são experimentais. Nesse sentido, para um ciclo de carregamento, a resistência à fadiga das argamassas sob compressão é de 8,46MPa e sob tração é de 3,20MPa.

Para  $10^6$  ciclos de carregamento, determinou-se experimentalmente que a resistência à fadiga sob compressão é de 6,26MPa. Entretanto, para a determinação da resistência à fadiga sob tração das argamassas podem ser consideradas duas hipóteses:

- ✓ Coeficiente de proporcionalidade entre as resistências de fadiga sob compressão:

$$\lambda = \frac{f_{c(1 \text{ ciclo})}}{f_{c(10^6 \text{ ciclos})}} = \frac{8,46}{6,26} = 1,351 \quad (4.19)$$

neste caso, para determinar a resistência à fadiga sob tração divide-se a resistência à fadiga sob tração para 1 ciclo de carregamento pelo coeficiente “ $\lambda$ ”, ou seja,

$$f_{t(10^6 \text{ ciclos})} = \frac{f_{t(1 \text{ ciclo})}}{\lambda} = \frac{3,2}{1,351} = 2,37 \quad (4.20)$$

- ✓ Coeficiente de proporcionalidade entre as resistências últimas de tração e de compressão:

$$\mu = \frac{f_{c(1 \text{ ciclo})}}{f_{t(1 \text{ ciclo})}} = \frac{8,46}{3,20} = 2,64 \quad (4.21)$$

neste caso, para determinar a resistência à fadiga sob tração divide-se a resistência à fadiga sob compressão para  $10^6$  ciclos de carregamento pelo coeficiente “ $\mu$ ”, ou seja,

$$f_{t(10^6 \text{ ciclos})} = \frac{f_{c(10^6 \text{ ciclos})}}{\mu} = \frac{6,26}{2,64} = 2,37 \quad (4.22)$$

Com isso, admite-se que a resistência à fadiga sob tração das argamassas mistas para  $10^6$  ciclos é igual a 2,37MPa.

A fim de se comparar as curvas de Coulomb-Mohr para  $10^6$  ciclos de carregamento, a Figura 4.15 ilustra as curvas dos 4 casos estudados.

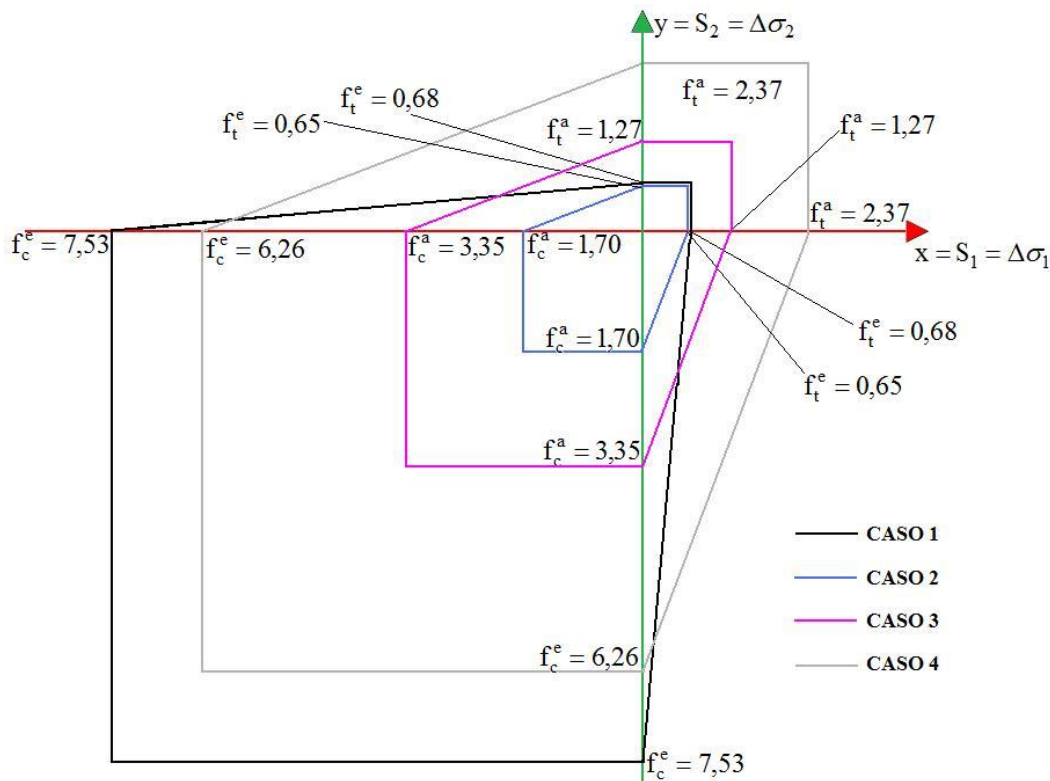


Figura 4.15 – Curva de Coulomb-Mohr das argamassas mistas e industrializadas.

Observa-se nas curvas de ruptura traçadas nos quatro casos que o aumento do número de ciclos de carregamento provocou a diminuição progressiva da resistência à fadiga das argamassas de revestimento, ou seja, as curvas de resistência apresentaram um visível encolhimento quando o número de ciclos passou de 1 (onde a resistência à fadiga da argamassas é igual à sua resistência estática) para 106. Este comportamento se deve ao acúmulo de danos sucessivos na argamassa até um máximo tolerável que uma vez ultrapassado leva à sua ruptura por fadiga, o que confirma a teoria do dano acumulado de Palmgren-Miner.

Além disso, é possível perceber na Figura 4.15 que a curva de ruptura proposta por Uchôa (2007) é bastante conservadora, visto que ela ficou dentro de todas as curvas dos outros casos analisados. Ou seja, o núcleo formado pela curva de ruptura de Uchôa (2007) ficou no interior dos núcleos reais formados pelas outras curvas de ruptura.

Entretanto, cabe ressaltar que mesmo sendo conservadora, a curva de ruptura proposta por Uchôa (2007) é uma opção que pode ser considerada no estudo das argamassas de revestimento sob fadiga.

### **4.2.3 – Curva de Coulomb-Mohr para avaliação da fadiga no estado tridimensional**

A seguir são mostradas as curvas de ruptura de Coulomb-Mohr no estado tridimensional. Inicialmente são definidas as equações gerais dos planos de uma curva de ruptura genérica. Posteriormente, estas equações são particularizadas em 4 casos equivalentes aos casos mostrados nas curvas de ruptura de Coulomb-Mohr no estado plano. Desta forma, será possível definir uma região, para cada caso específico, em que não haverá preocupação com a ruptura por fadiga das argamassas de revestimento mistas e industrializadas.

A Figura 4.16 ilustra a curva de ruptura generalizada, cujas equações dos planos são desenvolvidas logo em seguida.



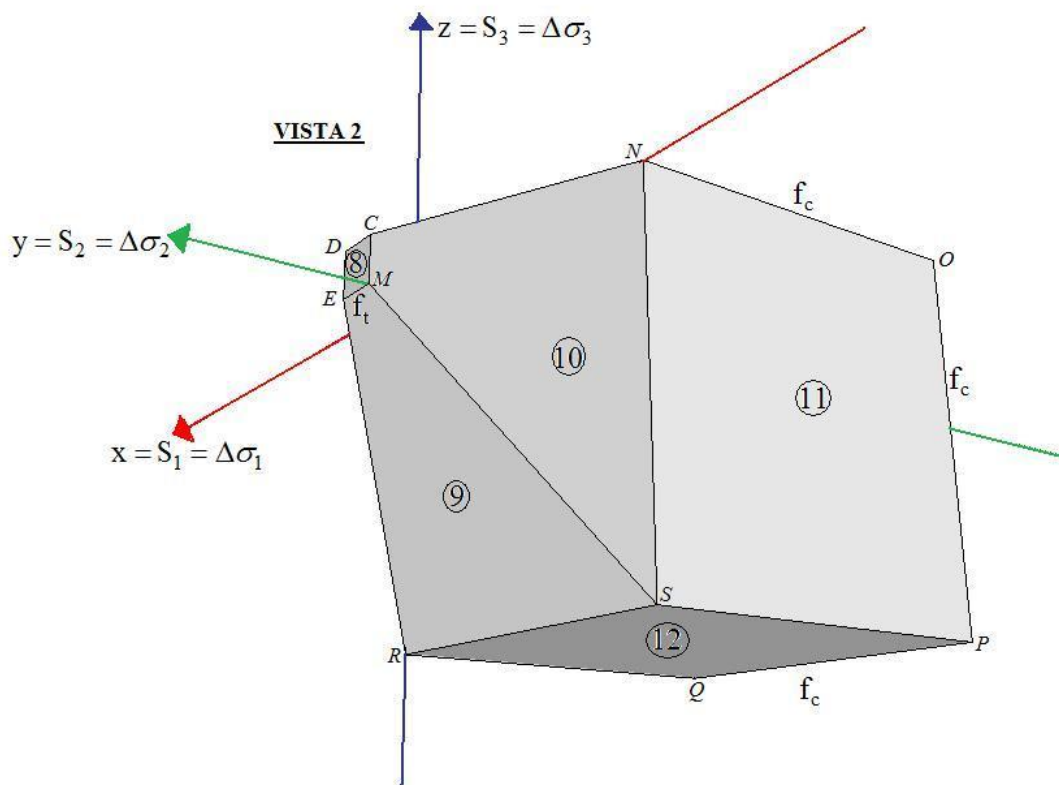
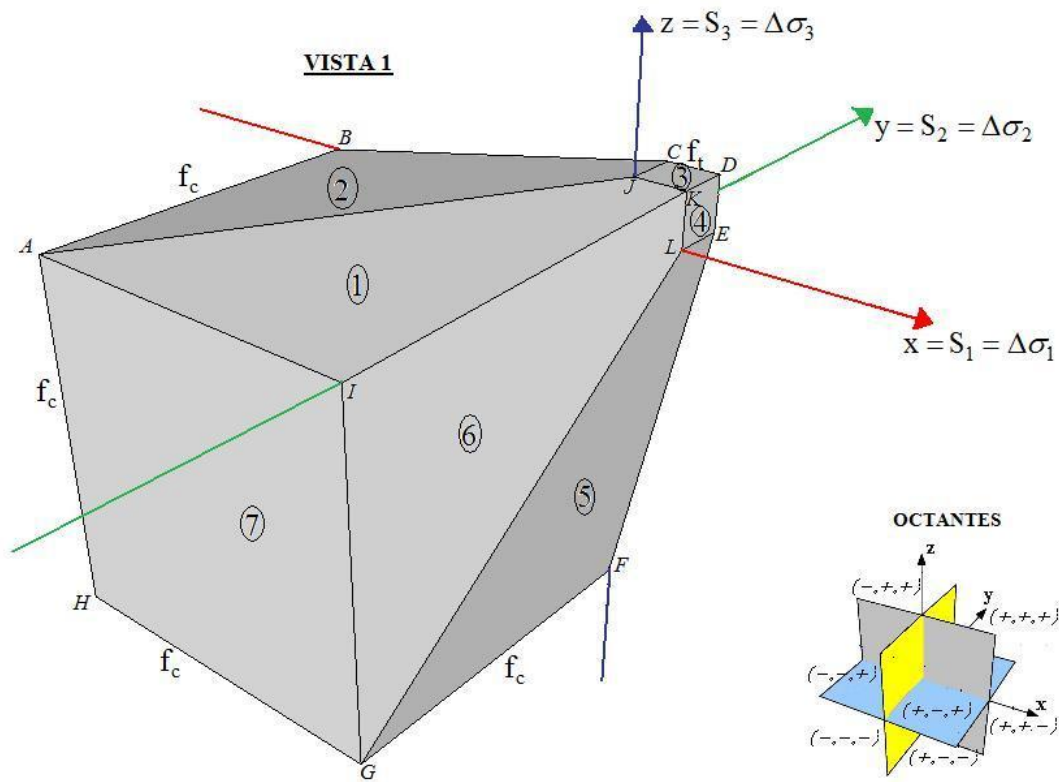


Figura 4.16 – Curva de ruptura generalizada.

A Figura 4.16 mostra os 12 planos de uma curva de ruptura generalizada representada no espaço. A partir desta representação espacial, é possível construir a Tabela 4.11 dos 8 octantes ilustrados na Figura 4.16.

Tabela 4.11 – Octantes da curva de ruptura generalizada.

OCTANTES	EIXO X	EIXO Y	EIXO Z
1º	+	+	+
2º	-	+	+
3º	-	-	+
4º	+	-	+
5º	+	+	-
6º	-	+	-
7º	-	-	-
8º	+	-	-

Nas deduções das equações abaixo, para simplificação algébrica, usou-se “C” para representar a resistência à compressão e “T” para ilustrar a resistência à tração.

→ PLANO 1

Considere que nas três extremidades do plano 1, têm-se os pontos J (0,0,T), A (-C,-C,O) e I (0,-C,0). A partir destes pontos, determinam-se os seguintes vetores:

$$\left. \begin{aligned} \vec{u} &= A - J = (-C, -C, 0) - (0, 0, T) = (-C, -C, -T) \\ \vec{v} &= A - I = (-C, -C, 0) - (0, -C, 0) = (-C, 0, 0) \end{aligned} \right\} \quad (4.23)$$

A partir destes vetores, faz-se o produto vetorial:

$$\left. \begin{aligned} \vec{N} &= \vec{u} \times \vec{v} = \begin{vmatrix} i & j & k \\ -C & -C & -T \\ -C & 0 & 0 \end{vmatrix} \\ \vec{N} &= (CT)\vec{j} - (C^2)\vec{k} = (0, CT, -C^2) \end{aligned} \right\} \quad (4.24)$$

considerando um ponto P (x,y,z) no Plano 1, determina-se o seguinte vetor:

$$\vec{w} = P - A = (x, y, z) - (-C, -C, 0) = (x + C, y + C, z) \quad (4.25)$$

admitindo-se que o produto escalar entre os vetores  $\vec{N}$  e  $\vec{w}$  é nulo, ou seja,  $\vec{N} \cdot \vec{w} = 0$ :

$$\left. \begin{aligned} 0.(x + C) + CT.(y + C) - C^2.z &= 0 \\ CTy + C^2T - C^2.z &= 0 \\ Ty - Cz + CT &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4.26)$$

sabendo-se que “T” corresponde à resistência à tração ( $f_t$ ), “C” corresponde à resistência à compressão ( $f_c$ ), e “y” e “z” correspondem, respectivamente, às tensões  $S_2$  e  $S_3$ , chega-se à seguinte equação geral para o plano 1:

$$f_t S_2 - f_c S_3 + f_c f_t = 0 \quad (4.27)$$

## → PLANO 2

Nas extremidades do Plano 2, têm-se os pontos J (0,0,T), A (-C,-C,0) e B (-C,0,0). A partir deles, determinam-se os seguintes vetores:

$$\left. \begin{aligned} \vec{u} = A - J &= (-C, -C, 0) - (0, 0, T) = (-C, -C, -T) \\ \vec{v} = A - B &= (-C, -C, 0) - (-C, 0, 0) = (0, -C, 0) \end{aligned} \right\} \quad (4.28)$$

O produto vetorial entre eles é dado por  $\vec{N} = \vec{u} \times \vec{v} = (CT)\vec{i} - (C^2)\vec{k} = (CT, 0, -C^2)$ .

Considerando um ponto P (x,y,z) no Plano 2, determina-se o seguinte vetor

$$\vec{w} = P - A = (x, y, z) - (-C, -C, 0) = (x + C, y + C, z).$$

Admitindo-se que o produto escalar entre os vetores  $\vec{N}$  e  $\vec{w}$  é nulo, ou seja,  $\vec{N} \cdot \vec{w} = 0$ , chega-se a  $Tx - Cz + CT = 0$ .

Como “T” corresponde à resistência à tração ( $f_t$ ), “C” corresponde à resistência à compressão ( $f_c$ ), e “x” e “z” correspondem, respectivamente, às tensões  $S_1$  e  $S_3$ , tem-se a seguinte equação geral para o plano 2:

$$f_t S_1 - f_c S_3 + f_c f_t = 0 \quad (4.29)$$

→ PLANO 3

No Plano 3, consideram-se as seguintes relações:

$$\left. \begin{array}{l} S_3 = f_t \\ S_1 \in [0, f_t] \\ S_2 \in [0, f_t] \end{array} \right\} \quad (4.30)$$

→ PLANO 4

Para o Plano 4 são válidas as seguintes relações:

$$\left. \begin{array}{l} S_1 = f_t \\ S_2 \in [0, f_t] \\ S_3 \in [0, f_t] \end{array} \right\} \quad (4.31)$$

→ PLANO 5

Considere os pontos L (T,0,0), G (0,-C,-C) e F (0,0,-C). A partir deles, pode-se encontrar os seguintes vetores:

$$\left. \begin{array}{l} \vec{u} = G - L = (0, -C, -C) - (T, 0, 0) = (-T, -C, -C) \\ \vec{v} = G - F = (0, -C, -C) - (0, 0, -C) = (0, -C, 0) \end{array} \right\} \quad (4.32)$$

O produto vetorial é dado por  $\vec{N} = \vec{u} \times \vec{v} = (C^2) \vec{i} - (CT) \vec{k} = (-C^2, 0, CT)$ . Considerando um ponto P (x,y,z) no Plano 5, determina-se o seguinte vetor  $\vec{w} = P - L = (x, y, z) - (T, 0, 0) = (x - T, y, z)$ .

Sabendo-se que o produto escalar entre os vetores  $\vec{N}$  e  $\vec{w}$  é nulo, ou seja,  $\vec{N} \cdot \vec{w} = 0$ , chega-se a  $-Cx + Tz + CT = 0$ .

Como “T” corresponde à resistência à tração ( $f_t$ ), “C” corresponde à resistência à compressão ( $f_c$ ), e “x” e “z” correspondem, respectivamente, às tensões  $S_1$  e  $S_3$ , tem-se para o Plano 5 a equação geral abaixo :

$$-f_c S_1 + f_t S_3 + f_c f_t = 0 \quad (4.33)$$

→ PLANO 6

Nas extremidades do Plano 6, têm-se os pontos L (T,0,0), G (0,-C,-C) e I (0,-C,0). A partir deles, pode-se encontrar os seguintes vetores:

$$\left. \begin{aligned} \vec{u} &= G - L = (0, -C, -C) - (T, 0, 0) = (-T, -C, -C) \\ \vec{v} &= G - I = (0, -C, -C) - (0, -C, 0) = (0, 0, -C) \end{aligned} \right\} \quad (4.34)$$

O produto vetorial é dado por  $\vec{N} = \vec{u} \times \vec{v} = (C^2) \vec{i} - (CT) \vec{j} = (C^2, -CT, 0)$ . Considerando um ponto P (x,y,z) no Plano 6, determina-se o seguinte vetor  $\vec{w} = P - I = (x, y, z) - (0, -C, 0) = (x, y + C, z)$ .

Sabendo-se que o produto escalar entre os vetores  $\vec{N}$  e  $\vec{w}$  é nulo, ou seja,  $\vec{N} \cdot \vec{w} = 0$ , chega-se a  $Cx - Ty - CT = 0$ .

Como “T” corresponde à resistência à tração ( $f_t$ ), “C” corresponde à resistência à compressão ( $f_c$ ), e “x” e “y” correspondem, respectivamente, às tensões  $S_1$  e  $S_2$ , tem-se para o Plano 6 a equação geral abaixo :

$$f_c S_1 - f_t S_2 - f_c f_t = 0 \quad (4.35)$$

→ PLANO 7

Para o Plano 7, deve-se considerar que:

$$\left. \begin{array}{l} S_2 = f_c \\ S_1 \in [0, -f_c] \\ S_3 \in [0, -f_c] \end{array} \right\} \quad (4.36)$$

→ PLANO 8

No Plano 8 são válidas as seguintes relações:

$$\left. \begin{array}{l} S_2 = f_t \\ S_1 \in [0, f_t] \\ S_3 \in [0, f_t] \end{array} \right\} \quad (4.37)$$

→ PLANO 9

Considerando os pontos R (0,0,-C), S (-C,0,-C) e M (0,T,0), pode-se encontrar os seguintes vetores:

$$\left. \begin{array}{l} \vec{u} = S - R = (-C, 0, -C) - (0, 0, -C) = (-C, 0, 0) \\ \vec{v} = S - M = (-C, 0, -C) - (0, T, 0) = (-C, -T, -C) \end{array} \right\} \quad (4.38)$$

O produto vetorial é dado por  $\vec{N} = \vec{u} \times \vec{v} = (-C^2)\vec{j} + (TC)\vec{k} = (0, -C^2, TC)$ .  
 Considerando um ponto P (x,y,z) no Plano 9, determina-se o seguinte vetor  
 $\vec{w} = P - M = (x, y, z) - (0, T, 0) = (x, y + T, z)$ .

Sabendo-se que o produto escalar entre os vetores  $\vec{N}$  e  $\vec{w}$  é nulo, ou seja,  $\vec{N} \cdot \vec{w} = 0$ ,  
 chega-se a  $-Cy + Tz + CT = 0$ .

Como “T” corresponde à resistência à tração ( $f_t$ ), “C” corresponde à resistência à  
 compressão ( $f_c$ ), e “y” e “z” correspondem, respectivamente, às tensões  $S_2$  e  $S_3$ , tem-se a  
 equação geral para o Plano 9:

$$-f_c S_2 + f_t S_3 + f_c f_t = 0 \quad (4.39)$$

→ PLANO 10

Nas extremidades do Plano 10, tem-se os pontos N (-C,0,0), S (-C,0,-C) e M (0,T,0). A  
 partir destes pontos, acha-se vetores abaixo:

$$\left. \begin{aligned} \vec{u} &= S - N = (-C, 0, -C) - (-C, 0, 0) = (0, 0, -C) \\ \vec{v} &= S - M = (-C, 0, -C) - (0, T, 0) = (-C, -T, -C) \end{aligned} \right\} \quad (4.40)$$

O produto vetorial é dado por  $\vec{N} = \vec{u} \times \vec{v} = (CT)\vec{i} - (C^2)\vec{j} = (CT, -C^2, 0)$ . Considerando  
 um ponto P (x,y,z) no Plano 10, encontra-se o vetor  
 $\vec{w} = P - M = (x, y, z) - (0, T, 0) = (x, y + T, z)$ .

Como o produto escalar entre os vetores  $\vec{N}$  e  $\vec{w}$  é nulo, ou seja,  $\vec{N} \cdot \vec{w} = 0$ , chega-se a  
 $-Cy + Tx + CT = 0$ .

Como “T” corresponde à resistência à tração ( $f_t$ ), “C” corresponde à resistência à compressão ( $f_c$ ), e “x” e “y” correspondem, respectivamente, às tensões  $S_1$  e  $S_2$ , tem-se a para o Plano 10 a equação geral abaixo:

$$-f_c S_2 + f_t S_1 + f_c f_t = 0 \quad (4.41)$$

→ PLANO 11

Consideram-se as relações abaixo para o Plano 11:

$$\left. \begin{array}{l} S_1 = -f_c \\ S_2 \in [0, -f_c] \\ S_3 \in [0, -f_c] \end{array} \right\} \quad (4.42)$$

→ PLANO 12

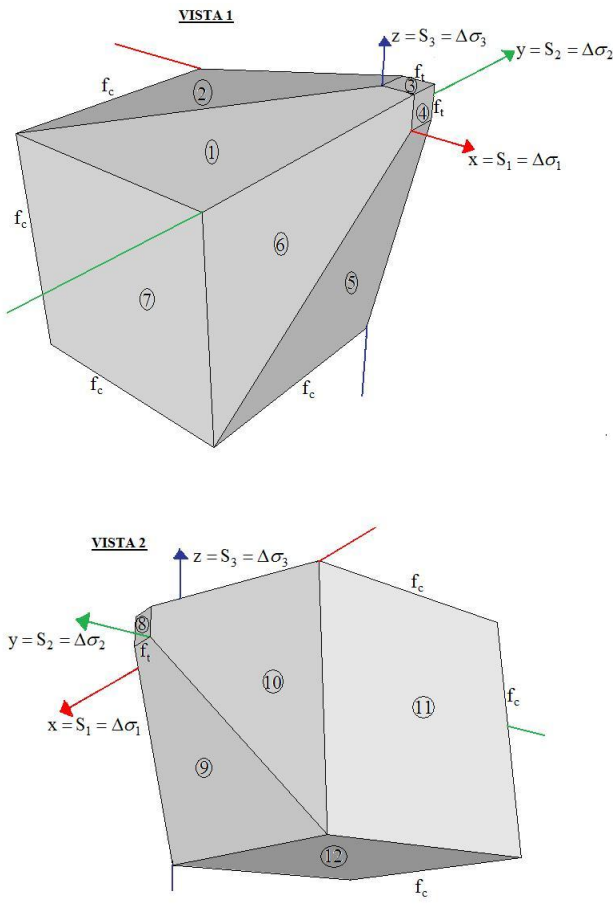
No Plano 12 são válidas as seguintes relações:

$$\left. \begin{array}{l} S_3 = -f_c \\ S_1 \in [0, f_c] \\ S_2 \in [0, -f_c] \end{array} \right\} \quad (4.43)$$

A Tabela 4.12 mostra um resumo dos planos e das equações gerais desenvolvidas para uma curva de ruptura de Coulomb-Mohr para o estado de tensão tridimensional.



Tabela 4.12 – Resumo dos planos e das equações gerais da curva de ruptura de Coulomb-Mohr no estado tridimensional.

	PLANO	EQUAÇÃO
 <p>VISTA 1</p> <p>VISTA 2</p>	1	$f_t S_2 - f_c S_3 + f_c f_t = 0$
	2	$f_t S_1 - f_c S_3 + f_c f_t = 0$
	3	$S_3 = f_t$ $S_1 \in [0, f_t]$ $S_2 \in [0, f_t]$
	4	$S_1 = f_t$ $S_2 \in [0, f_t]$ $S_3 \in [0, f_t]$
	5	$-f_c S_1 + f_t S_3 + f_c f_t = 0$
	6	$f_c S_1 - f_t S_2 - f_c f_t = 0$
	7	$S_2 = f_c$ $S_1 \in [0, -f_c]$ $S_3 \in [0, -f_c]$
	8	$S_2 = f_t$ $S_1 \in [0, f_t]$ $S_3 \in [0, f_t]$
	9	$-f_c S_2 + f_t S_3 + f_c f_t = 0$
	10	$-f_c S_2 + f_t S_1 + f_c f_t = 0$
	11	$S_1 = -f_c$ $S_2 \in [0, -f_c]$ $S_3 \in [0, -f_c]$
	12	$S_3 = -f_c$ $S_1 \in [0, f_c]$ $S_2 \in [0, -f_c]$

Após a definição das equações gerais de cada plano da curva de ruptura de Coulomb-Mohr, são mostradas abaixo as equações particularizadas em 4 casos, levando-se em consideração os valores adotados nas curvas de ruptura no estado plano.

**CASO 1:** Curva de Coulomb-Mohr das argamassas industrializadas obtida com dados experimentais. Na Figura 4.17 observa-se os planos da curva de ruptura das argamassas

industrializadas traçada com os dados experimentais obtidos neste trabalho (planos de compressão) e na pesquisa de Uchôa (2007) nos planos referentes à tração.

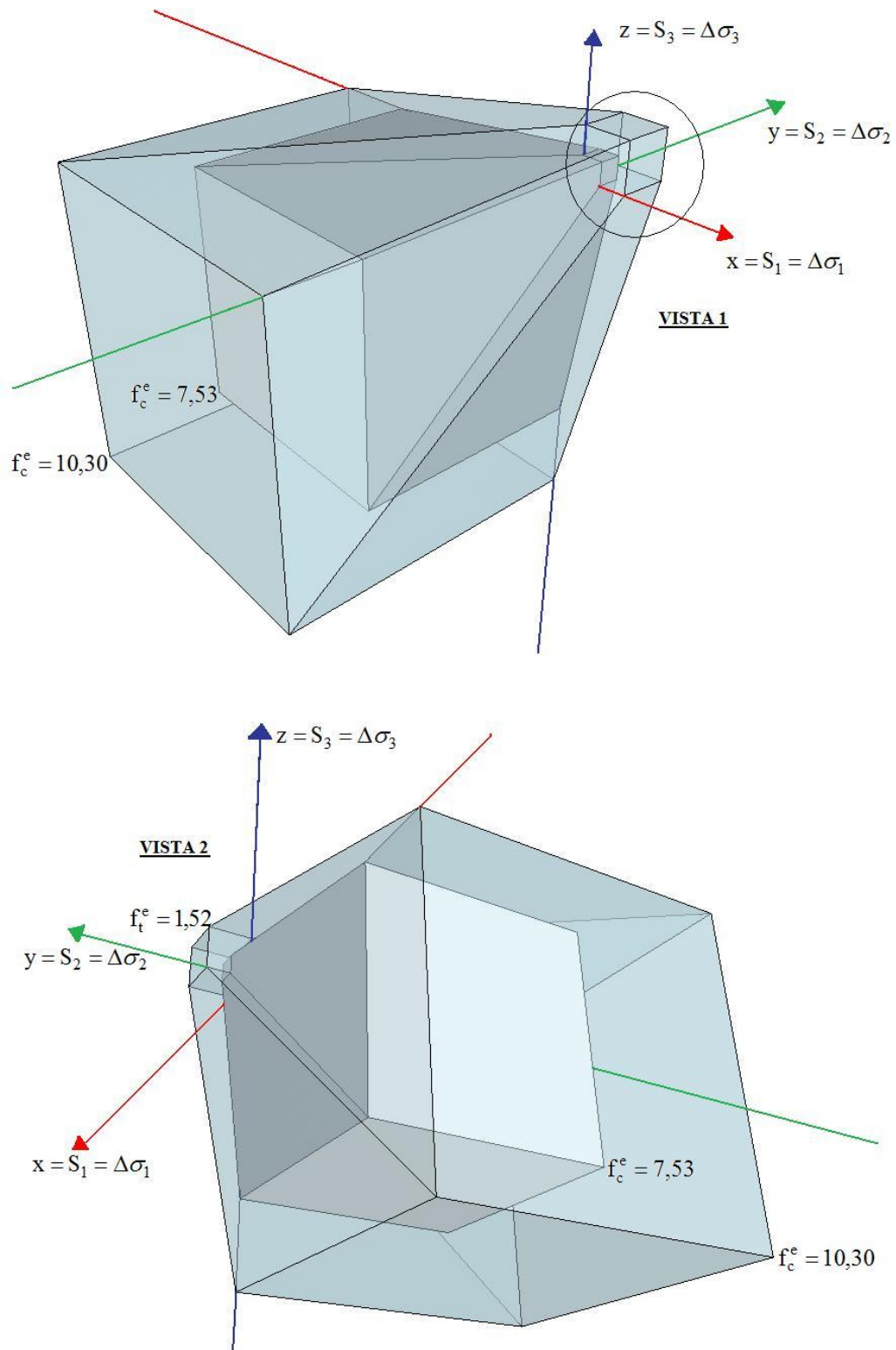


Figura 4.17 – Curva de Coulomb-Mohr das argamassas industrializadas obtida com resultados experimentais de compressão e de tração.

A Figura 4.18 mostra um zoom dos planos tracionados da curva de ruptura ilustrada na Figura 4.17.

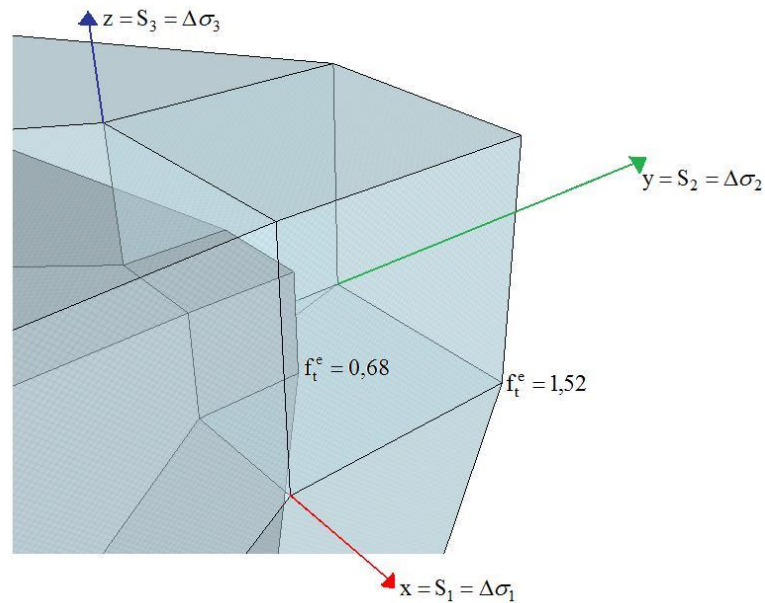


Figura 4.18 – Planos tracionados da curva de Coulomb-Mohr das argamassas industrializadas obtida com resultados experimentais de compressão e de tração.

Substituindo nas equações gerais da Tabela 4.12, “ft” por 1,52 e “fc” por 10,30 para 1 ciclo de carregamento. Considerando que para  $10^6$  ciclos de carregamento “ft” equivale a 0,68 e “fc” é igual a 7,53, a Tabela 4.13 mostra as equações dos planos da curva de ruptura das argamassas industrializadas obtida com resultados experimentais de compressão e de tração.

Na figura 4.17, constata-se que não há paralelismo entre as tensões de tração e de compressão para 1 ciclo de carregamento e para  $10^6$  ciclos de carregamento. Sendo assim, as equações apresentam coeficientes diferentes conforme pode ser visualizado na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Resumo dos planos e das equações gerais da curva de ruptura de Coulomb-Mohr para o caso 1.

PLANO	N = 1 ciclo de carregamento	N = 10 <sup>6</sup> ciclos de carregamento
1	$1,52S_2 - 10,3S_3 = -15,66$	$0,68S_2 - 7,53S_3 = -5,12$
2	$1,52S_1 - 10,3S_3 = -15,66$	$0,68S_1 - 7,53S_3 = -5,12$
3	$S_3 = 1,52$ $S_1 \in [0;1,52]$ $S_2 \in [0;1,52]$	$S_3 = 0,68$ $S_1 \in [0;0,68]$ $S_2 \in [0;0,68]$
4	$S_1 = 1,52$ $S_2 \in [0;1,52]$ $S_3 \in [0;1,52]$	$S_1 = 0,68$ $S_2 \in [0;0,68]$ $S_3 \in [0;0,68]$
5	$-10,3S_1 + 1,52S_3 = -15,66$	$-7,53S_1 + 0,68S_3 = -5,12$
6	$10,3S_1 - 1,52S_2 = 15,66$	$7,53S_1 - 0,68S_2 = 5,12$
7	$S_2 = 10,30$ $S_1 \in [0;-10,30]$ $S_3 \in [0;-10,30]$	$S_2 = 7,53$ $S_1 \in [0;-7,53]$ $S_3 \in [0;-7,53]$
8	$S_2 = 1,52$ $S_1 \in [0;1,52]$ $S_3 \in [0;1,52]$	$S_2 = 0,68$ $S_1 \in [0;0,68]$ $S_3 \in [0;0,68]$
9	$-10,3S_2 + 1,52S_3 = -15,66$	$-7,53S_2 + 0,68S_3 = -5,12$
10	$-10,3S_2 + 1,52S_1 = -15,66$	$-7,53S_2 + 0,68S_1 = -5,12$
11	$S_1 = -10,30$ $S_2 \in [0;-10,30]$ $S_3 \in [0;-10,30]$	$S_1 = -7,53$ $S_2 \in [0;-7,53]$ $S_3 \in [0;-7,53]$
12	$S_3 = -10,30$ $S_1 \in [0;10,30]$ $S_2 \in [0;-10,30]$	$S_3 = -7,53$ $S_1 \in [0;7,53]$ $S_2 \in [0;-7,53]$

**CASO 2:** Curva de Coulomb-Mohr das argamassas industrializadas obtida com os dados do ensaio de fadiga realizado por Uchôa (2007). Na Figura 4.19 observa-se os planos da curva de ruptura das argamassas industrializadas traçada com os dados experimentais e avaliados obtidos pelo referido autor.

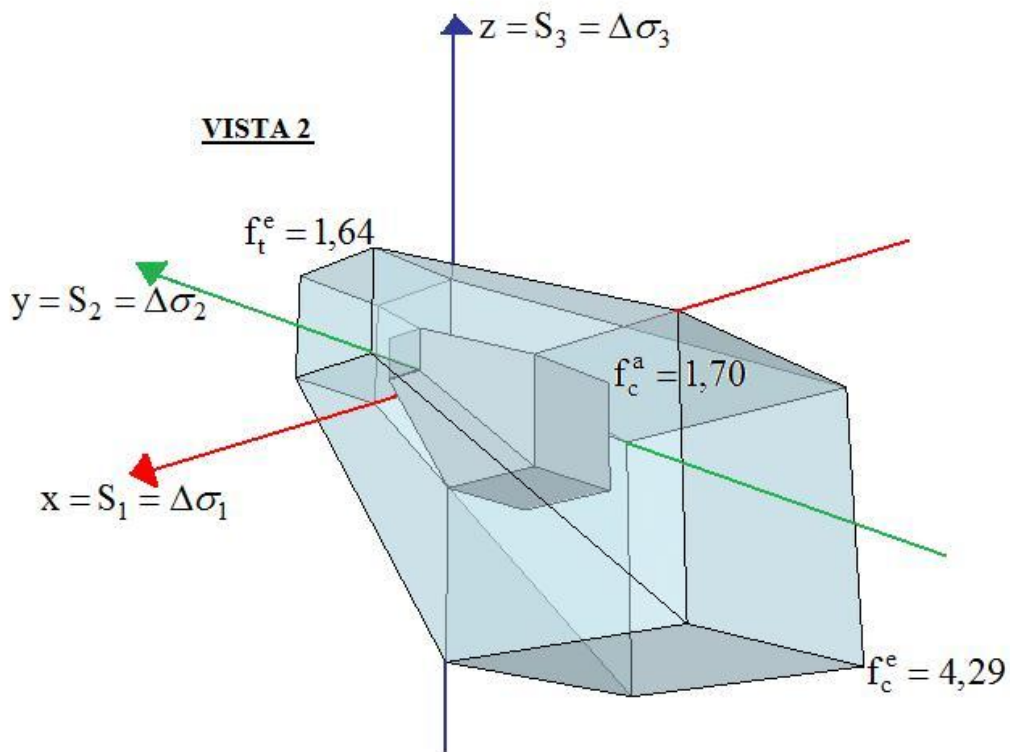
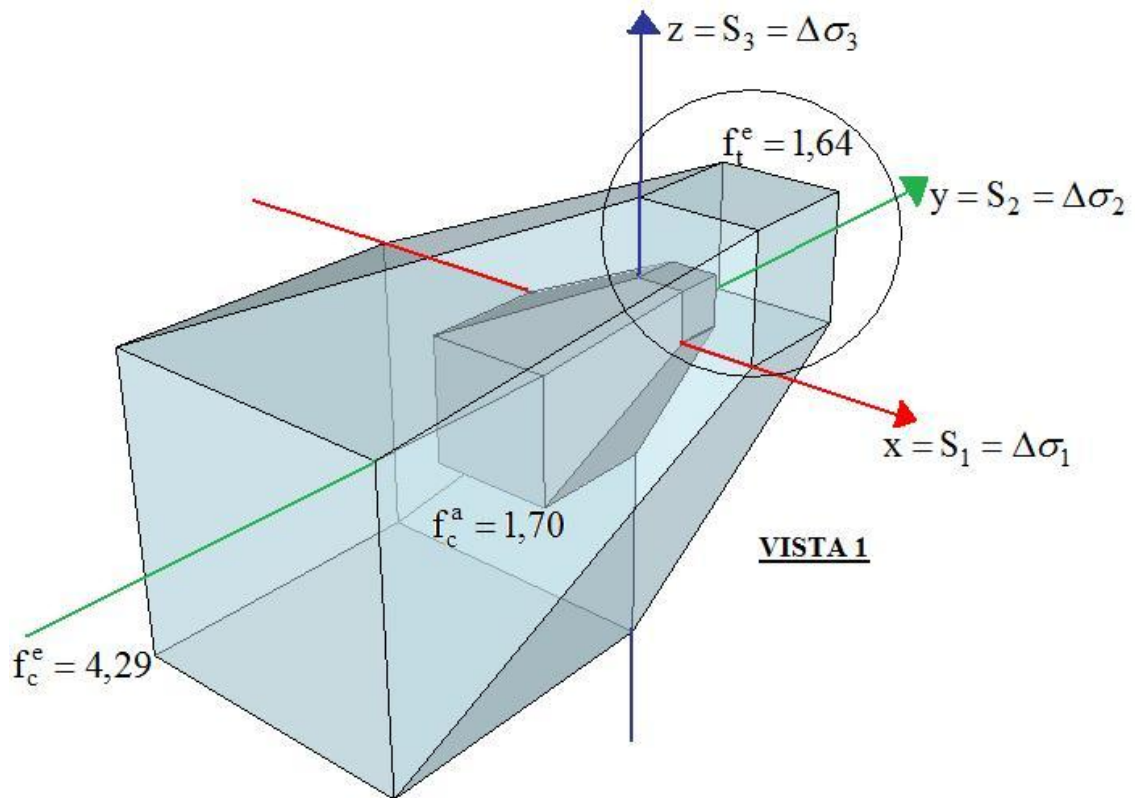


Figura 4.19 – Curva de Coulomb-Mohr da argamassa industrializada estudada por Uchôa (2007).

A Figura 4.20 mostra um zoom dos planos tracionados da curva de ruptura ilustrada na Figura 4.19.

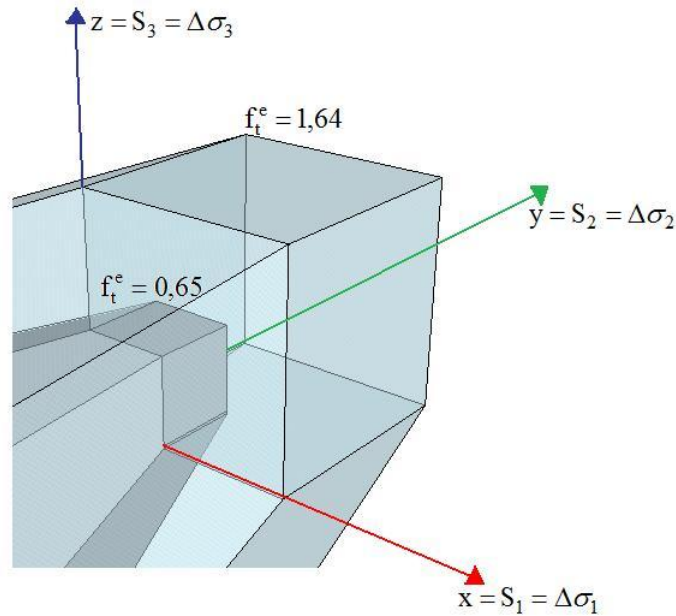


Figura 4.20 – Planos tracionados da curva de Coulomb-Mohr da argamassa industrializada estudada por Uchôa (2007).

Considerando as equações gerais da Tabela 4.12 e substituindo “ft” por 1,64 e “fc” por 4,29 para 1 ciclo de carregamento. Em seguida, para  $10^6$  ciclos de carregamento, substituindo-se “ft” por 0,65 e “fc” por 1,70, constrói-se a Tabela 4.14 com as equações dos planos da curva de ruptura da argamassa industrializada estudada por Uchôa (2007).

É importante ressaltar que como Uchôa (2007) admitiu um paralelismo entre as curvas de tração e as curvas de compressão, as equações para um ciclo de carregamento apresentam os mesmos coeficientes das equações para  $10^6$  ciclos de carregamento, o que pode ser comprovado nas equações da Tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Resumo dos planos e das equações gerais da curva de ruptura de Coulomb-Mohr para o caso 2.

PLANO	N = 1 ciclo de carregamento	N = 10 <sup>6</sup> ciclos de carregamento
1	$1,64S_2 - 4,29S_3 = -7,03$	$0,65S_2 - 1,7S_3 = -1,10$
2	$1,64S_1 - 4,29S_3 = -7,03$	$0,65S_1 - 1,7S_3 = -1,10$
3	$S_3 = 1,64$ $S_1 \in [0;1,64]$ $S_2 \in [0;1,64]$	$S_3 = 0,65$ $S_1 \in [0;0,65]$ $S_2 \in [0;0,65]$
4	$S_1 = 1,64$ $S_2 \in [0;1,64]$ $S_3 \in [0;1,64]$	$S_1 = 0,65$ $S_2 \in [0;0,65]$ $S_3 \in [0;0,65]$
5	$-4,29S_1 + 1,64S_3 = -7,03$	$-1,7S_1 + 0,65S_3 = -1,10$
6	$4,29S_1 - 1,64S_2 = 7,03$	$1,7S_1 - 0,65S_2 = 1,10$
7	$S_2 = 4,29$ $S_1 \in [0;-4,29]$ $S_3 \in [0;-4,29]$	$S_2 = 1,70$ $S_1 \in [0;-1,70]$ $S_3 \in [0;-1,70]$
8	$S_2 = 1,64$ $S_1 \in [0;1,64]$ $S_3 \in [0;1,64]$	$S_2 = 0,65$ $S_1 \in [0;0,65]$ $S_3 \in [0;0,65]$
9	$-4,29S_2 + 1,64S_3 = -7,03$	$-1,7S_2 + 0,65S_3 = -1,10$
10	$-4,29S_2 + 1,64S_1 = -7,03$	$-1,7S_2 + 0,65S_1 = -1,10$
11	$S_1 = -4,29$ $S_2 \in [0;-4,29]$ $S_3 \in [0;-4,29]$	$S_1 = -1,70$ $S_2 \in [0;-1,70]$ $S_3 \in [0;-1,70]$
12	$S_3 = -4,29$ $S_1 \in [0,4,29]$ $S_2 \in [0,-4,29]$	$S_3 = -1,70$ $S_1 \in [0;1,70]$ $S_2 \in [0;-1,70]$

**CASO 3:** Curva de Coulomb-Mohr das argamassas mistas obtida com dados experimentais do ensaio de fadiga (resistências à tração e à compressão para 1 ciclo de carregamento) e com dados avaliados (resistências à tração e à compressão para 10<sup>6</sup> ciclos de carregamento) através do coeficiente ( $\kappa = 2,523$ ) conforme já mostrado no “Caso 3” das curvas de Coulomb-Mohr no estado plano. A Figura 4.21 mostra os planos da curva de ruptura das argamassas mistas traçada com resultados experimentais para 1 ciclo e resultados avaliados para 10<sup>6</sup> ciclos.

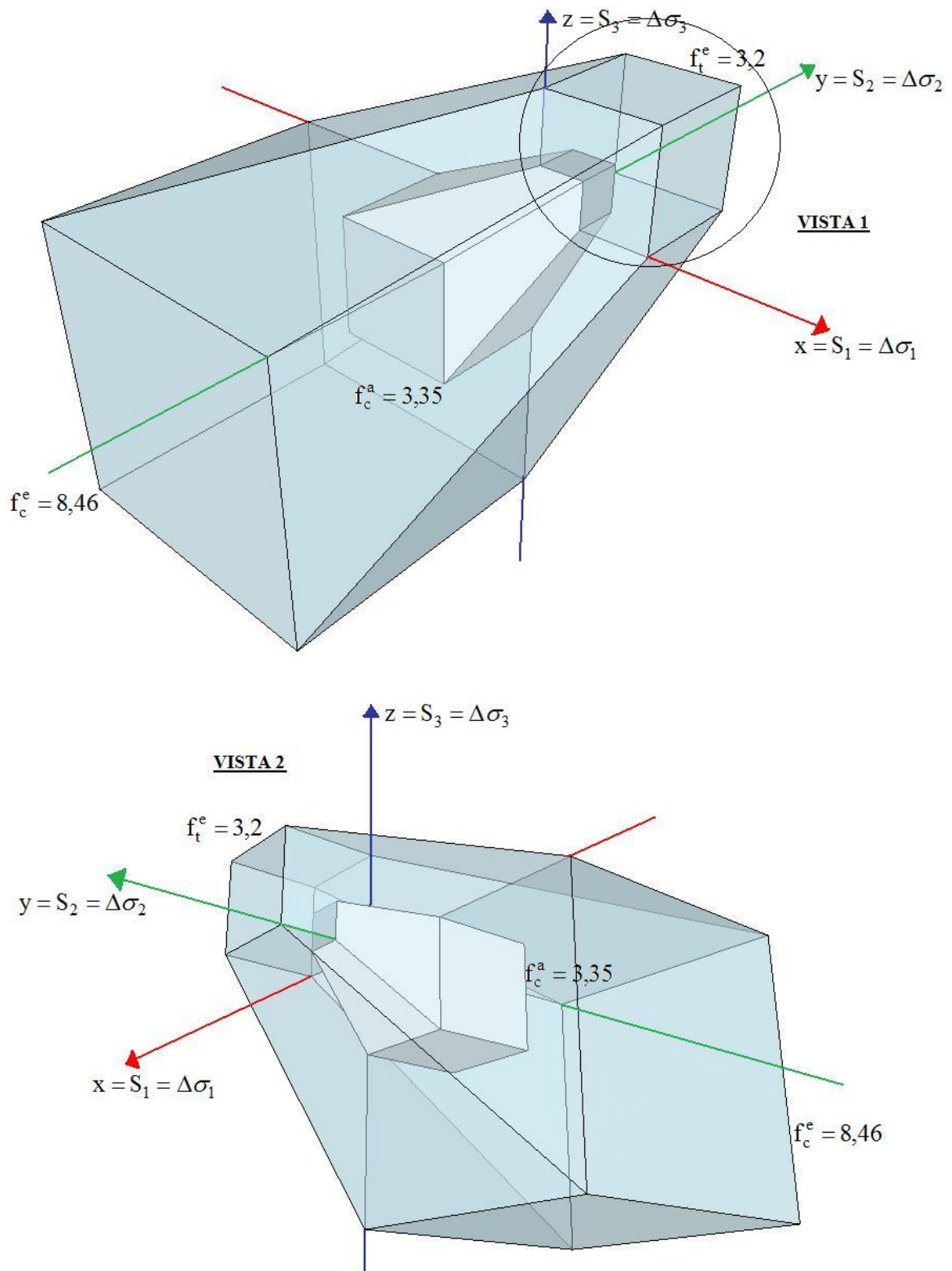


Figura 4.21 – Curva de Coulomb-Mohr das argamassas mistas obtida com resistências experimentais para 1 ciclo e resistências avaliadas para  $10^6$  ciclos.



A Figura 4.22 ilustra um “zoom” dos planos tracionados da curva de ruptura visualizada na Figura 4.21.

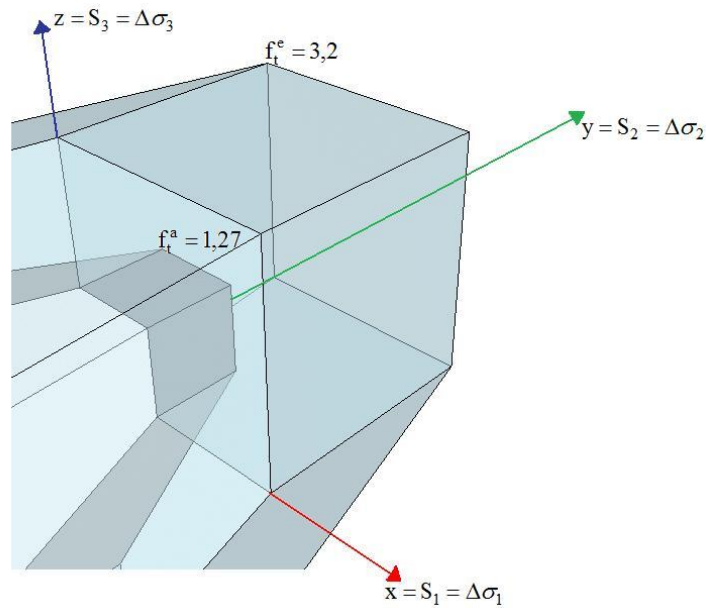


Figura 4.22 – Planos tracionados da curva de Coulomb-Mohr da argamassa mista obtida obtida com resistências experimentais para 1 ciclo e resistências avaliadas para  $10^6$  ciclos.

Nas equações gerais da Tabela 4.12, substituindo-se “ft” por 3,2 e “fc” por 8,46 para 1 ciclo de carregamento, e ft” por 1,27 e “fc” por 3,35 para  $10^6$  ciclos de carregamento, obtém-se a Tabela 4.15 com as equações dos planos da curva de ruptura de Coulomb-Mohr da argamassa mista obtida com dados experimentais e avaliados.

Vale salientar que como neste caso foram admitidas as hipóteses do trabalho de Uchôa (2007), verifica-se um paralelismo entre as curvas de tração e as curvas de compressão, ou seja, as equações apresentam os mesmos coeficientes conforme pode ser visualizado nas equações da Tabela 4.15.

Tabela 4.15 – Resumo dos planos e das equações gerais da curva de ruptura de Coulomb-Mohr para o caso 3.

PLANO	N = 1 ciclo de carregamento	N = 10 <sup>6</sup> ciclos de carregamento
1	$3,2S_2 - 8,46S_3 = -27,07$	$1,27S_2 - 3,35S_3 = -4,25$
2	$3,2S_1 - 8,46S_3 = -27,07$	$1,27S_1 - 3,35S_3 = -4,25$
3	$S_3 = 3,20$ $S_1 \in [0;3,20]$ $S_2 \in [0;3,20]$	$S_3 = 1,27$ $S_1 \in [0;1,27]$ $S_2 \in [0;1,27]$
4	$S_1 = 3,20$ $S_2 \in 3,20$ $S_3 \in [0;3,20]$	$S_1 = 1,27$ $S_2 \in [0;1,27]$ $S_3 \in [0;1,27]$
5	$-8,46S_1 + 3,2S_3 = -27,07$	$-3,35S_1 + 1,27S_3 = -4,25$
6	$8,46S_1 - 3,2S_2 = 27,07$	$3,35S_1 - 1,27S_2 = 4,25$
7	$S_2 = 8,46$ $S_1 \in [0;-8,46]$ $S_3 \in [0;-8,46]$	$S_2 = 3,35$ $S_1 \in [0;-3,35]$ $S_3 \in [0;-3,35]$
8	$S_2 = 3,20$ $S_1 \in [0;3,20]$ $S_3 \in [0;3,20]$	$S_2 = 1,27$ $S_1 \in [0;1,27]$ $S_3 \in [0;1,27]$
9	$-8,46S_2 + 3,2S_3 = -27,07$	$-3,35S_2 + 1,27S_3 = -4,25$
10	$-8,46S_2 + 3,2S_1 = -27,07$	$-3,35S_2 + 1,27S_1 = -4,25$
11	$S_1 = -8,46$ $S_2 \in [0;-8,46]$ $S_3 \in [0;-8,46]$	$S_1 = -3,35$ $S_2 \in [0;-3,35]$ $S_3 \in [0;-3,35]$
12	$S_3 = -8,46$ $S_1 \in [0;8,46]$ $S_2 \in [0;-8,46]$	$S_3 = -3,35$ $S_1 \in [0;3,35]$ $S_2 \in [0;-3,35]$

**CASO 4:** Curva de Coulomb-Mohr das argamassas mistas obtida com dados experimentais do ensaio de fadiga (resistências à tração e à compressão para 1 ciclo de carregamento; e resistência à compressão para 10<sup>6</sup> ciclos de carregamento) e com dados avaliados (resistência à tração para 10<sup>6</sup> ciclos de carregamento) através dos coeficientes ( $\mu = 4,70$  ou  $\lambda = 1,351$ ) de acordo com o que foi mostrado no “Caso 4” das curvas de Coulomb-Mohr no estado plano. Na Figura 4.23, observa-se os planos da curva de ruptura

das argamassas mistas obtida com resistências experimentais e resistência à tração avaliada para  $10^6$  ciclos.

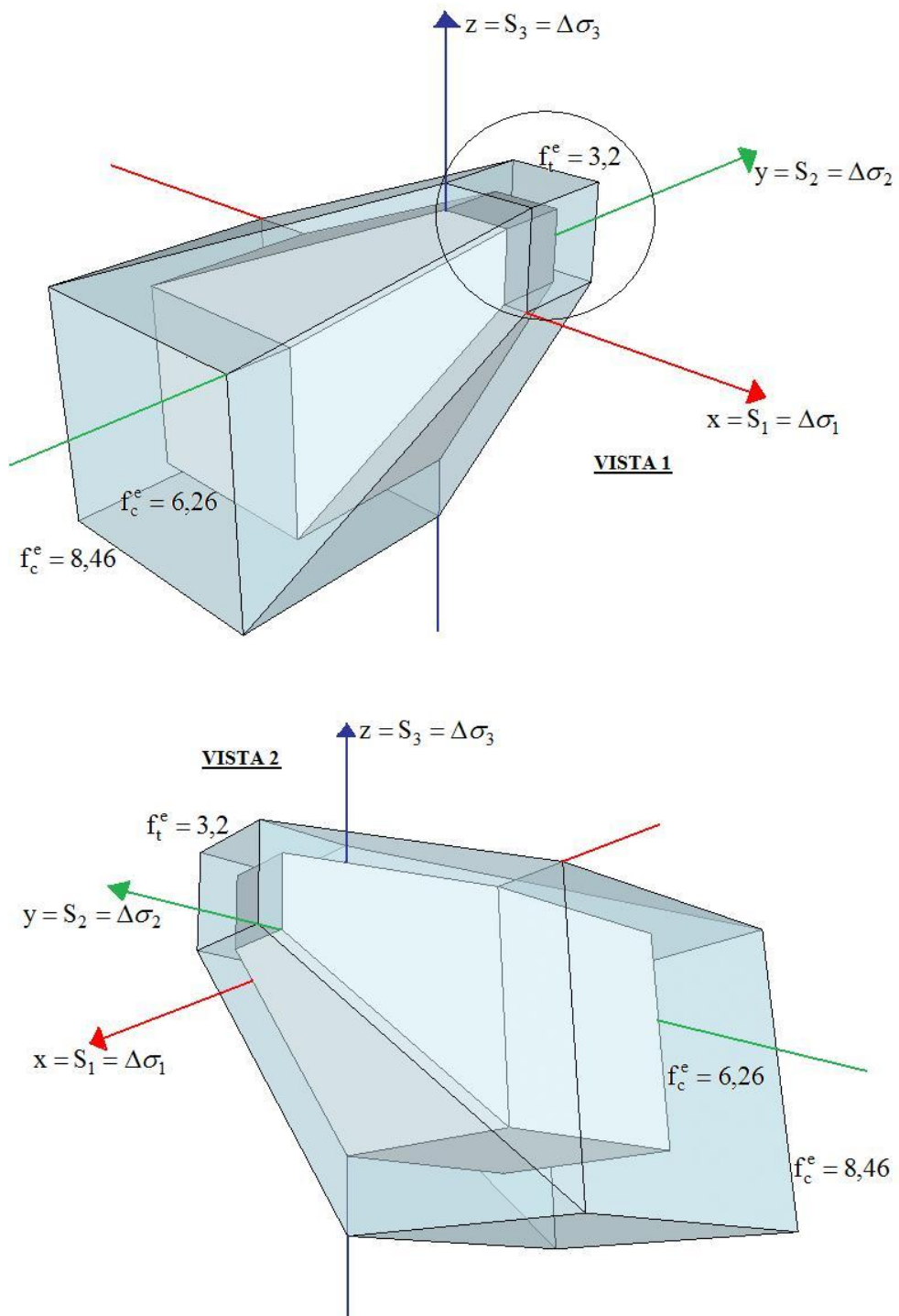


Figura 4.23 – Curva de Coulomb-Mohr das argamassas mistas obtida com resistências experimentais e resistência à tração avaliada para  $10^6$  ciclos.

Na Figura 4.24, nota-se o “zoom” dos planos tracionados da curva de ruptura visualizada na Figura 4.23.

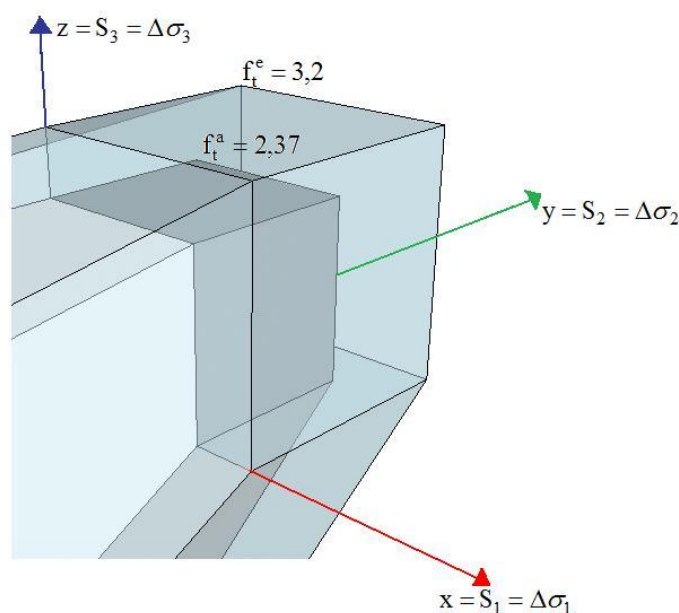


Figura 4.24 – Planos tracionados da curva de Coulomb-Mohr das argamassas mistas obtida com resistências experimentais e resistência à tração avaliada para  $10^6$  ciclos.

Considerando as equações gerais da Tabela 4.12 e substituindo inicialmente “ft” por 3,20 e “fc” por 8,46 para 1 ciclo de carregamento. Em seguida, para  $10^6$  ciclos de carregamento, substituindo-se “ft” por 2,37 e “fc” por 6,26, tem-se a Tabela 4.16 com as equações dos planos da curva de ruptura das argamassas mistas obtida com resistências experimentais e resistência à tração avaliada para  $10^6$  ciclos.

É importante ressaltar que como neste caso foram admitidas as hipóteses do trabalho de Uchôa (2007), verifica-se um paralelismo entre as curvas de tração e as curvas de compressão para 1 ciclo de carregamento e para  $10^6$  ciclos de carregamento. Este paralelismo pode ser comprovado nas equações da Tabela 4.16.

Tabela 4.16 – Resumo dos planos e das equações gerais da curva de ruptura de Coulomb-Mohr para o caso 4.

<b>PLANO</b>	<b>N = 1 ciclo de carregamento</b>	<b>N = 10<sup>6</sup> ciclos de carregamento</b>
<b>1</b>	$3,2S_2 - 8,46S_3 = -27,07$	$2,37S_2 - 6,26S_3 = -14,84$
<b>2</b>	$3,2S_1 - 8,46S_3 = -27,07$	$2,37S_1 - 6,26S_3 = -14,84$
<b>3</b>	$S_3 = 3,20$ $S_1 \in [0;3,20]$ $S_2 \in [0;3,20]$	$S_3 = 2,37$ $S_1 \in [0;2,37]$ $S_2 \in [0;2,37]$
<b>4</b>	$S_1 = 3,20$ $S_2 \in [0;3,20]$ $S_3 \in [0;3,20]$	$S_1 = 2,37$ $S_2 \in [0;2,37]$ $S_3 \in [0;2,37]$
<b>5</b>	$-8,46S_1 + 3,2S_3 = -27,07$	$-6,26S_1 + 2,37S_3 = -14,84$
<b>6</b>	$8,46S_1 - 3,2S_2 = 27,07$	$6,26S_1 - 2,37S_2 = 14,84$
<b>7</b>	$S_2 = 8,46$ $S_1 \in [0;-8,46]$ $S_3 \in [0;-8,46]$	$S_2 = 6,26$ $S_1 \in [0;-6,26]$ $S_3 \in [0;-6,26]$
<b>8</b>	$S_2 = 3,20$ $S_1 \in [0;3,20]$ $S_3 \in [0;3,20]$	$S_2 = 2,37$ $S_1 \in [0;2,37]$ $S_3 \in [0;2,37]$
<b>9</b>	$-8,46S_2 + 3,2S_3 = -27,07$	$-6,26S_2 + 2,37S_3 = -14,84$
<b>10</b>	$-8,46S_2 + 3,2S_1 = -27,07$	$-6,26S_2 + 2,37S_1 = -14,84$
<b>11</b>	$S_1 = -8,46$ $S_2 \in [0;-8,46]$ $S_3 \in [0;-8,46]$	$S_1 = -6,26$ $S_2 \in [0;-6,26]$ $S_3 \in [0;-6,26]$
<b>12</b>	$S_3 = -8,46$ $S_1 \in [0;8,46]$ $S_2 \in [0;-8,46]$	$S_3 = -6,26$ $S_1 \in [0;6,26]$ $S_2 \in [0;6,26]$

## **5- CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

### **5.1 – CONCLUSÕES GERAIS**

Nesta pesquisa foram realizados ensaios dinâmicos e estáticos em corpos-de-prova cilíndricos de argamassas industrializadas e mistas, a partir dos quais é possível traçar algumas conclusões importantes a respeito do comportamento das argamassas de revestimento submetidas à fadiga.

Em relação à metodologia de ensaio desenvolvida, observa-se que os corpos-de-prova adotados atenderam às expectativas, tendo em vista que na avaliação do comportamento das argamassas de revestimento submetidas à fadiga sob compressão, não há necessidade de entalhe na geometria dos corpos-de-prova e, conseqüentemente, não é levado em consideração o fator de concentração de tensões.

Por outro lado, apesar dos sistemas de revestimentos estarem sujeitos à ação de cargas e freqüências variáveis, os ensaios laboratoriais de fadiga desta pesquisa foram realizados com carregamento e freqüência constantes através de ensaios dinâmicos sob carregamentos de compressão pura em virtude das dificuldades e limitações dos equipamentos usados. Com isto não foi possível verificar a influência da freqüência no comportamento à fadiga das argamassas.

Constatou-se que a quantidade de ciclos necessários para a ruptura por fadiga apresentou uma grande dispersão. Durante os ensaios experimentais de fadiga, notou-se que os corpos-de-prova de argamassas ensaiados em um mesmo nível de tensão rompiam com um número de ciclos bastante variável, apesar de ter sido feito um controle rigoroso no processo de produção das argamassas, moldagem e cura dos corpos-de-prova e alinhamento perpendicular do corpo-de-prova na máquina de ensaio. Nesse contexto, a realização de ensaios sob fadiga com pelo menos 3 corpos-de-prova para cada nível de tensão (cada argamassa foi ensaiada em 4 níveis de tensão) foi uma quantidade razoável para se chegar a um valor médio ou se detectar qualquer discrepância.

Observa-se que como os ensaios de fadiga foram realizados após aproximadamente 6 meses de cura úmida em virtude da não disponibilidade do Laboratório da Mecânica para a execução dos ensaios de fadiga, foram realizados ensaios estáticos em corpos prismáticos (4x4x16cm) para determinação da resistência mecânica das argamassas aos 28 dias e aos 180 dias. Aos 28 dias, observa-se na Tabela 4.2 que a argamassa mista apresentou resistência à tração de 1,8MPa e resistência à compressão de 4,9MPa, enquanto que a argamassa industrializada apresentou resistência à tração igual a 1,9MPa e resistência à compressão de 5,1MPa. Já aos 180 dias, nota-se na Tabela 4.4 que a argamassa mista apresentou resistência à tração igual a 3,2MPa e resistência à compressão de 6,6MPa, e a argamassa industrializada apresentou resistência à tração de 3,5MPa e resistência à compressão de 7,9MPa. Cabe ressaltar que neste trabalho admitiu-se que essas resistências encontradas nos corpos-de-prova prismáticos são equivalentes às resistências à compressão encontradas nos corpos-de-prova cilíndricos, onde a argamassa mista apresentou resistência experimental de 8,80MPa e a argamassa industrializada apresentou 10,18MPa de resistência à compressão.

Em virtude das dificuldades encontradas na execução dos ensaios de fadiga, não foi possível determinar um valor experimental para o limite de resistência à fadiga das argamassas mistas sob tração, sendo assim foi feita apenas uma avaliação deste valor com base em coeficientes de proporcionalidade.

Em relação aos resultados de fadiga sob compressão, observa-se que as argamassas de revestimento sofreram um processo gradual de dano por fadiga. Este processo provocou uma diminuição da resistência à fadiga na medida em que se aumentava o número de ciclos de carregamento, de maneira que se atingiu um patamar em que não havia mais ruptura. Desta forma, observa-se que as argamassas industrializadas sofreram ruptura por fadiga até uma tensão de 7,76MPa e as argamassas mistas sofreram dano até uma tensão de 6,47 MPa conforme pode ser visualizado na Tabela 4.9. No nível de tensão igual a 7,53MPa no caso das argamassas industrializadas e 6,26MPa no caso das argamassas mistas, os corpos-de-prova não apresentavam mais ruptura por fadiga até o número de ciclos de  $10^6$  ciclos quando o ensaio era interrompido. Apesar de haver na literatura diversas recomendações sobre este limite do número de ciclos, neste trabalho foi adotado arbitrariamente  $10^6$  ciclos como o limite, o que corresponde a aproximadamente 3 séculos

de ciclos de tensões termomecânicas. Sendo assim, a partir das equações obtidas, definiu-se que as argamassas industrializadas apresentam limite de fadiga sob compressão igual a 7,53MPa e resistência última igual a 10,30MPa. Já as argamassas mistas apresentam resistência à fadiga sob compressão de 6,26MPa e resistência última igual a 8,46MPa. Vale salientar que tanto a argamassa industrializada como a argamassa mista apresentaram limites de fadiga sob compressão correspondentes à aproximadamente 73% das suas respectivas resistências últimas, ou seja, não sofrem ruptura por fadiga quando sujeitas à uma tensão equivalente a aproximadamente 70% de sua resistência à compressão.

No tocante às curvas de ruptura adotadas, a proposta de Coulomb-Mohr, apesar de ser um modelo simples para avaliar o comportamento das argamassas submetidas a carregamento cíclico, pôde ser adaptada com base em resultados experimentais de ensaios e resultados avaliados, a fim de constituir um modelo simples de previsão da vida útil à fadiga.

Sendo assim, foram traçadas curvas de ruptura no estado plano e no estado tridimensional tanto para as argamassas mistas como para as argamassas industrializadas. Como neste trabalho não foi possível a realização de ensaios de fadiga sob tração, para a avaliação das curvas de ruptura foi feita uma divisão em quatro casos. O primeiro caso apresenta as curvas de ruptura das argamassas industrializadas, onde o estado de tensão à compressão foi obtido experimentalmente e o estado de tensão à tração foi adotado os valores encontrados experimentalmente por Uchôa (2007). O segundo caso ilustra a curva de ruptura proposta pelo referido autor. O terceiro e quarto casos mostram as curvas de ruptura das argamassas mistas, onde o estado de tensão sob compressão foi obtido experimentalmente e o estado de tensão à tração foi avaliado a partir da hipótese do paralelismo entre as tensões de tração e compressão sugeridas por este autor.

Nas curvas de ruptura traçadas no estado plano, observou-se que nos 4 casos estudados, as curvas de resistência apresentavam um visível encolhimento quando o número de ciclos de carregamento aumentava, ou seja, quando a quantidade de ciclos crescia de 1 (situação em que a resistência à fadiga é igual à resistência estática) para  $10^6$ . Este comportamento confirma a teoria do dano acumulado de Palmgren-Miner apresentada no capítulo 2.



Nas curvas de ruptura do estado tridimensional, notou-se que a curva de ruptura do caso 2 proposta por Uchôa (2007) é bastante conservadora, uma vez que ficou dentro do núcleo real formado pela curva de ruptura do caso 1. Mesmo assim, para a avaliação da fadiga das argamassas de revestimento esta curva pode servir de parâmetro, ainda que os limites de resistência à fadiga sob compressão (igual a 1,70MPa) proposto seja bastante inferior ao encontrado experimentalmente no caso 1 que é de 7,53MPa.

Nos casos 2, 3 e 4 onde se adotou o paralelismo entre as tensões de tração e de compressão, verificou-se que as equações desenvolvidas para os 12 planos das curvas de ruptura no estado tridimensional apresentam os mesmos coeficientes, ou seja, há um paralelismo entre os planos formados para 1 ciclo e para  $10^6$  ciclos de carregamento.

Entretanto, na curva de ruptura tridimensional do caso 1, cujos estados de tensão à compressão e à tração foram obtidos experimentalmente, não havia paralelismo entre os planos de forma que as equações apresentaram coeficientes distintos.

## **5.2 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Em virtude das limitações apresentadas nesta pesquisa, têm-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- ✓ Realizar ensaios de fadiga em corpos-de-prova constituídos por vários tipos de argamassas (incluindo argamassas com fibras e com materiais recicláveis) a fim de possibilitar um estudo estatístico.
- ✓ Desenvolver ensaios experimentais de fadiga em corpos-de-prova com várias geometrias, variando-se a frequência de carregamento dos mesmos com a finalidade de se avaliar a influência destes fatores no comportamento à fadiga das argamassas de revestimento.
- ✓ Conceber uma metodologia de ensaio experimental que empregue painéis constituídos por argamassa de emboço/argamassa colante e cerâmica (com ou sem

rejunte) submetidos a carregamento cíclicos, tornando mais real a avaliação da fadiga em sistemas de revestimentos de fachadas.

- ✓ Desenvolver um modelo numérico que represente as argamassas de revestimento frente ao fenômeno da fadiga sob compressão. Isto possibilitará uma flexibilidade na análise a partir da variação das condições de contorno, o que permitirá a adoção de um projeto de fachada mais seguro.
- ✓ Realizar ensaios sob fadiga na argamassa colante e nas interfaces emboço/argamassa colante/cerâmica, considerando que estas camadas são regiões críticas propícia ao aparecimento da fadiga dos materiais.
- ✓ Desenvolver ensaios que possibilitem o levantamento das movimentações higroscópicas decorrentes da absorção e da evaporação de água, das vibrações (por exemplo, no caso de paredes com ar-condicionado) e das movimentações nos encontros alvenaria/pilar na região das juntas.
- ✓ Verificar a possibilidade de se empregar argamassas poliméricas em revestimentos de fachadas.
- ✓ Determinar quais as características geométricas e mecânicas da argamassa de emboço para se evitar o aparecimento de microfissuras.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13755**: Revestimento de paredes externas e fachadas com placas cerâmicas e com utilização de argamassa colante – Procedimento. Rio de Janeiro, 1996.

\_\_\_\_\_. **NBR 13281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e teto - Requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 13818**: Placas cerâmicas para revestimento – Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_. **NBR 13529**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Terminologia. Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_. **NBR 14992**: Argamassa à base de cimento Portland para rejuntamento de placas cerâmicas – Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

\_\_\_\_\_. **NBR 6467**: Agregados - Determinação do inchamento do agregado miúdo. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR 14081**: Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas - Especificação. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR 14083**: Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas. Determinação do tempo em aberto – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR 13277**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos. Determinação da retenção de água – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 15258**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos. Argamassa pra revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência potencial de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos. Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 15259**: Argamassa para revestimento de paredes e tetos –Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005.

- \_\_\_\_\_. **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.
- \_\_\_\_\_. **NBR 15261:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear). Rio de Janeiro, 2005.
- \_\_\_\_\_. **NBR 13280:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2005.
- \_\_\_\_\_. **NBR 13279:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2005.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 47:** Determinação do teor de ar em concreto fresco – Método pressométrico. Rio de Janeiro, 2002.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2001.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 46:** Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75µm por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.
- \_\_\_\_\_. **NBR 5738:** Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro, 2003.
- \_\_\_\_\_. **NBR 5739:** Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7222:** Argamassa e concreto - Determinação da resistência à tração por compressão. Rio de Janeiro, 1994.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C780:** Standard test method for preconstruction and construction evaluation of mortars for plain and reinforced unit masonry. Easton, 1996.
- ALVES, N. J. D. **Avaliação dos aditivos incorporadores de ar em argamassas de revestimento.** Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, 2002, 175 p.
- ARAÚJO JR, J.M de. **Contribuição ao estudo das propriedades físico-mecânicas das argamassas de revestimento.** Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, 2004, 175p.
- ARRIVABENE, V. **Resistência dos materiais.** São Paulo: Makron *Books*, 1994.

- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTO. **Especificação de placas cerâmicas**. Disponível em: <<http://www.anfacer.org.br/>>. Acesso 14 de ago. 2009.
- BALBO, J. T.; SEVERI, A. A. (2002). **Thermal gradients in concrete pavements in tropical environment: an experimental appraisal**. Journal of the Transportation Research Board, Washington, 2002, v. 1809, p. 12-22.
- BALBO, J.T. **Fatos, mitos e falácias sobre os modelos experimentais de fadiga**. In: Anais da 32ª Reunião Anual de Pavimentação. Brasília: ABPv, 2000, v. 1, pp. 391-404.
- BASTOS, P. K. X. **Retração e desenvolvimento de propriedades mecânicas de argamassas mistas de revestimento**. Tese de Doutorado do Programa de Pós-graduação em Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2001, 172 p.
- BAUER, E (Coord.). **Revestimentos de argamassa: características e peculiaridades**. Distrito Federal: Sinduscon, 2005.
- BAUER, E. **Revestimentos cerâmicos**. Brasília: UnB, 2005b. (Material de suporte para a disciplina Sistemas de Revestimentos do Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil).
- CÂNDIA, M. C.; FRANCO, L. S. **Contribuição ao estudo das técnicas de preparo da base no desempenho dos revestimentos de argamassa**. São Paulo: EPUSP, 1998. 13 p. (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia e Construção Civil, BT/PCC/223).
- CARASEK, H. **Aderência de argamassas à base de cimento portland a substratos porosos: avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação**. Tese de Doutorado do Programa de Pós-graduação em Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1996, 285 p.
- CERVO, T. C. **Estudo da resistência à fadiga de concretos de cimento portland para pavimentação**. Tese de Doutorado do Programa de Pós-graduação em Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004, 220 p.
- CICHINELLI, G.; BORGES, C.; MEDEIROS, J.S. **Patologias cerâmicas**. Revista Técnica, ed. 116, nov. 2006.
- CINCOTTO, M. A.; SILVA, M. A. C; CARASEK, H. **Argamassas de revestimento: Características, propriedades, e métodos de ensaios**. São Paulo: IPT, 1995. 118 p. (Boletim Técnico do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, n. 68).
- CREPALDI, A. A. P.; DJANIKIAN, J. G. **Contribuição ao estudo da fadiga do concreto**. São Paulo: EPUSP, 2001. 19 p. (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia e Construção Civil, BT/PCC/276).
- COLLINS, J. A. **Failure of Materials in Mechanical Design: Analysis, Prediction, Prevention**. New York: John Wiley & Sons, 1993.

- COOK, D. J.; CHINDAPRASIRT, P. **Influence of loading history upon the compressive properties of concrete**. Magazine of Concrete Research, v. 32, n. 111, p. 89-100, 1980.
- DO Ó, S. W. **Análise da retenção de água em argamassas de revestimento aditivadas**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, 2004, 173 p.
- FIORITO, A. J. S. I. **Manual de argamassas e revestimentos: estudos e procedimentos de execução**. São Paulo: Pini, 1994.
- GONÇALVES, S. R. C. **Variabilidade e fatores de dispersão da resistência de aderência nos revestimentos em argamassa – estudo de caso**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, 2004, 153 p.
- GONÇALVES, S. R. de C.; BAUER, E. **Estudo de caso da variação da resistência de aderência à tração em uma parede**. In: Anais do VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas. Florianópolis: SBTA/UFSC, 2005.
- HSU, T. C. **Fatigue of plain concrete**. ACI Journal - Proceedings, v. 78, p. 292-304, 1981.
- JUNGINGER, M. **Rejuntamento de revestimentos cerâmicos: influência das juntas de assentamento na estabilidade de painéis**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-graduação em Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2003, 141 p.
- LI, H.; ZHANG, M.; OU, J. **Flexural fatigue performance of concrete containing nanoparticles for pavement**, v. 29, edição 7, julho 2007, pagina 1292-1301.
- KAZMIERCZAK, C.S.; BREZEZINSKI, D.E.; COLLATTO, D. 2007. **Influência das características da base na resistência de aderência à tração e na distribuição de poros de uma argamassa**. Revista Estudos Tecnológicos, v. 3, n. 1, p. 47-58, jan./jun. 2007.
- MACIEL, L.L.; BARROS, M.M.S.B; SABBATINI, F.H. **Recomendações para a execução de revestimentos de argamassa para paredes de vedação internas e exteriores e teto**. São Paulo: EPUSP, 1998. (Apostila do programa de construção civil).
- MAGGI, P. L. O. **Comportamento de pavimentos de concreto estruturalmente armados sob carregamentos estáticos e dinâmicos**. Tese de Doutorado da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2004, 200 p.
- MANUAL DE ASSENTAMENTO DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS EM FACHADAS. Disponível em <<http://www.anfacer.org.br/>>. Acesso em 20 mar. 2009.
- MEDEIROS, J.S.; SABBATINI, F.H. **Tecnologia e projeto de revestimentos cerâmicos de fachadas de edifícios**. São Paulo: EPUSP, 1999. 28 p. (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia e Construção Civil, BT/PCC/246).

- METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto – estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994.
- NAKAKURA, E. H.; CINCOTTO, M.A. **Análise dos requisitos de classificação de argamassas de assentamento e revestimento**. São Paulo: EPUSP, 200. 19 p. (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia e Construção Civil, BT/PCC/359).
- PAES, I.N.L. **Avaliação do transporte de água em revestimentos de argamassa nos momentos iniciais pós-aplicação**. Tese de Doutorado do Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, 2004, 242 p.
- PAES, I.N.L.; CARASEK, H. **Desempenho das argamassas de rejuntamento no sistema de revestimento cerâmico**. Revista Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 2, n. 2, p. 93-103, abr./jun. 2002.
- PASTOUKHOV, V. A.; VOORWALD, H. J. C. **Introdução à mecânica da integridade estrutural**. São Paulo: UNESP, 1995.
- PEREIRA, C. H. A. F. **Contribuição ao estudo da fissuração, da retração e do mecanismo de descolamento do revestimento à base de argamassa**. Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, 2007, 195 p.
- RIBEIRO, A. **Fadiga dos Materiais**. Portugal: UTAD, 2002. (Material de Apoio do Departamento de Engenharias).
- SARAIVA, A. G. **Contribuição ao estudo de tensões de natureza térmica em sistemas de revestimento cerâmico de fachada**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, 1998, 164p.
- SABBATINI, F.H; BARROS, M. M. S. B. **Revisão do texto original Recomendações para produção de revestimentos cerâmicos para paredes de vedação em alvenaria**. São Paulo: EPUSP, 1990. (Relatório técnico R06-06/90 – EP ENCOL-6. Agosto, 2001. Texto não publicado).
- SARAIVA, A. G.; BAUER, E.; BEZERRA, L. M. **Análise das tensões entre argamassa colante e placas cerâmicas submetidas a esforços de natureza térmica**. Revista Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 2, n. 2, p. 47-56, abr./jun. 2002.
- SCHIJVE, J. **Fatigue of structures and materials**. Dordrecht: Ed. Kluwer Academic Publishers, 2001.
- SELMO, S. M. S. (1989). **Dosagem de argamassas de cimento portland e cal para revestimento externo dos edifícios**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-graduação em Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1989, 187p.
- SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C.R. **Mechanical Engineering Design**. New York: McGraw-Hill, 1989.

- SILVA, C.O.; CINCOTTO, M.A. **Análise crítica dos requisitos, critérios e ensaios para argamassa colante**. Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil - E-mat, v. 1, n. 2, p. 128-147, nov. 2004.
- TEPFERS, R.; KUTTI, T. **Fatigue strength of plain, ordinary e lightweight concrete**. ACI Journal, v. 76, n. 29, p. 635-652, 1979.
- THOMAZ, E. **Cerâmicas vermelhas**. Revista Técnica. Disponível em: <<http://www.revistatechne.com.br/engenharia-civil/129/artigo69004-1.asp>>. Acesso 14 de out. 2009.
- TIMOSHENKO, S. **Theory of elastic stability**. 2. ed. New York : McGraw-Hill Book Company, 1961.
- UCHÔA, J. C. B. **Procedimento numérico e experimental para a avaliação da resistência à fadiga de sistema de revestimento**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, 2007, 159p.
- UCHÔA, J.C.B.; BEZERRA, L.M.; BAUER, E.; DAS CHAGAS, S. V. M.; ARAÚJO, J. **Análise experimental da resistência à fadiga de sistemas de revestimentos**. In: Anais do 50º Congresso Brasileiro do Concreto. Salvador: IBRACON, 2008.
- ZANOTTO, E.D., MIGLIORE Jr. A. R. **Propriedades mecânicas de materiais cerâmicos : Uma introdução**. Revista Cerâmica, v. 37, n. 247, p. 07-16, jan./fev. 1991.
- ZHANG, B.; PHILLIPS, D. V.; WU, K. **Further research on fatigue properties of plain concrete**. Magazine of Concrete Research, v. 49, n. 78, p. 241-252, 1997.
- ZHANG, B.; PHILLIPS, D. V.; WU, K. **Effect of loading frequency and stress reversal of fatigue life of plain concrete**. Magazine of Concrete Research, v. 48, n. 177, p. 361-375, 1996.



## **APÊNDICES**

## APÊNDICE A – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais empregados nas argamassas mistas desta pesquisa, podem ser visualizados abaixo. As Tabelas A.1 e A.2 mostram, respectivamente, os resultados dos ensaios de massa específica aparente e de massa específica real da cal

Tabela A. 1 – Massa específica aparente da cal.

	<b>Amostra 1</b>	<b>Amostra 2</b>	<b>Amostra 3</b>
Massa da cal (kg)	1,4694	1,4329	1,4245
Volume recipiente (dm <sup>3</sup> )	2,7745		
<b>Massa unitária (kg/dm<sup>3</sup>)</b>	0,53	0,52	0,51
<b>MÉDIA</b>	0,52		
<b>DESVIO PADRÃO</b>	0,01		
<b>CV (%)</b>	1,66		

Tabela A. 2 – Massa específica real da cal.

Massa (g)	37,66
Leitura inicial (cm <sup>3</sup> )	0,7
Leitura final (cm <sup>3</sup> )	22,8
Volume (cm <sup>3</sup> )	22,1
<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>1,704</b>

Nas Tabelas abaixo é possível visualizar os resultados dos ensaios de caracterização do cimento. As Tabelas A.3, A.4, A.5, A.6 A.7, A.8, A.9 e A.10 mostram, respectivamente, a pasta de consistência normal, a massa específica real, a massa unitária, a expansibilidade a quente e a frio, a resistência mecânica aos 3, 7 e 28 dias.

Tabela A. 3 – Pasta de consistência normal do cimento.

Massa de cimento (g)	500
Massa de água (g)	146
<b>Água da pasta de consistência normal (%)</b>	29,2
<b>Início de pega (hora:min.)</b>	03:46
<b>Fim de pega (hora:min.)</b>	04:40

Tabela A. 4 – Massa específica real do cimento.

Massa (g)	57,85
Leitura inicial (cm <sup>3</sup> )	0,4
Leitura final (cm <sup>3</sup> )	18,7
Volume (cm <sup>3</sup> )	18,3
<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>3,161</b>

Tabela A. 5 – Massa unitária do cimento.

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Massa do cimento (kg)	3,026	2,8805	2,9003
Volume recipiente (dm <sup>3</sup> )	2,7745		
<b>Massa unitária (kg/dm<sup>3</sup>)</b>	1,09	1,04	1,05
<b>MÉDIA</b>	1,06		
<b>DESVIO PADRÃO</b>	0,03		
<b>CV (%)</b>	2,69		

Tabela A. 6– Expansibilidade a quente do cimento.

	CP 1	CP 2	CP 3
Leitura antes do aquecimento (mm)	1	1	1
Leitura após ebulição (mm)	1,6	1,7	1,8
<b>Expansibilidade a quente (mm)</b>	0,6	0,7	0,8
<b>MÉDIA</b>	0,7		
<b>DESVIO PADRÃO</b>	0,1		
<b>CV (%)</b>	14,3		

Tabela A. 7 – Expansibilidade a frio do cimento.

	CP 1	CP 2	CP 3
Leitura após a moldagem (mm)	0	0	0
Leitura após 7 dias (mm)	1,5	1,6	1,8
<b>Expansibilidade a frio (mm)</b>	1,5	1,6	1,8
<b>MÉDIA</b>	1,6		
<b>DESVIO PADRÃO</b>	0,2		
<b>CV (%)</b>	9,4		

Tabela A. 8 – Resistência à compressão do cimento aos 3 dias.

	CP1	CP2	CP4
Massa (g)	447,10	446,70	451,20
Diâmetro (cm)	5,03	5,04	5,05
Altura (cm)	10,01	10,05	10,02
Área (cm <sup>2</sup> )	19,87	19,95	20,03
Carga de ruptura (kgf)	5.360,00	5.450,00	5.430,00
<b>Resistência à compressão (Mpa)</b>	26,97	27,32	27,11
<b>MÉDIA</b>	27,13		
<b>DESVIO RELATIVO MÁXIMO (%)</b>	0,59		

Tabela A. 9 – Resistência à compressão do cimento aos 7 dias.

	CP1	CP2	CP3
Massa (g)	448,70	451,20	449,90
Diâmetro (cm)	5,10	5,20	5,10
Altura (cm)	9,95	10,55	9,98
Área (cm <sup>2</sup> )	20,43	21,24	20,43
Carga de ruptura (kgf)	6.420,00	6.140,00	6.450,00
<b>Resistência à compressão (Mpa)</b>	31,43	28,91	31,57
<b>MÉDIA</b>	30,64		
<b>DESVIO RELATIVO MÁXIMO (%)</b>	5,63		

Tabela A. 10 – Resistência à compressão do cimento aos 28 dias.

	CP1	CP2	CP3
Massa (g)	454,00	454,20	453,60
Diâmetro (cm)	5,02	5,04	5,02
Altura (cm)	9,95	10,02	10,04
Área (cm <sup>2</sup> )	19,75	19,95	19,79
Carga de ruptura (kgf)	7.840,00	8.530,00	8.070,00
<b>Resistência à compressão (Mpa)</b>	39,69	42,76	40,77
<b>MÉDIA</b>	41,07		
<b>DESVIO RELATIVO MÁXIMO (%)</b>	4,10		

As Tabelas abaixo mostram os resultados dos ensaios de caracterização da areia. As Tabelas A.11, A.12, A.13 mostram, respectivamente, o material pulverulento, a massa específica e a massa unitária.

Tabela A. 11 – Material pulverulento da areia.

	Amostra 1	Amostra 2
Massa inicial (g)	1000,00	1000,00
Massa final (g)	959,00	964,50
<b>Teor de material puerulento (%)</b>	4,10	3,55
<b>MÉDIA</b>	3,83	
<b>DESVIO PADRÃO</b>	0,39	
<b>CV (%)</b>	10,17	

Tabela A. 12 – Massa específica da areia.

	Amostra 1	Amostra 2
Leitura (cm <sup>3</sup> )	389,00	390,00
<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,646	2,632
<b>MÉDIA</b>	2,639	
<b>DESVIO PADRÃO</b>	0,01	
<b>CV (%)</b>	0,37	

Tabela A. 13 – Massa unitária da areia.

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Massa do agregado (kg)	22,34	22,46	22,71
Volume recipiente (dm <sup>3</sup> )	14,00	14,00	14,00
<b>Massa unitária (kg/dm<sup>3</sup>)</b>	1,60	1,60	1,62
<b>MÉDIA</b>	1,61		
<b>DESVIO PADRÃO</b>	0,01		
<b>CV (%)</b>	0,83		

## APÊNDICE B – CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

Tabela B. 1 – Retenção de água das argamassas.

		AM1	AM2	AM3	AMméd	AI1	AI2	AI3	AI Méd
Massa do conjunto vazio (g)		1165,8	1162,9	1160,0		1160,6	1160,9	1161,9	
Massa do conjunto com argamassa (g)		2218,8	2231,9	2239,5		2101,2	2098,3	2077,4	
Massa do conjunto após sucção (g)	1 min.	2213,6	2215,5	2223,1		2100,6	2098,1	2074,6	
	4 min.	2207,4	2203,1	2212,1		2093,8	2092,8	2068,4	
	7 min.	2204,2	2200,5	2207,9		2089,9	2088,4	2064,1	
	10 min.	2201,2	2199,0	2204,6		2087,2	2085,0	2061,0	
	13 min.	2198,7	2197,8	2203,4		2083,7	2082,3	2058,5	
	15 min.	2192,8	2197,1	2203,1		2082,3	2080,8	2056,2	
Massa total de água acrescentada a mistura (g)		345,8				400,0			
Massa de argamassa (g)		2154,2				2500,0			
Fator água/argamassa fresca		0,1				0,1			
<b>Retenção de água (%) - NBR 13277/2005</b>	1 min.	96	89	89	91	100	100	98	99
	4 min.	92	81	82	85	94	96	93	94
	7 min.	90	79	79	83	91	92	89	91
	10 min.	88	78	77	81	89	90	87	89
	13 min.	86	77	76	80	87	88	85	86
	15 min.	82	76	76	78	85	86	83	85
<b>MÉDIA</b>		78				85			
<b>DESVIO PADRÃO</b>		3,6				1,7			
<b>CV (%)</b>		4,5				2,0			

Tabela B. 2 – Densidade de massa das argamassas.

	AM1	AM2	AM3	AI1	AI2	AI3
Massa arg. (g)	1.142,40	1.144,90	1.140,30	1.042,50	1.043,20	1.041,50
Massa rec. vazio (g)	450,10					
Volume rec (cm <sup>3</sup> )	401,80					
<b>Densidade de massa (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1.723	1.729	1.718	1.474	1.476	1.472
<b>MÉDIA</b>	1.723			1.474		
<b>DESVIO PADRÃO</b>	5,7			2,1		
<b>CV (%)</b>	0,3			0,1		

Tabela B. 3 – Teor de ar incorporado das argamassas.

	AM1	AM2	AM3	AI1	AI2	AI3
<b>Teor de ar (%)</b>	7,0	6,5	6,5	17,0	18,0	19,0
<b>MÉDIA</b>	6,7			18,0		
<b>DESVIO PADRÃO</b>	0,3			1,0		
<b>CV (%)</b>	4,3			5,6		

Tabela B. 4 – Penetração de cone das argamassas.

	AM1	AM2	AM3	AI1	AI2	AI3
<b>Penetração (mm)</b>	59	62	64	60	59	56
<b>MÉDIA</b>	61,7			58,3		
<b>DESVIO PADRÃO</b>	2,5			2,1		
<b>CV (%)</b>	4,1			3,6		

Tabela B. 5 – Mesa de consistência das argamassas.

	AM1	AM2	AM3	AI1	AI2	AI3
Diâmetro <sub>1</sub> (mm)	293	285	296	242	253	243
Diâmetro <sub>2</sub> (mm)	279	289	289	245	253	245
Diâmetro <sub>3</sub> (mm)	288	300	292	243	256	241
<b>Espalhamento (mm)</b>	287	291	293	243	254	243
<b>MÉDIA</b>	290			247		
<b>DESVIO PADRÃO</b>	3,10			6,28		
<b>CV (%)</b>	1,07			2,54		

## APÊNDICE C – CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

Tabela C. 1 – Capilaridade das argamassas.

	AM1	AM2	AM3	AI1	AI2	AI3
Massa inicial (g)	423,38	430,4 5	428,3 6	369,5 8	369,0 0	365,2 5
Massa aos 10 minutos (g)	426,12	432,9 9	431,0 2	373,6 7	373,3 9	369,2 7
<b>Absorção por capilaridade aos 10 minutos (g/cm<sup>2</sup>)</b>	0,17	0,16	0,17	0,26	0,27	0,25
<b>MÉDIA</b>	0,17			0,26		
Massa aos 90 minutos (g)	429,71	436,9 2	435,2 5	377,1 1	376,2 6	372,3 5
<b>Absorção por capilaridade aos 90 minutos (g/cm<sup>2</sup>)</b>	0,40	0,40	0,43	0,47	0,45	0,44
<b>MÉDIA</b>	0,41			0,46		
<b>Coefficiente de capilaridade (g/dm<sup>2</sup>.min<sup>1/2</sup>)</b>	1,8	2,0	2,1	1,7	1,4	1,5
<b>MÉDIA</b>	2,0			1,6		
<b>DESVIO RELATIVO MÁXIMO</b>	8,3			8,3		

Tabela C. 2 – Densidade de massa das argamassas.

	AM1	AM2	AM3	AI1	AI2	AI3
Altura (cm)	4,02	3,98	3,99	4,00	4,02	4,02
Largura (cm)	4,04	4,02	4,03	3,96	4,00	3,96
Comprimento (cm)	16,06	16,07	16,05	16,04	16,40	16,05
Volume (cm <sup>3</sup> )	260,42	256,4 3	257,8 4	253,6 3	263,5 5	255,2 6
Massa (g)	423,57	427,1 0	424,2 7	364,0 7	368,8 4	366,6 3
<b>Densidade de Massa (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1.626	1.666	1.645	1.435	1.400	1.436
<b>MÉDIA</b>	1.646			1.424		
<b>DESVIO PADRÃO</b>	19,54			20,99		
<b>CV (%)</b>	1,19			1,47		



Tabela C. 3 – Absorção por imersão, índice de vazios e massa específica das argamassas.

	AM1	AM2	AM3	AM4	AI1	AI2	AI3	AI4
Massa da amostra seca (g)	422,60	424,87	417,92	420,81	348,73	354,73	351,37	380,66
Massa da amostra saturada (g)	494,82	496,50	491,07	494,96	466,51	474,32	471,25	494,26
Massa da amostra saturada imersa em água (g)	250,61	251,75	247,67	249,23	221,42	225,44	223,29	241,72
<b>Absorção (%)</b>	17,09	16,86	17,50	17,62	33,77	33,71	34,12	
<b>MÉDIA</b>	17,27				33,87			
<b>DESVIO PADRÃO</b>	0,36				0,22			
<b>CV (%)</b>	2,06				0,64			
<b>Índice de vazios (%)</b>	29,57	29,27	30,05	30,18	48,06	48,05	48,35	
<b>MÉDIA</b>	29,77				48,15			
<b>DESVIO PADRÃO</b>	0,42				0,17			
<b>CV (%)</b>	1,42				0,35			
<b>Massa específica da amostra seca</b>	1,73	1,74	1,72	1,71	1,42	1,43	1,42	
<b>MÉDIA</b>	1,72				1,42			
<b>DESVIO PADRÃO</b>	0,01				0,00			
<b>CV (%)</b>	0,64				0,30			
<b>Massa específica da amostra saturada</b>	2,03	2,03	2,02	2,01	1,90	1,91	1,90	
<b>MÉDIA</b>	2,02				1,90			
<b>DESVIO PADRÃO</b>	0,01				0,00			
<b>CV (%)</b>	0,34				0,14			
<b>Massa específica real</b>	2,46	2,45	2,45	2,45	2,74	2,74	2,74	
<b>MÉDIA</b>	2,45				2,74			
<b>DESVIO PADRÃO</b>	0,00				0,00			
<b>CV (%)</b>	0,08				0,09			

Tabela C. 4 – Aderência à tração das argamassas.

	AM1	AM2	AM3	AM4	AM5	AI1	AI2	AI3	AI4	AI5
Carga de ruptura (N)	570	555	562	503	520	393	335	369	325	323
Área superficial (mm <sup>2</sup> )	2.206	2.198	2.140	2.215	2.181	2.181	2.091	2.157	2.198	2.165
Forma de ruptura	S									
	S/A	X	X	X		X	x			x
	A							x	x	x
	F				X					
<b>Resistência potencial de aderência à tração (MPa)</b>	0,26	0,25	0,26	0,23	0,24	0,18	0,16	0,17	0,15	0,15
<b>MÉDIA</b>	0,25					0,16				
<b>DESVIO ABSOLUTO MÁXIMO</b>	0,01					0,01				
<b>CV (%)</b>	5,95					8,63				

Como os corpos-de-prova ficaram em cura úmida por aproximadamente 6 meses, fez-se novos ensaios para verificar a resistência mecânica das argamassas. Para isso, cortou-se os corpos-de-prova cilíndricos em corpos-de-prova prismáticos, ensaiando-se os mesmos aos 180 dias, conforme será mostrado a seguir.

Tabela C. 5 – Tração na flexão das argamassas aos 28 dias.

	AM1	AM2	AM3	AM4	AM5	AM6	AI1	AI2	AI3	AI4	AI5	AI6
Carga de ruptura (N)	780	800	730	840	800	880	820	820	750	940	820	930
Distância entre os suportes (mm)	98											
<b>Resistência à tração na flexão (MPa)</b>	1,79	1,84	1,68	1,93	1,84	2,02	1,88	1,88	1,72	2,16	1,88	2,14
<b>MÉDIA</b>	1,8						1,9					
<b>DESVIO ABSOLUTO MÁXIMO</b>	0,2						0,2					

Tabela C. 6 – Tração na flexão das argamassas aos 180 dias.

	AM1	AM2	AM3	AI1	AI2	AI3
Carga de ruptura (N)	1.260	1.320	1.550	1.300	1.750	1.480
Distância entre os suportes (mm)	98					
<b>Resistência à tração na flexão (MPa)</b>	2,89	3,03	3,56	2,99	4,02	3,40
<b>MÉDIA</b>	3,2			3,5		
<b>DESVIO ABSOLUTO MÁXIMO</b>	0,3			0,6		

Tabela C. 7 – Compressão das argamassas aos 28 dias.

COMPRESSÃO	AM1	AM2	AM3	AI1	AI2	AI3
Carga máxima aplicada (N)	7.830	7.985	7.800	8.835	8.195	8.085
<b>Resistência à compressão (MPa)</b>	4,89	4,99	4,88	5,27	5,12	5,05
<b>MÉDIA</b>	4,9			5,1		
<b>DESVIO ABSOLUTO MÁXIMO</b>	0,1			0,1		

Tabela C. 8 – Compressão das argamassas aos 180 dias.

	AM1	AM2	AM3	AI1	AI2	AI3
Carga máxima aplicada (N)	11.920,00	10.160,00	9.560,00	11790	12660	13590
<b>Resistência à compressão (MPa)</b>	7,45	6,35	5,98	7,37	7,91	8,49
<b>MÉDIA</b>	6,6			7,9		
<b>DESVIO ABSOLUTO MÁXIMO</b>	0,6			0,56		

Tabela C. 9 – Variação dimensional das argamassas industrializadas.

<b>IDADE DA LEITURA</b>	<b>Leitura (mm)</b>	<b>Variação (mm/m)</b>	<b>Leitura (mm)</b>	<b>Variação (mm/m)</b>	<b>Leitura (mm)</b>	<b>Variação (mm/m)</b>	<b>MÉDIA (mm/m)</b>
Momento da desforma	0,575	-	0,478	-	0,595	-	-
1	0,567	-0,03	0,461	-0,07	0,586	-0,04	-0,05
2	0,565	-0,04	0,448	-0,12	0,563	-0,13	-0,10
3	0,564	-0,04	0,435	-0,17	0,548	-0,19	-0,13
6	0,563	-0,05	0,431	-0,19	0,541	-0,22	-0,15
7	0,555	-0,08	0,425	-0,21	0,537	-0,23	-0,17
8	0,551	-0,10	0,421	-0,23	0,529	-0,26	-0,20
9	0,537	-0,15	0,416	-0,25	0,521	-0,30	-0,23
10	0,532	-0,17	0,408	-0,28	0,516	-0,32	-0,26
13	0,521	-0,22	0,407	-0,28	0,513	-0,33	-0,28
14	0,515	-0,24	0,392	-0,34	0,507	-0,35	-0,31
15	0,508	-0,27	0,368	-0,44	0,498	-0,39	-0,37
16	0,498	-0,31	0,356	-0,49	0,481	-0,46	-0,42
17	0,472	-0,41	0,341	-0,55	0,456	-0,56	-0,51
20	0,467	-0,43	0,335	-0,57	0,440	-0,62	-0,54
21	0,442	-0,53	0,304	-0,70	0,420	-0,70	-0,64
22	0,427	-0,59	0,291	-0,75	0,411	-0,74	-0,69
23	0,416	-0,64	0,287	-0,76	0,391	-0,82	-0,74
24	0,415	-0,64	0,287	-0,76	0,391	-0,82	-0,74
27	0,415	-0,64	0,287	-0,76	0,391	-0,82	-0,74
28	0,415	-0,64	0,287	-0,76	0,391	-0,82	-0,74

Tabela C. 10 – Variação dimensional das argamassas mistas.

<b>IDADE DA LEITURA</b>	<b>Leitura (mm)</b>	<b>Variação (mm/m)</b>	<b>Leitura (mm)</b>	<b>Variação (mm/m)</b>	<b>Leitura (mm)</b>	<b>Variação (mm/m)</b>	<b>MÉDIA (mm/m)</b>
Momento da desforma	0,670	-	0,762	-	0,513	-	-
1	0,664	-0,02	0,753	-0,04	0,506	-0,03	-0,03
2	0,641	-0,12	0,756	-0,02	0,533	0,08	-0,02
3	0,632	-0,15	0,747	-0,06	0,531	0,07	-0,05
6	0,626	-0,18	0,732	-0,12	0,504	-0,04	-0,11
7	0,614	-0,22	0,728	-0,14	0,501	-0,05	-0,14
8	0,602	-0,27	0,725	-0,15	0,496	-0,07	-0,16
9	0,598	-0,29	0,724	-0,15	0,494	-0,08	-0,17
10	0,591	-0,32	0,707	-0,22	0,481	-0,13	-0,22
13	0,585	-0,34	0,691	-0,28	0,477	-0,14	-0,26
14	0,583	-0,35	0,688	-0,30	0,459	-0,22	-0,29
15	0,572	-0,39	0,679	-0,33	0,453	-0,24	-0,32
16	0,561	-0,44	0,671	-0,36	0,447	-0,26	-0,35
17	0,548	-0,49	0,645	-0,47	0,438	-0,30	-0,42
20	0,539	-0,52	0,636	-0,50	0,430	-0,33	-0,45
21	0,522	-0,59	0,632	-0,52	0,423	-0,36	-0,49
22	0,515	-0,62	0,626	-0,54	0,411	-0,41	-0,52
23	0,501	-0,68	0,624	-0,55	0,405	-0,43	-0,55
24	0,485	-0,74	0,618	-0,58	0,389	-0,50	-0,60
27	0,485	-0,74	0,618	-0,58	0,389	-0,50	-0,60
28	0,485	-0,74	0,618	-0,58	0,389	-0,50	-0,60

Tabela C. 11 – Variação de massa das argamassas industrializadas.

<b>IDADE DA LEITURA</b>	<b>Leitura (g)</b>	<b>Variação (%)</b>	<b>Leitura (g)</b>	<b>Variação (%)</b>	<b>Leitura (g)</b>	<b>Variação (%)</b>	<b>MÉDIA (%)</b>
Momento da desfôrma	293,27	-	298,61	-	305,07	-	-
1	290,41	-0,98	296,26	-0,79	302,72	-0,77	-0,84
2	285,66	-2,59	292,66	-1,99	298,84	-2,04	-2,21
3	282,39	-3,71	288,29	-3,46	295,47	-3,15	-3,44
6	281,90	-3,88	287,12	-3,85	294,98	-3,31	-3,68
7	281,45	-4,03	286,78	-3,96	294,56	-3,45	-3,81
8	281,07	-4,16	286,59	-4,03	293,88	-3,67	-3,95
9	280,72	-4,28	286,18	-4,16	293,25	-3,87	-4,11
10	280,51	-4,35	285,98	-4,23	292,80	-4,02	-4,20
13	278,60	-5,00	284,52	-4,72	291,28	-4,52	-4,75
14	278,47	-5,05	284,03	-4,88	290,76	-4,69	-4,87
15	278,08	-5,18	283,66	-5,01	290,33	-4,83	-5,01
16	277,09	-5,52	282,24	-5,48	288,31	-5,49	-5,50
17	276,30	-5,79	281,90	-5,60	287,40	-5,79	-5,72
20	275,20	-6,16	280,52	-6,06	286,84	-5,98	-6,07
21	274,70	-6,33	279,19	-6,50	285,10	-6,55	-6,46
22	273,91	-6,60	278,93	-6,59	284,80	-6,64	-6,61
23	273,21	-6,84	278,42	-6,76	284,75	-6,66	-6,75
24	273,20	-6,84	278,42	-6,76	284,75	-6,66	-6,76
27	273,20	-6,84	278,42	-6,76	284,75	-6,66	-6,76
28	273,20	-6,84	278,42	-6,76	284,75	-6,66	-6,76

Tabela C. 12 – Variação de massa das argamassas mistas.

<b>IDADE DA LEITURA</b>	<b>Leitura (g)</b>	<b>Variação (%)</b>	<b>Leitura (g)</b>	<b>Variação (%)</b>	<b>Leitura (g)</b>	<b>Variação (%)</b>	<b>MÉDIA (%)</b>
Momento da desfôrma	335,31	-	336,02	-	337,56	-	-
1	331,68	-1,08	331,88	-1,23	330,30	-2,15	-1,49
2	329,15	-1,84	329,31	-2,00	324,77	-3,79	-2,54
3	326,62	-2,59	326,24	-2,91	320,12	-5,17	-3,56
6	323,85	-3,42	322,58	-4,00	318,10	-5,76	-4,39
7	320,06	-4,55	319,20	-5,01	315,87	-6,43	-5,33
8	318,07	-5,14	317,83	-5,41	314,55	-6,82	-5,79
9	317,27	-5,38	316,97	-5,67	314,01	-6,98	-6,01
10	316,39	-5,64	316,29	-5,87	313,88	-7,02	-6,18
13	313	-6,65	315,91	-5,98	313,43	-7,15	-6,60
14	312,64	-6,76	314,96	-6,27	313,02	-7,27	-6,77
15	312,31	-6,86	313,88	-6,59	312,90	-7,31	-6,92
16	312,03	-6,94	313,63	-6,66	312,55	-7,41	-7,01
17	311,67	-7,05	312,98	-6,86	312,27	-7,49	-7,13
20	311,24	-7,18	312,80	-6,91	312,02	-7,57	-7,22
21	310,92	-7,27	310,54	-7,58	311,98	-7,58	-7,48
22	310,54	-7,39	310,37	-7,63	311,75	-7,65	-7,56
23	310,41	-7,43	310,37	-7,63	311,75	-7,65	-7,57
24	310,41	-7,43	310,37	-7,63	311,75	-7,65	-7,57
27	310,41	-7,43	310,37	-7,63	311,75	-7,65	-7,57
28	310,41	-7,43	310,37	-7,63	311,75	-7,03	-7,36