

**UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE PÓS GRADUAÇÃO
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL**

DOUGLAS ROGÉRIO LEITE ALENCAR

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA FADIGA MECÂNICA EM ARGAMASSAS
COLANTES**

**RECIFE
2020**

DOUGLAS ROGÉRIO LEITE ALENCAR

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA FADIGA MECÂNICA EM ARGAMASSAS
COLANTES**

Dissertação apresentada como requisito final para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Materiais de Construção Civil, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP.

Orientador: Prof. Dr. Angelo Just da Costa e Silva

Coorientador: Prof. Dr. Sandro Marden Torres

RECIFE

2020

FICHA CATALOGRÁFICA

ALENCAR, DOUGLAS ROGÉRIO LEITE

Análise experimental da Fadiga Mecânica em Argamassas Colantes
[Recife] 2020.

xvi, 100p. 210x297 mm (UNICAP, Mestrado, Engenharia Civil, 2020).

Dissertação de Mestrado – Universidade Católica de Pernambuco. Centro de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil

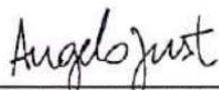
UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE PÓS GRADUAÇÃO
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

Análise experimental da fadiga mecânica em argamassas colantes

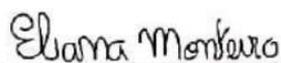
Douglas Rogério Leite Alencar

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADO (A) POR:



PROF. DR. ANGELO JUST DA COSTA E SILVA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UNICAP
(Orientador)



PROF. DR. ELIANA CRISTINA BARRETO MONTEIRO
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – UNICAP
(Examinadora Interna)



PROF. DR. JOÃO MANOEL DE FREITAS MOTA
Instituto Federal de Pernambuco - IFPE
(Examinador Externo)

RECIFE/PE, 29 DE SETEMBRO DE 2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Grande Espírito que rege e é a própria existência o qual chamo de Deus, pois toda a energia que me compõe buscou e se fez favorável a este acontecimento. A busca por conhecimento e por esta Titulação de Mestre foi possível graças ao Mesmo e graças a diversas pessoas ao longo de minha vida que contribuíram direta ou indiretamente. São amigos, colegas de trabalho, parceiros e adversários. Todos de alguma forma contribuíram.

Agradeço a minha saudosa Mãe, que sempre mostrou confiança em meu potencial, assim como minha irmã e sobrinha. Agradeço pela paciência e sacrifício de minha ausência em prol deste trabalho.

Agradeço à Universidade Católica de Recife, que me recebeu de braços abertos e me proporcionou a oportunidade de mostrar que eu era capaz.

Agradeço a meu Orientador e Coorientador, que trabalharam comigo com parceria, sem vaidades, sem rivalidades acadêmicas, dedicando tempo não remunerado por puro interesse científico e de compromisso com seu orientado.

Agradeço ao apoio dos colegas acadêmicos e a oportunidade de ampliar minha “network” com os mesmos nesta grande rede de profissionais.

Agradeço aos meus colegas e superiores das Empresas Asea Brown Boveri (ABB) e General Eletric (GE), que além de incentivar, me permitiram de forma compreensiva pausar minhas atividades em Obras para poder realizar este sonho de ser Mestre.

Agradeço à Universidade Federal da Paraíba que através de seus colaboradores me auxiliaram e me concederam o uso de seus equipamentos de Laboratório.

Agradeço ao fabricante pela doação das argamassas industrializadas para a pesquisa e o parabenizo pelo interesse em apoiar a pesquisa científica e aprimorar continuamente seu produto.

Agradeço ao Senai em Jabotão dos Guararapes PE e a Tecomat pelo auxílio na realização dos ensaios de caracterização das argamassas.

A todos, os meus sinceros agradecimentos.

“In memoriam” de Estanislau Gomes de Alencar

Meu pai

RESUMO

Material comumente utilizado nas edificações, as argamassas colantes estão presentes em fachadas, paredes e pisos, compondo um sistema de revestimento que devido a sua situação de contato direto com o meio ambiente, está sujeita a tensões que podem variar com o tempo. O trabalho apresentado nesta dissertação, objetivou-se ao estudo experimental de 04 tipos de argamassas colantes classificadas provisoriamente para a pesquisa como A, B, C e D, para avaliação de seus comportamentos quando submetidos à esforços cíclicos. Essas argamassas foram classificadas quanto a consistência, tempo em aberto, deslizamento, resistência de aderência, resistência à compressão, resistência estática à tração na flexão, módulos de elasticidade estático e dinâmico e fadiga na tração por flexão. Para isso foram moldados 180 corpos de prova prismáticos e 12 cilíndricos. Os estudos de ruptura à fadiga foram realizados através de ensaio de tração na flexão com frequência fixa de 10 Hz, usando as relações de tensão 0,9 0,8 0,7 e 0,6 da tensão de ruptura estática. As quantidades de ciclos até suas rupturas foram registradas e usadas para a obtenção de gráficos Tensão-Deformação de cada material. Os resultados mostraram que o material estudado apresenta elevado coeficiente de variação quanto mais próximas as cargas de atuação estiverem dos limites de ruptura, vida à fadiga entre 10^4 e 10^5 ciclos e ausência de patamar de limite de resistência à fadiga no intervalo de tensões relativas usadas. A argamassa B apresentou a maior incerteza e menor número de ciclos médio, e a Argamassa C apresentou o melhor resultado neste quesito. Com relação aos módulos de elasticidade, as argamassas com menores módulos apresentaram maiores números de ciclos à fadiga. Após os ensaios de caracterização realizados nos 4 tipos de argamassas colantes, as argamassas puderam ser classificadas como ACI para as argamassas A, B e C e ACII para a D, de acordo com a NBR NBR 14081-1 a 5.

Palavras –chaves: Fadiga em argamassas. Curso S-N de argamassas colantes. Sistema de revestimento. Argamassas colantes. Esforços cíclicos.

ABSTRACT

Material commonly used in buildings, adhesive mortars are present on facades, walls and floors, composing a coating system that, due to its situation of direct contact with the environment, is under tensions that may vary with time. The study hereby performed and presented in this document, is the experimental study of adhesive mortars previously classified as A, B, C and D. These mortars were classified according to consistency, open time, slip, adhesion resistance, compression resistance, static tensile strength in flexion, static and dynamic elasticity modules and fatigue in flexion tensile. For this, 180 prismatic and 12 cylindrical specimens were molded. The fatigue failure studies were carried out through a tensile test in flexion with a fixed frequency of 10 Hz, using the stress ratios 0.9, 0.8, 0.7 and 0.6 of the static rupture stress. The number of cycles until their ruptures were recorded and used to obtain S-N graphs for each material. The results showed that the studied material presents a high coefficient of variation the closer the actuation loads are to the breaking limits, fatigue life between 10^4 and 10^5 cycles, absence of fatigue resistance limit in the range of relative stresses used. Mortar B presented the greatest uncertainty and the lowest number of average cycles and Mortar C presented the best result in this regard. Regarding the elasticity modules, mortars with smaller modules showed higher numbers of fatigue cycles. After the characterization tests carried out on the 4 types of adhesive mortars, the mortars could be classified as ACI for mortars A, B and C and ACII for D, according to NBR NBR 14081-1 to 5.

KeyWords: Mortar fatigue. S-N course of adhesive mortars. Coating system. Adhesive mortars. Cyclic efforts.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Rocha granítica exposta às variações de temperatura. Zona rural do município de Olho D'água – PB. Nordeste Brasileiro-----	13
Figura 2- Edifício com deslocamento de revestimento cerâmico-----	14
Figura 3 - Camadas do Sistema de Revestimento em paredes-----	17
Figura 4 - Camadas do sistema de revestimento em pisos-----	18
Figura 5 e 06 – Ilustração das camadas do sistema de revestimento-----	19
Figura 7 – Previsões de temperatura par as cidades de Recife, Manaus e São Paulo em 20/06/2020-----	20
Figura 8 - Mercados de Argamassas no Brasil-----	22
Figura 9 – Tipos de carregamento cíclicos-----	24
Figura 10 – Diagrama S-N ou Curva de Wöhler-----	25
Figura 11 – Curva S-N para sete ligas metálicas-----	26
Figura 12 - Concentrações de tensões em detalhes geométricos de uma peça mecânica de teste-----	27
Figura 13- Representação de Curva de propagação de trincas por fadiga típica-----	28
Figura 14 – Processo de redistribuição de tensões na formação de fissuras-----	28
Figura 15 – Estágios da ruptura numa seção de aço ensaiado à fadiga por flexão-----	30
Figura 16 - Ondulações do avanço da microfissura no ensaio cíclico-----	30
Figura 17 – Tipos de fraturas por tração axial-----	31
Figura 18- Curvas características de Tensão versus deformação dos materiais-----	33
Figura 19 - Tensão-deformação do concreto sob carregamento cíclico de compressão-----	33
Figura 20 – Curvas tensão-deformação do concreto e seus constituintes-----	34
Figura 21 – Influência da duração da velocidade de carregamento na resistência e na capacidade de deformação-----	38
Figura 22 – Representação simbólica da ligação atômica nos materiais-----	41
Figura 23 – Representação simbólica da ligação atômica durante a deformação elástica de um material-----	41
Figura 24 – Propagação da fissura por rompimento interatômico-----	42

Figura 25 – Micrografia de varredura por sonda. Mostra uma falha (lacuna) na estrutura atômica do material Silício-----	42
Figura 26 – Propagação da temperatura ao longo das camadas do sistema de revestimento-----	45
Figura 27 – Ilustração esquemática de expansão térmica linear-----	48
Figura 28 – Ilustração esquemática de camadas de revestimento em expansão-----	49
Figura 29 – Gráfico da deformação em função da variação da temperatura-----	51
Figura 30 – Gráfico da tensão em função da variação da temperatura-----	51
Figura 31 – Variação das tensões em função da dimensão do revestimento cerâmico-----	53
Figura 32 –Deslocamento devido à compressão do pano de revestimento-----	53
Figura 33 – Painéis de revestimento e posicionamento das juntas de movimentação segundo critérios da NBR 13755:2017-----	54
Figura 34 – Configuração simples das juntas de movimentação-----	55
Figuras 35 e 36 – Ensaio de Tração por compressão diametral e de Tração na Flexão-----	57
Figura 37 – Organograma da pesquisa-----	58
Figura 38 – Ilustração do dispositivo de carga para a determinação da resistência à tração na flexão-----	60
Figura 39 - Aparelho de pulso elétrico de baixa frequência ultra-sônica usado para obtenção dos módulos dinâmicos-----	61
Figura 40 – Exemplo de compressômetro com base dependente. Aparelho usado para a obtenção dos módulos de elasticidade estático-----	62
Figura 41 – Misturador Mecânico e acessórios-----	63
Figura 42 – Flow Table e molde rígido-----	64
Figuras 43 e 44 – Determinação do índice de Consistência-----	64
Figuras 45 e 46 – Moldagem dos corpos de prova-----	65
Figuras 47 e 48 – Moldagem dos corpos de prova prismáticos-----	65
Figuras 49, 50 e 51 – Moldagem dos corpos de prova prismáticos-----	66
Figura 52 – Ilustração da distribuição das placas sobre a argamassa estendida-----	68
Figuras 53 e 54 – AC tipo A – Moldagem e Cura Submersa-----	69

Figuras 55 – AC tipo A – Fixação de Suportes para ensaio de Aderência	69
Figuras 56 e 57 – Cura em estufa AC tipo B e C e Deslizamento	69
Figuras 58 e 59 – Ensaio de resistência de aderência	70
Figura 60 -Ilustração da NBR 14081-3:2015	71
Figura 61 – Ensaio de Compressão	72
Figuras 62 e 63 – Ensaio de módulo de elasticidade dinâmico	75
Figura 64 – Sevorpulser Shimatzu E-type Load Frame com o Software Controller 4890 – Imagens do catálogo do Fabricante	76
Figuras 65 e 66 – Montagem dos acessórios para a fixação dos corpos de prova	77
Figuras 67 e 68 – Ensaio de Tração na Flexão com carregamento cíclico	77
Figuras 69 e 70 – Ensaio de Tração na Flexão com carregamento cíclico	77
Figuras 71 e 72 – Ensaio de Tração na Flexão com carregamento cíclico e amostras após o rompimento	78
Figura 73 – Curva S-N das Argamassas ensaiadas, objetos deste estudo	83
Figura 74 - Curva S-N das Argamassas colantes. Tensão de tração versus logaritmo de N	85
Figura 75 – Análise de dispersão de dados – Notas de Aula	86
Figura 76 – Gráfico mostrando a relação entre o coeficiente de variação em função da relação de carregamento	86
Figura 77 – Análise da dispersão dos dados para a argamassa A	87
Figura 78 – Análise da dispersão dos dados para a argamassa B	87
Figura 79 – Análise da dispersão dos dados para a argamassa C	87
Figura 80 – Análise da dispersão dos dados para a argamassa D	88
Figura 81 – Organograma das argamassas ensaiadas	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Propriedades fundamentais para argamassas colantes-----	23
Tabela 02 – Módulos de elasticidade de concretos comuns-----	35
Tabela 03 – Quantitativo de corpos de prova por ensaio-----	59
Tabela 04 – Dimensões reais dos corpos de prova e medições no aparelho de ultrassom-----	73
Tabela 05 – Dados gerais dos ensaios de módulo de elasticidade dinâmica-----	74
Tabela 06 – Dados da resistência à compressão e módulos de elasticidade estático -----	75
Tabela 07 – Resumo dos resultados de módulos de elasticidade-----	79
Tabela 08 – Dados de ensaios de caracterização-----	79
Tabela 09 – Resultados dos ensaios de tração na flexão – ruptura estática--	80
Tabela 10 – Resumo de dados de tensão de tração e compressão-----	80
Tabela 11 – Tabela geral com os dados dos ensaios de módulo de elasticidade-----	81
Tabela 12 – Resumo com as médias dos módulos de elasticidade-----	81
Tabela 13 – Dados dos ensaios de fadiga para 90% da carga estática-----	82
Tabela 14 – Dados dos ensaios de fadiga para 80% da carga estática-----	82
Tabela 15 – Dados dos ensaios de fadiga para 70% da carga estática-----	82
Tabela 16 – Dados dos ensaios de fadiga para 60% da carga estática-----	82
Tabela 17 – Dados das tensões médias de tração e ciclos médios até a ruptura das amostras-----	83
Tabela 18 – Dados de tensão e Log de N para geração de gráficos – A-----	84
Tabela 19 – Dados de tensão e Log de N para geração de gráficos – B-----	84
Tabela 20 – Dados de tensão e Log de N para geração de gráficos – C-----	84
Tabela 21 – Dados de tensão e Log de N para geração de gráficos – D-----	84
Tabela 22 – Coeficientes de variação dos resultados-----	85

SUMÁRIO

1.0 INTRODUÇÃO	13
1.1 Importância e justificativa	13
1.2 Objetivos	15
1.2.1 Objetivo geral	15
1.2.2 Objetivos específicos	15
1.3 Limitações do estudo	15
1.4 Estrutura da dissertação	16
2.0 REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1 Sistema de Revestimento	17
2.1.1 Argamassas	21
2.2 Fadiga dos Materiais	24
2.2.1 - Introdução	24
2.2.2 Processo de ruptura por fadiga	26
2.2.3 Tipos de fratura	29
2.2.3.1 Fratura dúctil e frágil	31
2.2.4 Fatores que influenciam a vida à fadiga	31
2.2.4.1 Módulo de Elasticidade	32
2.2.4.2 Composição e estado do material	35
2.3 Microestrutura dos Materiais	39
2.3.1 Estrutura molecular	40
2.3.2 Classificação dos materiais	40
2.3.3 Módulo de elasticidade	40
2.3.4 Processo de trincas	42
2.3.5 Dispersão dos resultados de ruptura por fadiga	43
2.4 Termologia	43
2.4.1 Calor e temperatura	44

2.4.2 Dilatação térmica	45
a) Dilatação Linear	45
b) Dilatação Superficial	46
c) Dilatação Volumétrica	47
3.0 EXPERIMENTO	56
3.1 Planejamento dos ensaios	56
3.2 Metodologia dos ensaios realizados	59
3.2.1 Caracterização das argamassas	60
3.2.1.1 Mistura e ensaio de consistência	60
3.2.1.2 Tempo em aberto – Resistência de aderência - Deslizamento.....	60
3.2.1.3 Resistência à tração na flexão	60
3.2.1.3 Resistência à compressão	61
3.2.1.4 Módulo de Elasticidade	61
3.3 Execução dos ensaios	62
3.3.1 Produção das argamassas e moldagem dos corpos de prova..	62
3.3.1.1 Materiais para as Amostras	62
3.3.2 Mistura e ensaio de consistência	63
3.3.3 Moldagem	64
3.3.4 Ensaio de caracterização	66
3.3.5 Tempo em aberto	67
3.3.6 Ensaio de resistência de aderência à tração direta	68
3.3.7 Ensaio de resistência à compressão	72
3.3.8 Ensaio de módulo de elasticidade	72
3.4 Ensaio de fadiga	75
4.0 RESULTADOS	79
4.1 Caracterização das Argamassas	79
4.1.1 Consistência	79

4.1.2 Tempo em aberto, Resistência de aderência e deslizamento.....	79
4.1.4 Resistência à compressão.....	80
4.1.5 Módulos de Elasticidade.....	81
4.2 Ensaios de fadiga nas argamassas.....	81
4.2.1 Curva S-N das argamassas.....	83
4.2.2 Discrepância dos resultados.....	85
4.3 Análise dos resultados.....	88
4.3.1 Análise dos dados de Caracterização das Argamassas.....	88
4.3.1.1 Consistência.....	88
4.3.1.2 Tempo em aberto.....	88
4.3.1.3 Resistência de aderência à Tração.....	88
4.3.1.4 Deslizamento.....	89
4.3.1.5 Módulos de Elasticidade das Argamassas.....	89
4.3.2 Análise dos resultados dos Ensaios de Fadiga.....	90
5.0 CONCLUSÕES.....	94
5.1 Destaques:.....	94
5.2 Dificuldades.....	95
5.3 Sugestões de trabalhos futuros.....	95
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	97

1.0 INTRODUÇÃO

1.1 Importância e justificativa

Argamassas colantes são materiais presentes em diversos tipos de revestimentos aderidos na construção civil atual, seja em fachadas, pisos, áreas molhadas e piscinas, é amplamente consumido, assumindo os mais diversos tipos de tensões e ataques ao longo de sua vida útil. Uma argamassa colante tem a função de aderir e assim manter aderido, ao longo do tempo, os materiais em seu contato direto, onde há variação de tensões causadas por mudanças de temperatura, mudanças de umidade, microrganismos, ação dos ventos, carbonatação, cloretos em regiões litorâneas e piscinas. Não há como “falar” de argamassa colante sem citar os diversos casos de patologias como o descolamento de cerâmicas de fachadas e pisos, estas causadas possivelmente por tensões cíclicas devido às variações de temperatura e outras deformações acima de seus limites de resistência. Apesar deste trabalho não estar focado nesta patologia em específico, cita-se este fenômeno como um exemplo do potencial nível de tensão ao qual estes materiais estão expostos.

A figura 01 mostra uma rocha granítica sã, exposta às variações de temperatura ao longo de anos. Observa-se o surgimento de placas superficiais se desprendendo como cascas. Maia e Nascimento (2018), Pinotti e carneiro (2013), descrevem este fenômeno como esfoliação por deslocamento e esfoliação termal, que ocorre devido a variação de temperatura ao longo de sua profundidade gerando diferenciais de deformação que naturalmente criam superfícies de ruptura. Esta situação ilustra a potencialidade deste fenômeno.

Figura 6 Rocha granítica exposta às variações de temperatura. Zona rural do município de Olho D'água – PB. Nordeste Brasileiro



Fonte: O autor

Na figura 02, vê-se um revestimento em uma edificação citada em Rêgo (2012), com sua camada externa desprendendo-se possivelmente por tensões cíclicas causadas pela variação de temperatura. Nota-se uma semelhança dos fenômenos, gerando uma reflexão. Se uma rocha granítica são, cujas propriedades mecânicas são sabidamente superiores, apresentam o fenômeno do deslocamento, situação semelhante pode ocorrer em uma estrutura de revestimento de uma edificação.

Figura 7 Edifício com deslocamento de revestimento cerâmico



Fonte: Rêgo, 2012

Esse é um provável cenário de fadiga e é por esse motivo que este trabalho foca na análise experimental do comportamento das argamassas colantes em um regime cíclico de tensões.

Estudos sobre o comportamento à fadiga dos materiais têm sido realizados ao longo da história da engenharia, sendo iniciados para os aços na engenharia ferroviária, chegando logo depois aos estudos em concretos impulsados pela engenharia rodoviária, e atualmente expandindo para os demais materiais de construção civil. Um fator importante no maior interesse em estudar determinados materiais sob efeitos dinâmicos vem do entendimento recente da engenharia para o estado não estático de nossas edificações e um maior estudo e conhecimento da microestrutura dos materiais.

Quando se trata de argamassas, percebe-se ainda um limitado número de pesquisas com relação ao seu comportamento em fadiga. Alguns poucos pesquisadores no Brasil e no mundo, fazendo com que os dados dos trabalhos feitos com concretos sejam usados como referência.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem o objetivo de avaliar o comportamento de 04 tipos de argamassas colantes, denominadas previamente como A, B, C e D, diante de esforços de fadiga por meio de ensaios experimentais através de ciclagem mecânica por tração na flexão, em corpos de prova prismáticos.

1.2.2 Objetivos específicos

- Conhecer o comportamento das argamassas colantes por meio de ensaios de caracterização descritos conforme as NBR 14081-2 (ABNT, 2015), 14081-3 (ABNT, 2015), 14081-4 (ABNT, 2018) e 14081-5 (ABNT, 2012), e módulos de elasticidade conforme NBR 15630 (ABNT, 2009) e NBR 8522 (ABNT, 2017);
- Elaborar os gráficos de tensão versus número de ciclos, denominados de curvas S-N ou de Wöhler, obtendo uma forma gráfica de melhor entendimento do comportamento desses materiais em regime de fadiga;
- Verificação da existência de um patamar de resistência a fadiga e sua longevidade conforme as condições de ensaios estabelecidas;
- Verificar a classificação das argamassas A, B, C e D quanto às denominações normativas (ACI, ACII e ACIII).

1.3 Limitações do estudo

- Foram utilizadas amostras de apenas um fornecedor;
- Não foram efetuados estudos de comportamento em campo, apenas em laboratório;
- Este estudo contempla apenas um dos materiais do sistema de revestimentos cerâmicos, neste caso, argamassa colante.

1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos: Introdução, Revisão da literatura, o experimento, os resultados e conclusões.

Na introdução, é apresentada um resumo da problemática a respeito do uso da argamassa colante como um material de construção. Uma revisão da literatura a respeito dos fenômenos da fadiga nos materiais, os conhecimentos considerados necessários para seu entendimento e os resultados de algumas pesquisas científicas sobre o tema são apresentados na sequência.

No terceiro capítulo, as informações a respeito dos ensaios e sua execução são mostradas através do planejamento, normas específicas e procedimentos dos trabalhos. No quarto capítulo, os resultados são expostos de forma organizada para leitura e interpretação. Muitas tabelas, gráficos e figuras são usadas para uma melhor ilustração do trabalho que é concluído com a apresentação da análise e discussão de seus resultados.

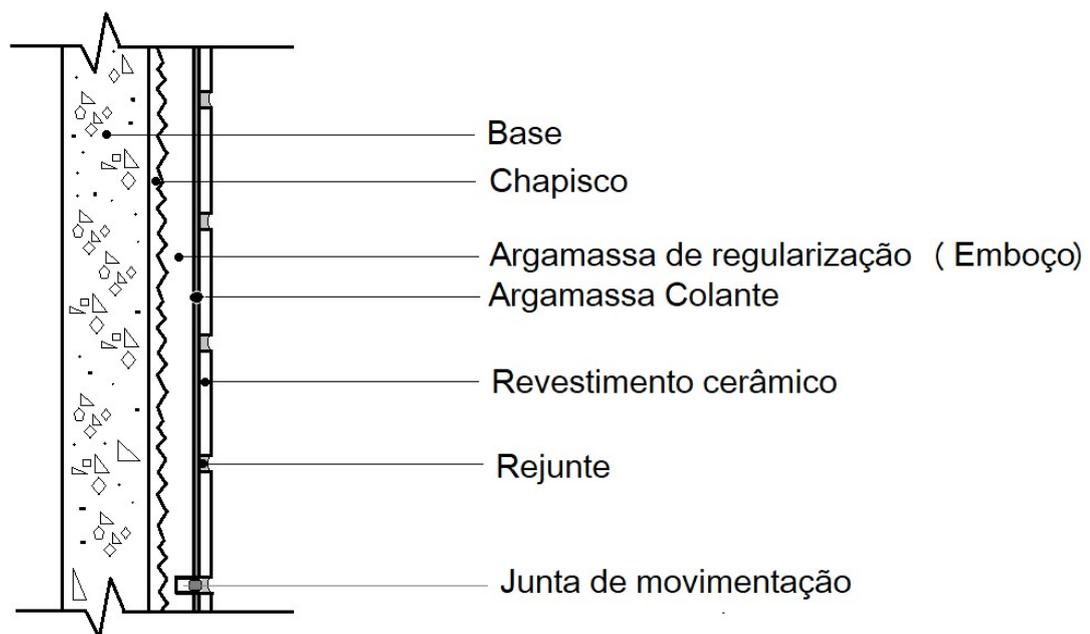
2.0 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo serão apresentadas uma coletânea de informações de diferentes documentos técnicos relacionados ao objetivo deste trabalho. Não há como tratar das argamassas colantes sem analisar todo o sistema e seu meio o qual essas argamassas fazem parte. Começaremos apresentando o sistema de Revestimento, seus constituintes, origem dos esforços atuantes, Fadiga nos materiais e finalizando com Microestrutura.

2.1 Sistema de Revestimento

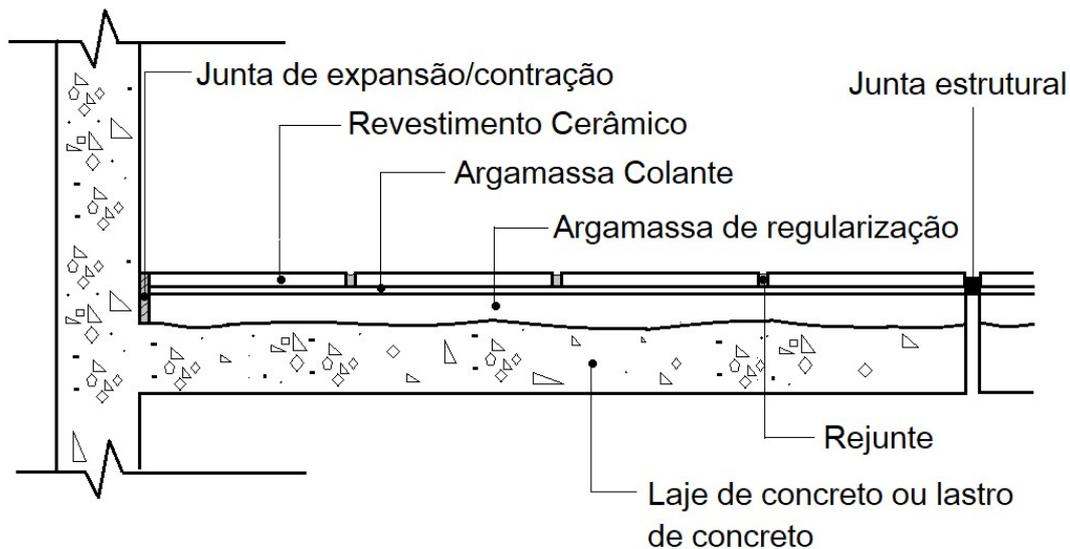
De acordo com Fiorito (1994), um sistema de revestimento mais comumente usados é composto pelas camadas apresentadas nas Figuras 03 e 04:

Figura 8 Camadas do Sistema de Revestimento em paredes



Fonte: Adaptado de Fiorito, 1994

Figura 9 -Camadas do sistema de revestimento em pisos



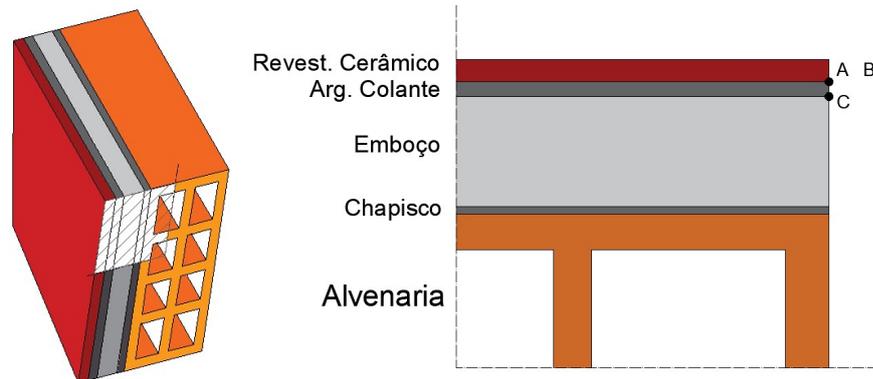
Fonte: Fiorito, 1994

Neste contexto que encontramos a maioria das aplicações das argamassas colantes. Segundo a NBR 13529 (ABNT, 2013), a base representa o substrato e pode ser tanto composta por tijolos cerâmicos, como blocos de concreto e estruturas de concreto. O chapisco corresponde a uma argamassa composta de cimento e areia grossa utilizada para uniformizar e melhorar a superfície de aderência para o recebimento das camadas de revestimento seguintes. O emboço se trata de uma camada de regularização, criando uma base uniforme e regular para a aplicação do revestimento cerâmico, neste caso. Sobre o emboço tem-se o revestimento cerâmico aderido através da argamassa colante.

Todas as camadas descritas estão unidas em um único sistema, o que implica que a deformação e ou tensões aplicadas em uma de suas camadas refletirão em reações nas camadas seguintes. Além disso, por possuírem diferenças em suas composições e posições, apresentarão reações diferentes diante das variações de temperatura e umidade.

As figuras 05 e 06 contribuem para um melhor entendimento do que foi dito anteriormente. Nela se pode ver uma pequena secção do sistema de revestimento com os pontos em comum A, B e C.

Figura 10 e 06 – Ilustração das camadas do sistema de revestimento



Fonte: O autor

Em uma situação de estabilidade, todas as camadas estão unidas e funcionando conforme projetadas, mas internamente um conjunto de esforços estão sendo gerados em seus materiais e em suas interfaces devido às ações de variações de temperatura, radiação, ventos, microrganismos, umidade, deformações da estrutura do edifício como um todo, vibrações etc.

Diante da variação da temperatura sofrida numa fachada de uma edificação por exemplo, têm-se como consequência a expansão volumétrica das camadas. Estes fenômenos foram verificados nos estudos de Lobato Paes (2002) e Rêgo (2012). Ocorre que cada camada possui um coeficiente de dilatação térmica diferente (Ver quadro 01), gerando tensões internas que fariam com que os pontos A, B e C (figura 06) se desencontrassem. Para que isso não ocorra, tensões de tração e cisalhamento devem ser suportadas pelo conjunto e por cada material constituinte. Vê-se o quanto é importante conhecer os limites de resistência mecânica de cada material e em suas interfaces (cisalhamento, tração e compressão) e garantir que estes estejam trabalhando dentro de suas capacidades tanto estaticamente como dinamicamente.

Quadro 01- Coeficientes de Dilatação dos componentes do sistema de revestimento

Coeficientes de Dilatação Térmica

- Cerâmica: $5 \text{ a } 6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
- Argamassa Colante: $10 \text{ a } 12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
- Argamassa de Emboço: $10 \text{ à } 12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

Fonte: Adaptado de Fiorito, 1994

O conhecimento das propriedades desses materiais sob o ponto de vista estático é bastante difundido e obtido através de ensaios regulamentados, tabelas disponíveis em normas, publicações. Isso muda quando se trata de uma situação de carregamentos variáveis.

Espera-se que revestimentos executados atendendo as recomendações normativas e orientações técnicas de seus fabricantes sejam suficientemente capazes de suportar tais esforços.

Variações de temperatura ocorrem diariamente mudando de intensidade ao longo do ano e gerando tensões repetitivas oscilando entre mínimas e máximas causando possivelmente o efeito de fadiga. Nos gráficos da figura 07, podem ser observadas as variações de temperatura para as cidades de Recife, Manaus e São Paulo. Observa-se variações de até 11 °C num intervalo de 24 horas.

Figura 7 – Previsões de temperatura par as cidades de Recife, Manaus e São Paulo em 20/06/2020



Fonte: Inmet, 2020

Outras fontes de geração de tensões cíclicas no sistema de revestimento e assim também sobre as argamassas colantes estão na movimentação da estrutura da edificação causadas pelos ventos, principalmente com edifícios se tornando mais altos e esbeltos. Os estudos de Sarmiento (2012), mostram esse comportamento oscilatório nos edifícios altos que por consequência podem gerar tensões cíclicas na estrutura e em seu revestimento.

As condições de umidade e de utilização das edificações geram variações nas tensões dos sistemas de revestimento, também, através da expansão higroscópica citado em Fiorito (1994).

Sabendo que esses esforços variáveis são gerados nos nossos sistemas, e considerando o pouco conhecimento do comportamento dos nossos materiais diante dessas variações, gera-se a necessidade de maiores pesquisas.

2.1.1 Argamassas

Agora tratando dos componentes do sistema de revestimento, cita-se a Argamassa. Uma mistura inorgânica e homogênea de agregado (s), aglomerante (s) inorgânico (s) e água, contendo ou não aditivos e adições, com propriedades de aderência, endurecimento e resistência (Adaptada da NBR 13755 – ABNT, 2017). Sua composição dependerá do seu objetivo de aplicação, da sua posição no sistema de revestimento, da vida útil esperada e do ambiente ao qual será exposta. O termo argamassa é geral, podendo ser classificada como argamassa de chapisco, de emboço, de reboco, colantes e de assentamento. Abaixo detalha-se cada classificação:

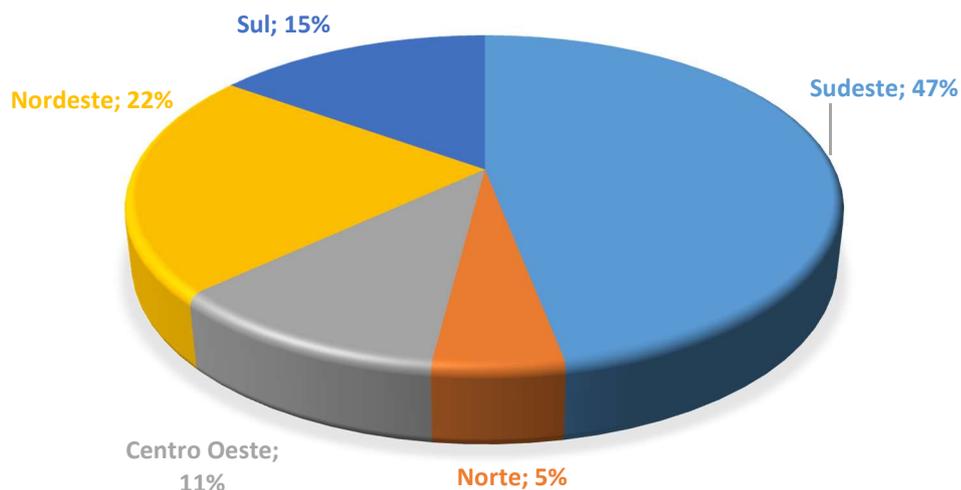
- a) **Chapisco:** Camada de preparo da base, aplicada de forma contínua ou descontínua, com a finalidade de uniformizar a superfície quanto à absorção e melhorar a aderência do revestimento. (NBR 13755- ABNT 2017)
- b) **Emboço:** Camada de revestimento executada para cobrir e regularizar a superfície da base ou chapisco, propiciando uma superfície que permita receber outra camada, de reboco ou de revestimento decorativo, ou que constitua no acabamento final. (NBR 13755- ABNT 2017)
- c) **Argamassa colante:** Produto industrializado, no estado seco, composto de cimento Portland, agregados minerais e aditivos químicos que, quando misturado com água, forma uma massa viscosa, plástica e aderente, empregada no assentamento de placas cerâmicas para revestimento. (NBR 13755- ABNT 2017)
- d) **Argamassa de assentamento:** Argamassa composta por cimento com ou sem cal hidratada, areia média lavada e água. Utilizada no assentamento de alvenarias.

Todos os tipos de argamassas descritos anteriormente podem receber aditivos e adições que venham agregar ou melhorar certas propriedades deste material.

As argamassas estão presentes não só nos revestimentos externos e internos das edificações, pisos paredes e tetos, como também são usadas nos assentamentos de alvenarias e tubulações de infraestrutura, esquadrias, acessórios, acabamentos de caixas de alvenaria, revestimentos de calçadas, acabamentos especiais com fins artísticos e também através das argamassas armadas em seus diferentes formatos e objetivos arquitetônicos.

Segundo os últimos dados da ABAI, Associação Brasileira de Produtores de Argamassas Industrializadas, a produção nacional está em cerca de 120 milhões de toneladas anuais. Deve-se acrescentar a esse número as argamassas produzidas nas obras.

Figura 8 - Mercados de Argamassas no Brasil



Fonte: ABAI, 2015

As argamassas colantes, objeto de estudo neste trabalho, possuem a função de aderir/colar as placas cerâmicas à camada de base, seja uma superfície plana de concreto ou de Emboço. São tratadas principalmente na NBR 14081, partes 1 a 5, cujas publicações foram atualizadas em 2012 a 2018, que as classificam como ACI, ACII, ACIII e suas principais propriedades.

- a) Tempo em aberto;
- b) Resistência de aderência à tração;
- c) Deslizamento;

Segundo a NBR 14081-1 (ABNT, 2012), as argamassas colantes industrializadas são designadas pela sigla AC, seguida dos algarismos romanos I, II ou III, indicativos de seu tipo, acrescidos das letras E e/ou D, quando aplicável, conforme estabelecido a seguir, de acordo com a norma citada.

- **Argamassa colante industrializada tipo I – AC I**

Argamassa colante industrializada com características de resistência às solicitações mecânicas e termo higrométricas típicas de revestimentos internos, com exceção daqueles aplicados em saunas, churrasqueiras, estufas e outros revestimentos especiais. (NBR 14081-1, ABNT, 2012)

- **Argamassa colante industrializada tipo II – AC II**

Argamassa colante industrializada com características de adesividade que permitem absorver os esforços existentes em revestimentos de pisos e paredes internos e externos sujeitos a ciclos de variação termo higrométrica e à ação do vento. (NBR 14081-1, ABNT, 2012)

- **Argamassa colante industrializada tipo III – AC III**

Argamassa colante industrializada que apresenta aderência superior em relação às argamassas dos tipos I e II. (NBR 14081-1, ABNT, 2012)

- **Argamassa colante industrializada com tempo em aberto estendido (E)**

Argamassa colante industrializada dos tipos I, II e III, com tempo em aberto estendido.

- **Argamassa colante industrializada com deslizamento reduzido (D)**

Argamassa colante industrializada dos tipos I, II e III, com deslizamento reduzido. As argamassas colantes devem atender ainda aos requisitos descritos na Tabela 1 da NBR 14081-1 (ABNT, 2012).

Tabela 1– Propriedades fundamentais para argamassas colantes

Requisito		Método de ensaio	Unidade	Critério		
				AC I	AC II	AC III
Tempo em aberto		ABNT NBR 14081-3	min	≥ 15	≥ 20	≥ 20
Resistência de aderência à tração aos 28 dias, em função do tipo de cura	Cura normal	ABNT NBR 14081-4	MPa	≥ 0,5	≥ 0,5	≥ 1,0
	Cura submersa			≥ 0,5	≥ 0,5	≥ 1,0
	Cura em estufa				≥ 0,5	≥ 1,0

Fonte: Adaptado da NBR 14081-1:2012

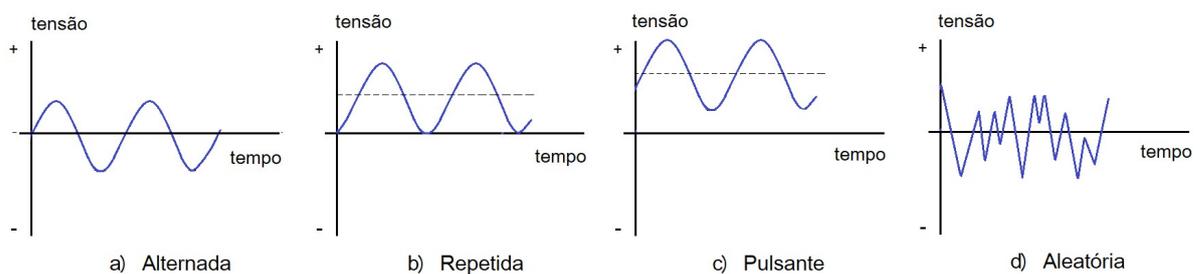
2.2 Fadiga dos Materiais

2.2.1 Introdução

Segundo Norton (2004), o fenômeno da Fadiga começou a ser observado através da engenharia Ferroviária por volta de 1800 com rupturas precoces observadas em eixos de vagões. Até então, a engenharia da época dimensionava suas estruturas com ensaios de cargas estáticas. Segundo Abrahão (2018), em 1829 o Pesquisador Albert foi o primeiro a documentar uma falha por cargas repetidas e uma década depois o termo Fadiga passou a ser utilizado para esse fenômeno.

Fadiga é uma forma de falha que ocorre em estruturas submetidas a tensões dinâmicas e variáveis. Sob tais circunstâncias é possível haver falha sob um nível de tensão bastante inferior ao limite de resistência à tração ou ao limite de escoamento para uma carga estática (Callister 2018). Os esforços dinâmicos e suas consequências nos materiais passaram a ser estudados. Diversos experimentos a esse respeito, e que são apresentados neste trabalho, confirmam que o comportamento dos materiais é diferente diante de cargas fixas em comparado com cargas que “vão e vem”. Norton (2004) e Callister (2018 e 2020), mostram os tipos de cargas cíclicas que geram a fadiga na figura 09.

Figura 9 – Tipos de carregamento cíclicos



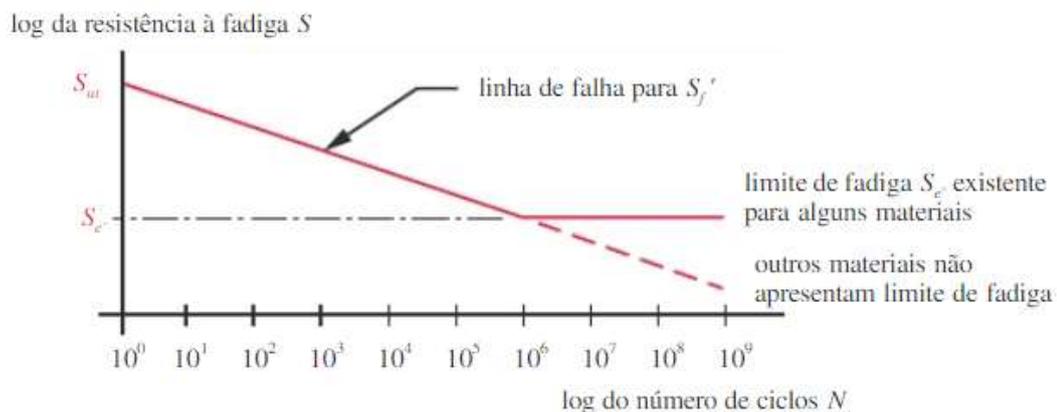
Fonte: Adaptado de Norton 2004 ; Callister 2018

Observa-se que nos casos de cargas alternadas as tensões variam de positivas a negativas, ou seja, o material sempre está carregado, porém variando entre os esforços de tração e compressão. Na tensão repetida tem-se um único tipo de tensão aplicada variando entre carga máxima e alívio total. Na pulsante, também chamada de tensão flutuante, esta é sempre presente variando ao longo do tempo, com um

alívio parcial da tensão aplicada. Finalmente, na situação descrita como aleatória, vê-se uma tensão variando em amplitude e frequência de forma não regular, talvez a situação mais adequada para a descrição da realidade dos sistemas de revestimentos.

Ainda segundo Norton (2004), um engenheiro alemão, Augusto Wöhler, teria realizado a primeira investigação científica durante 12 anos sobre o que estava sendo chamado de falha por fadiga, identificando o número de ciclos para a ruptura de eixos metálicos ao longo do tempo e a descoberta da tensão limite de resistência à fadiga para alguns tipos de aços. Isto é, um nível de tensão para o qual o material resistiria a infinitos ciclos de carga sem chegar à ruptura. O diagrama S-N ou curva de Wöhler (Resistência à fadiga x número de ciclos) apresentado na figura 10, tornou-se uma das formas para caracterizar o comportamento dos materiais diante de esforços repetitivos. O “S” vem da palavra inglesa Stress, que significa tensão e se refere à relação entre a tensão de fadiga aplicada e a tensão máxima estática do material. O “N” significa o número de ciclos que é representado graficamente em escala logarítma.

Figura 10 – Diagrama S-N ou Curva de Wöhler



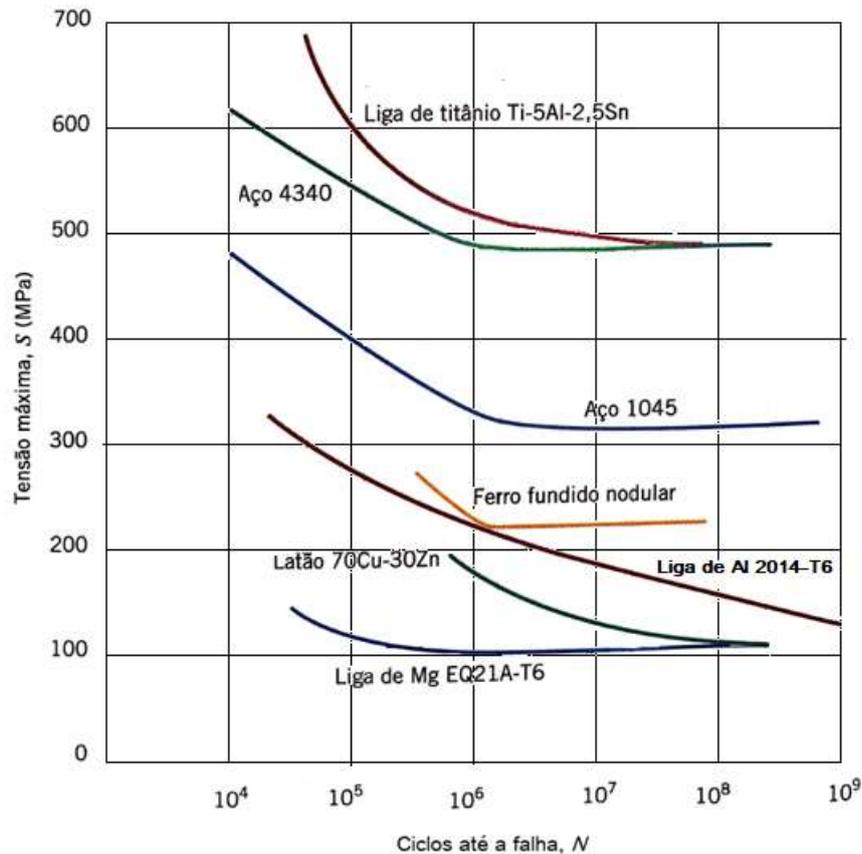
Fonte: Norton, 2004

Esse patamar linear, o qual a curva S-N assume, ou seja, o trecho onde a curva se torna horizontal, é dito como o Limite de Fadiga do Material. Isso significa teoricamente que a abaixo daquela tensão aplicada, o material não mais se romperá por fadiga, ou a quantidade de ciclos para rompimento é tão alta que poderá ser considerado infinita.

Nem todos os materiais apresentam essa característica diante da Fadiga. Segundo Callister (2018 e 2020), a maioria das ligas não ferrosas, como por exemplo, o alumínio e o cobre, não possuem limite de resistência à fadiga. Nestas situações,

as curvas são continuamente decrescentes e sem indicação de estabilidade. A figura 11 apresenta curvas de algumas ligas metálicas obtidas através de ensaios giratórios com ciclos de tensões alternadas.

Figura 11 – Curva S-N para sete ligas metálicas



Fonte: Callister, 2018

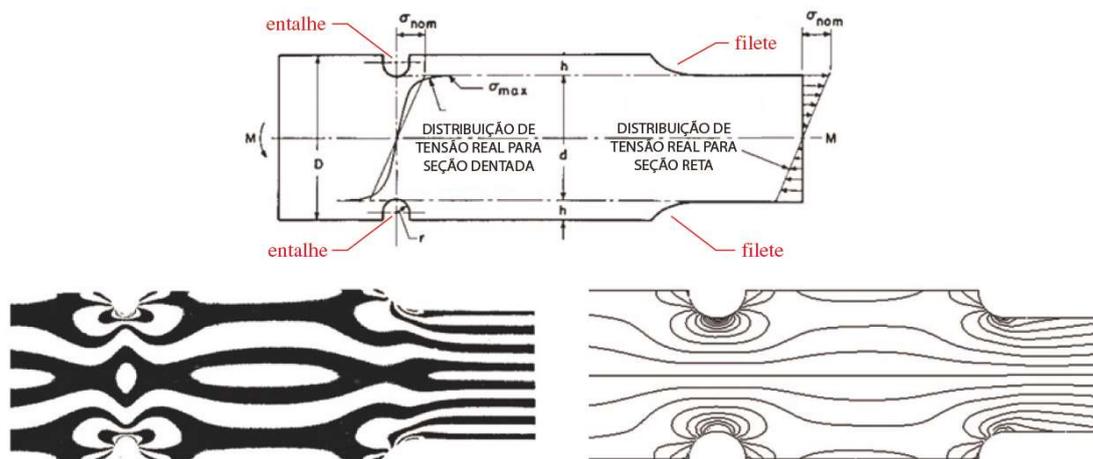
Para materiais cimentícios, como os concretos e argamassas, os estudos sobre essas propriedades diante da fadiga são relativamente recentes. Segundo Neville (2016), os concretos não parecem apresentar um limite de fadiga e por isso, faz-se necessário definir a resistência à fadiga do concreto considerando um número grande de ciclos, como por exemplo, um milhão (10^6).

2.2.2 Processo de ruptura por fadiga

As falhas por fadiga iniciam-se geralmente através de fissuras nas superfícies dos materiais ou através de alguma falha interna já existente. Além disso, entalhes e contornos geométricos geram concentrações de tensões que propiciam o início da propagação das trincas. A figura 12, disponível em Norton (2004), mostra uma peça de teste, tendo sua distribuição de tensões medidas pelo método da fotoelasticidade

e simuladas pelo método dos elementos finitos. Nas ilustrações são claramente identificadas as concentrações de tensões nos entalhes e demais variações geométricas.

Figura 12 - Concentrações de tensões em detalhes geométricos de uma peça mecânica de teste



(a) Distribuição de tensão fotoestática

(b) Distribuição de tensão -análise por elemento finito

Fonte: Norton, 2004

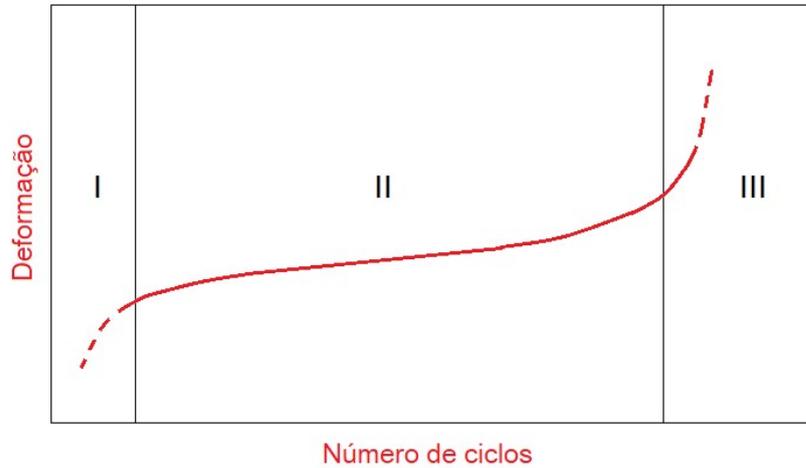
Pode-se dizer então, que se tem como catalizador do início do processo de ruptura por fadiga as falhas internas dos materiais e os formatos geométricos externos que geram concentração de tensões. Além disso, a grande maioria dos materiais, por mais homogênea que seja, apresenta grande número de vários defeitos e imperfeições microestruturais (CALLISTER, 2020). Uma abordagem microestrutural desse fenômeno é melhor apresentada em 2.3.

Segundo Norton (2004), existem três estágios na falha por fadiga: início da trinca (nucleação), propagação da trinca e ruptura repentina devido ao crescimento instável da trinca.

Início da Trinca - Nucleação → Propagação → Ruptura

Tais efeitos também podem ser visualizados através da curva de propagação das trincas que mostra a distribuição das deformações ao longo das três fases citadas (Figura 13).

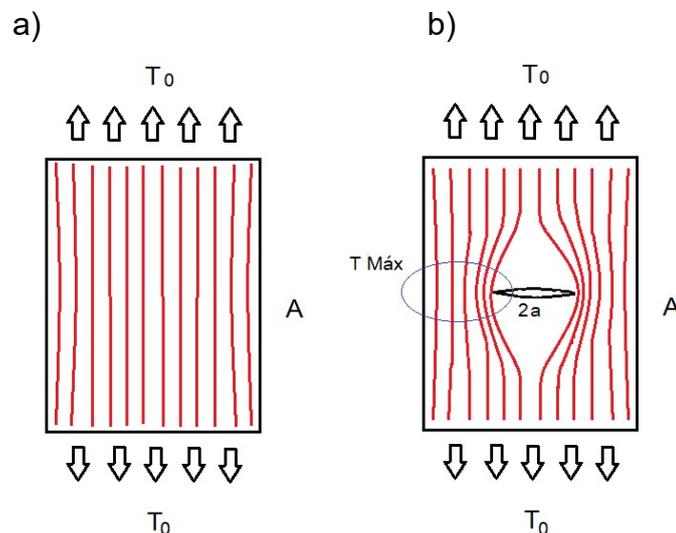
Figura 13- Representação de Curva de propagação de trincas por fadiga típica



Fonte: Adaptado de Neville, 2016

O primeiro estágio pode ter uma pequena duração. Já com a deformação inicial do material, pequenas fissuras surgem. Com a sequência de carregamento cíclico e com estas primeiras fissuras iniciadas, ocorre a redistribuição das tensões ao longo do material, gerando um acréscimo de tensões que geram novas fissuras e que fazem aumentar a extensão das fissuras existentes. Esse seria, portanto, o segundo estágio, e envolve o maior tempo da vida da peça. Na figura 14 há uma ilustração obtida dos estudos da mecânica da fratura disponíveis em Callister (2018) que foi adaptada para explicar melhor o processo de redistribuição de tensão no material.

Figura 14 – Processo de redistribuição de tensões na formação de fissuras



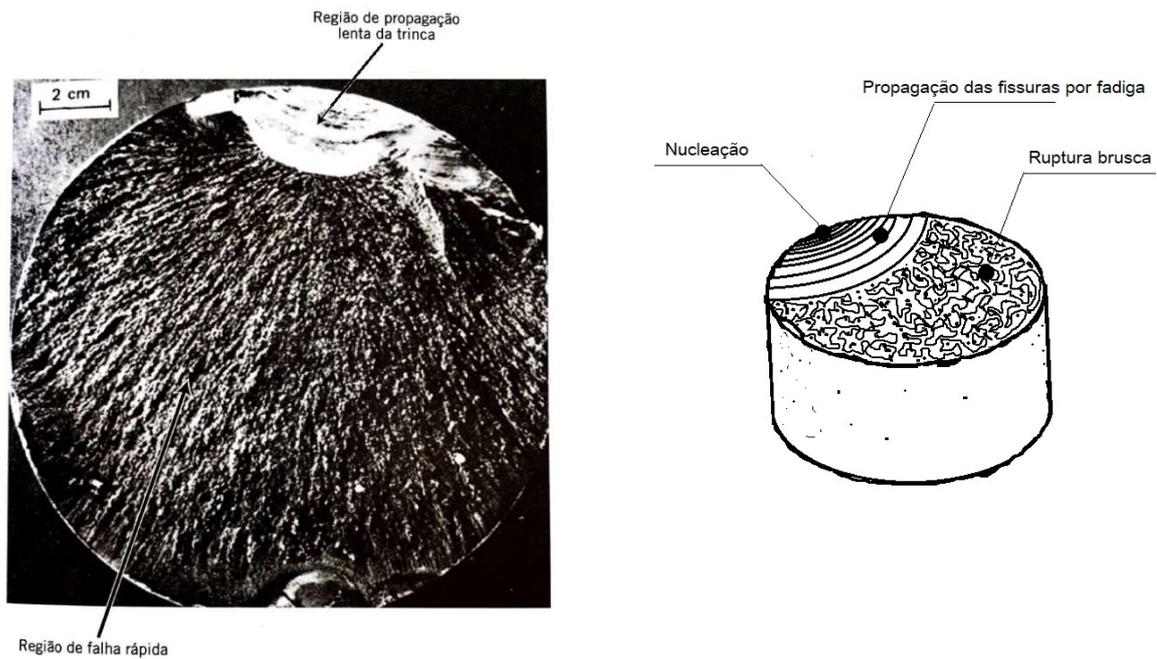
Fonte: Adaptado de Callister, 2018

Em 14(a), vê-se um determinado material A em condição de tração T_0 . As linhas vermelhas em seu interior representam o “caminho” das forças ao longo do material. Observa-se que toda a seção do corpo do material contribui para resistir à tensão de tração T_0 . Na figura 14(b) tem-se a representação de uma pequena fissura neste material, fissura de comprimento “2a”. Observa-se que devido a esta fissura, as linhas de força se concentram nas extremidades, gerando um aumento da tensão no material na região sob círculo azul. Esse aumento de tensão acaba gerando novas fissuras e aumentando a fissura existente “2a”, levando o material à terceira e última etapa do processo de fadiga, ou seja, a ruptura.

2.2.3 Tipos de fratura

Alguns materiais, ao se romperem por fadiga, apresentam características comuns em sua seção de ruptura e que podem ser identificadas a olho nu. É o caso das ligas metálicas. As figuras 15a e 15b mostram os sinais típicos da nucleação, propagação e ruptura já citados nesse trabalho. O crescimento da trinca ocorre de forma radial, avançando a cada ciclo ou conjunto de ciclos, deixando uma sequência de filamentos radiais que são chamados por alguns autores de “marcas de praia”, assemelhando-as às marcas das ondas na areia. A imagem na figura 16, retirada do livro de Norton (2014) destaca essas marcas.

Figura 15 – Estágios da ruptura numa seção de aço ensaiado à fadiga por flexão

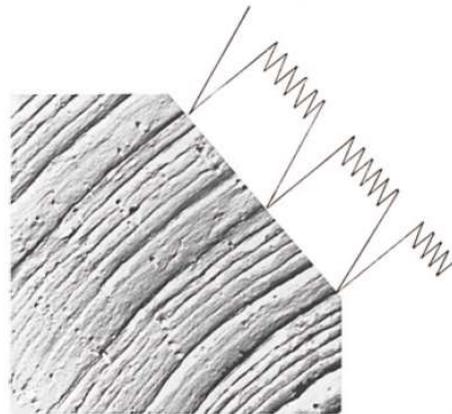


(a)

(b)

Fonte: Adaptado de Callister, 2018 CALLISTER 2018(a) e adaptada (b))

Figura 16 - Ondulações do avanço da microfissura no ensaio cíclico

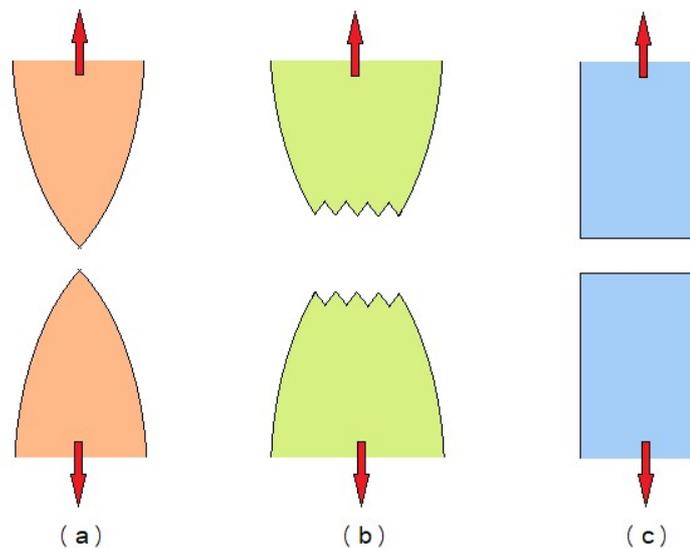


Fonte: Norton, 2004

2.2.3.1 Fratura dúctil e frágil

De acordo com Callister (2018), as superfícies da fratura dúctil e frágil têm suas características distintas próprias, tanto ao nível macroscópico quanto ao nível microscópico. Na figura 17, este autor mostra representações esquemáticas para os perfis de fratura sob o ponto de vista macroscópico e sob tensões de tração uniaxial. A figura 17a representa um material extremamente dúctil. É o exemplo do ouro puro à temperatura ambiente. Estes materiais extremamente dúcteis atingem uma deformação tipo “pescoço” até uma fratura pontual. A figura 17b representa o tipo mais comum de fraturas de materiais dúcteis, onde ocorre uma moderada deformação tipo “empescoçamento” seguida de ruptura brusca gerada pela propagação de trincas internas, e na figura 19c é demonstrada a fratura tipicamente frágil, onde não se vê deformações plásticas apreciáveis.

Figura 17 – Tipos de fraturas por tração axial



Fonte: Callister, 2018

2.2.4 Fatores que influenciam a vida à fadiga

A quantidade de ciclos que um determinado material resiste até sua ruptura é influenciado por diversos fatores, tanto internos como externos. Composição do material, umidade, módulo de elasticidade, tipo de tensão aplicada, tipo de ensaio, frequência, dimensões e forma geométrica do corpo do material podem influenciar em

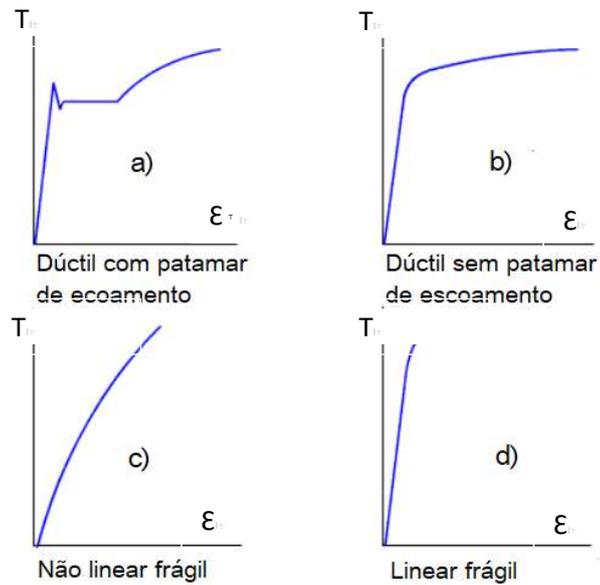
sua vida útil em fadiga. Na sequência serão apresentadas mais detalhadamente algumas das influências citadas, dando ênfase para os materiais cimentícios.

2.2.4.1 Módulo de Elasticidade

Um material sob uma determinada tensão tende a deformar-se. Existe uma relação entre a tensão aplicada e a deformação causada nesse corpo. Ao gerar um gráfico com essas informações, percebe-se comportamentos característicos de determinados materiais que são essenciais na sua classificação e na determinação do seu intervalo de tensão de trabalho para um determinado projeto.

A figura 18 mostra 04 tipos de comportamento de materiais no regime citado. A curva em 18(a) é mais comum para algumas ligas metálicas. Apresenta um patamar de escoamento, ou seja, após atingir uma deformação máxima num primeiro estágio, seu material sofre um rearranjo de sua estrutura molecular voltando a demonstrar resistência ao aumento da tensão até sua ruptura frágil. No gráfico 18(b) o material não sofre essa mutação, mas após o seu regime linear ter sido alcançado ele continua resistindo ao aumento da tensão, mesmo que de forma reduzida e com uma maior taxa de deformação até atingir sua ruptura. Ambos os materiais citados em (a) e (b) são denominados como dúcteis, pois apresentam essa visível capacidade de relativa extensão da deformação antes de sua ruptura, como já discutido neste trabalho. Esse conceito é facilmente identificado ao se comparar com os comportamentos nos gráficos em 18(c) e (d), que apresentam uma ruptura mais breve, sem grandes deformações. São os casos das argamassas e concretos de cimentos Portland.

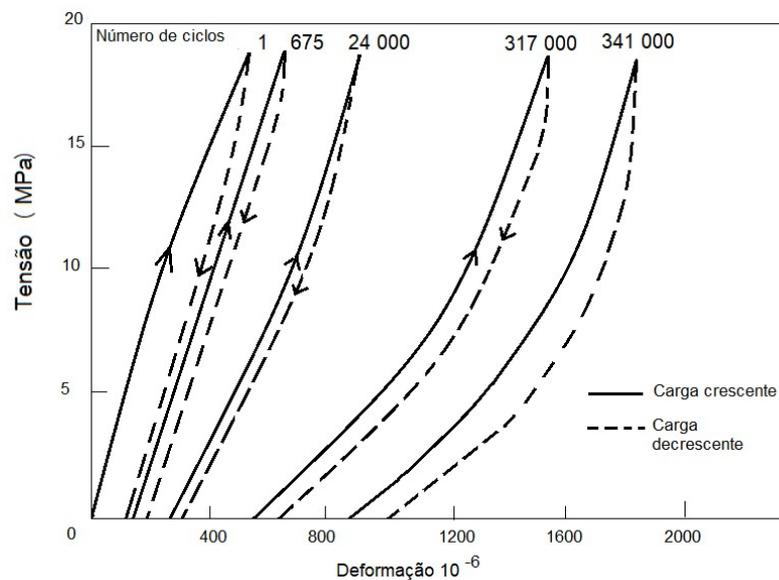
Figura 18- Curvas características de Tensão versus deformação dos materiais



Fonte: Cimm, 2010

Existe uma relação entre o módulo de elasticidade e a vida à fadiga. Não só o módulo de um material influencia no comportamento à fadiga como a fadiga gera mudanças no módulo de elasticidade do material, como pode ser visto na figura 19 publicada em Neville (2013). A figura mostra as mudanças nas curvas de tensão-deformação ao longo de acúmulos de ciclos onde essa curva tende a inclinar-se até a sua ruptura.

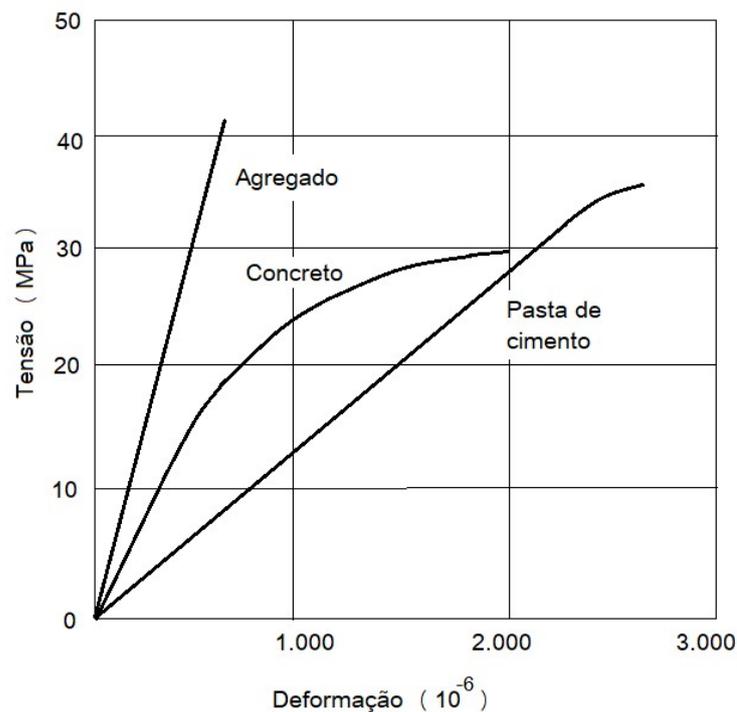
Figura 19 - Tensão-deformação do concreto sob carregamento cíclico de compressão



Fonte: Neville, 2013

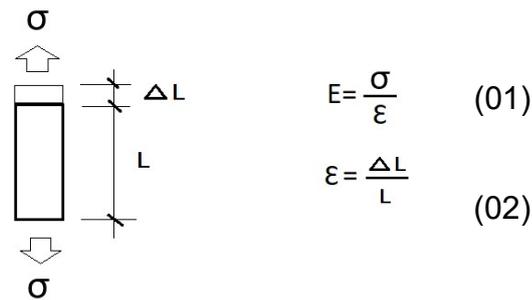
Materiais com menor módulo de elasticidade, ou seja, maior capacidade de deformação, geralmente apresentaram maior número de ciclos comparados a outros ensaiados sob as mesmas condições. Essa informação é coerente com as informações dadas anteriormente sobre as três fases da vida útil da Fadiga. Num regime de ciclagem, a geração de microfissuras e trincas ocorrem ao longo de sua vida até a sua ruptura. Um material capaz de deformar sem se romper imediatamente conseguirá em tese, resistir a uma vida de ciclagem maior. Concretos e argamassas comuns apresentam comportamento frágil, ou seja, pequenas deformações sob tensões bastante elevadas e com rompimentos bruscos. Os seus principais constituintes, agregados e pasta de cimento em separado apresentam o mesmo comportamento frágil. A figura 20 mostra a curva de tensão-deformação da pasta de cimento, do agregado e do concreto.

Figura 20 – Curvas tensão-deformação do concreto e seus constituintes



Fonte: Neville, 2016

O módulo de elasticidade como já dito anteriormente, é a relação entre a tensão e a deformação, e a deformação é a relação entre a taxa de deformação sobre a dimensão total do corpo, conforme mostrado nas equações 01 e 02:



Sendo a deformação ε um valor relativamente pequeno considerando o valor da tensão σ , entende-se o porquê de os valores serem tão elevados. Em Neville (2013) são apresentados resultados médios dos módulos de elasticidade de concretos comuns (Tabela 02).

Tabela 02 – Módulos de elasticidade de concretos comuns

Resistência aos 28 dias, em cubos (MPa)	Módulo de elasticidade estático médio, aos 28 dias (GPa)
20	24
25	25
30	26
40	28
50	30
60	32

Fonte: Neville, 2013

Fiorito (1994) apesar de destacar a variedade de módulos de elasticidade em função da composição das argamassas, cita valores médios de referência para argamassas.

- Argamassas ricas e rígidas – 14 GPa
- Argamassas mais elásticas – 5 GPa
- Argamassas extremamente elásticas – 1,05 GPa

2.2.4.2 Composição e estado do material

Argamassas e concretos comuns são compostos por cimento (considerando para este trabalho apenas os cimentos Portland), agregados miúdos, grãos e água. Por ser um material heterogêneo, a composição mineralógica dos agregados, o tipo

de cimento utilizado, a proporção de seus componentes, adições, bem como seu fator água/cimento pode gerar diferentes tipos de materiais e comportamentos. Deve-se acrescentar ainda a influência no manuseio e cura desses materiais. A influência desses fatores sobre a vida útil à fadiga foi apresentada em Medeiros (2012) que cita diferentes pesquisas e seus resultados sobre a influência de cada componente:

a) Agregados

De acordo com Medeiros (2012) cita que a influência do tipo de agregado não é um consenso entre os pesquisadores. a fadiga em concretos com Williams (1943), Zhang *et al.* (1997) e Cornelissen (CEB, 1988) observaram uma redução na resistência agregados leves. Já Tepfer e Kutti (1979) e Sparks (1982) não encontraram diferenças e Waagard (1986), Zhang *et al.* (1997) e Saito (1984) encontraram melhoras nos resultados de fadiga para esses agregados.

Sobre a dimensão dos agregados, Iwama Fukuda (1986) e Koyanagawa *et al.* (1994) não encontraram diferenças na resistência à fadiga em concretos com agregados de dimensões entre 20 e 40mm. Sendo observado apenas uma leve melhora para agregados de 20 mm de diâmetro máximo. Neville (2013) cita que o módulo de elasticidade do agregado, bem como sua proporção na mistura, influencia no módulo do concreto, e dessa forma, pode-se dizer também das argamassas. Sendo assim, entende-se que nesse aspecto, o tipo e volume do agregado influencia na vida útil à fadiga desses materiais.

b) Fator água/cimento e consumo de cimento

O fator água/cimento influencia em todas as demais propriedades do concreto ou argamassa, dessa forma, há de se esperar que a resistência e a vida à fadiga sejam influenciadas por esse fator. O aumento do consumo de cimento na dosagem de concretos e argamassas tende a aumentar a rigidez, tornando o material mais frágil e esse comportamento frágil espera-se que reduza a vida útil desse tipo de material à fadiga. Medeiros (2012) cita em seu trabalho que Graf e Brenner (1934, 1936) apud Zhang *et al.* (1997) comentam que o aumento do fator água/cimento ou o aumento do consumo de cimento diminuem a resistência à fadiga. Kleber e Lee (1982) afirmam que a resistência à fadiga na flexão reduz com fator água/cimento menor que 0,4 e

que entre 0,4 e 0,6 não foi detectada variação significativa. Ainda sobre ensaios de fadiga na flexão, Zhang (1997) também não observou influência nos resultados ao ensaiar seus corpos de prova com fatores água/cimento de 0,39; 0,45; 0,53 e 0,65.

Medeiros (2012) ainda cita que Tepfers e Kutti (1979), ao estudarem dois tipos de dosagem de concreto com diferentes consumos de cimento, 236 e 365 kg/m³, reportaram não haver encontrado diferença nos ensaios de fadiga à tração. Não se pode afirmar, portanto, pelo menos diante dos casos citados, e com o conhecimento difundido sobre a influência do fator água/cimento e consumo de cimento na mistura, que tais parâmetros sejam tão relevantes na definição da vida à fadiga, além de, na visão deste autor, a influência no seu módulo de elasticidade que acredita ter relação direta.

c) Umidade das amostras

A umidade das amostras apresenta alguma influência nas suas propriedades mecânicas. Segundo Neville (2013), um corpo de prova ensaiado úmido apresenta módulo de elasticidade mais elevado, entre 3 e 4 GPa, que um seco, e como já relatado neste trabalho, o módulo está relacionado à vida à fadiga. Em sua publicação em 2016, este mesmo autor relata que as condições de umidade dos corpos de prova ensaiados à flexão alteraram sua vida à fadiga. Pesquisas de Cornelissen e Leews (1986), citados por Medeiros (2012), obtiveram melhores resultados à fadiga para as amostras secas que às saturadas.

Cervo (2004) em seus ensaios de resistência a fadiga em concretos comuns verificou que o número de ciclos à fadiga suportado pelo concreto saturado foi de 1% a 19% da resistência à fadiga do concreto seco, mostrando que a condição saturada é a mais crítica para a ruptura por fadiga. A explicação para esse comportamento está, segundo Neville (2016), nas deformações diferenciais induzidas pelo gradiente de umidade.

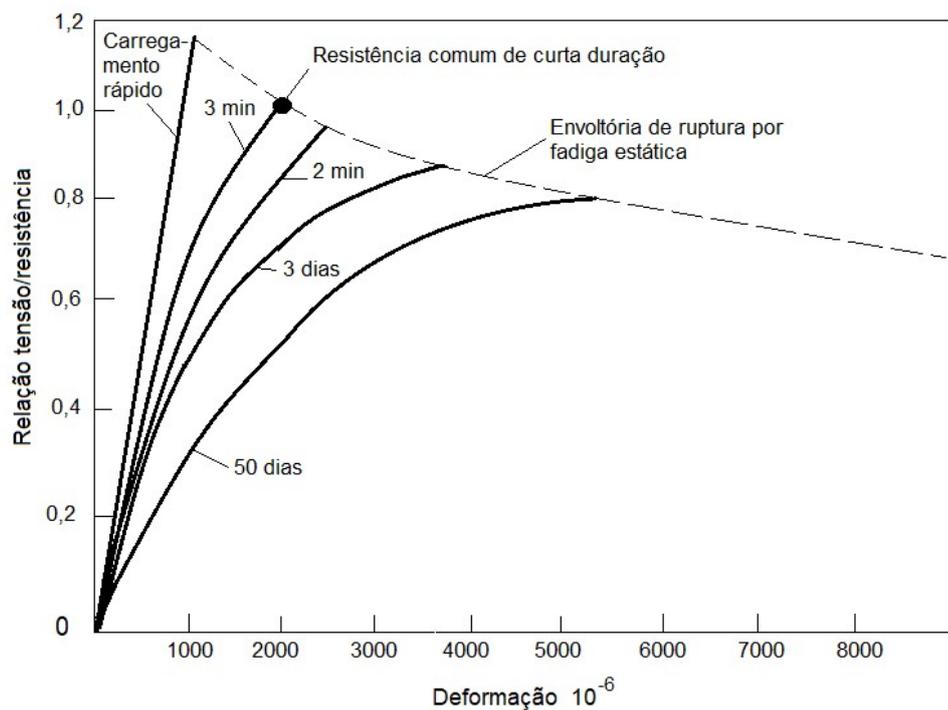
d) Frequência de carregamento

A velocidade em que uma carga ou tensão é aplicada a um determinado corpo tem influência no seu comportamento à resistência. Isso pode ser constatado através das faixas de velocidade de aplicação de cargas informadas nas diversas normas de

ensaios como por exemplo as NBR 12142:2010 e 7222:2011. De fato, essa influência é confirmada cientificamente tanto para cargas estáticas quanto para cargas cíclicas. Estudos mostram que ao se aplicar uma carga extremamente rápida sobre um corpo, quase que instantânea, este corpo obtém resistência maior e a deformação na ruptura é menor.

Verifica-se que em taxas de carregamento maiores o concreto parece de natureza mais frágil que sob menores taxas e a micro fissuração aumenta a capacidade de deformação (Neville 2013). Já para carregamentos mais lentos, a resistência diminui devido a influência da deformação lenta (Fiorito 1994). A figura 21 mostra bem essa variação para carregamentos únicos, ou seja, aplicação de tensão uma única vez até o seu rompimento.

Figura 21 – Influência da duração da velocidade de carregamento na resistência e na capacidade de deformação



Fonte: Neville, 2013

Para carregamentos cíclicos a velocidade de aplicação de tensão está associada a frequência e sua influência na vida à fadiga é atestada por alguns autores, porém as faixas de frequência pelo qual se gera uma mudança no comportamento não é consenso, como será mostrado logo a seguir. Neville (2016) cita que a frequência dentro dos limites de 1, 2 a 33 Hz não influencia a resistência à fadiga tanto

à tração como à compressão. Cervo (2004) analisou através de ensaios a influência da frequência na resistência à fadiga de concretos usando 1 Hz, 5 Hz e 10 Hz e aplicando a mesma relação entre tensões (0,83 da tensão de ruptura estática). Neste trabalho a autora concluiu que o aumento da frequência eleva o número de ciclos na ruptura por fadiga, sendo que a variação entre 1 e 5Hz foi menor e estatisticamente não significativa, e com 10 Hz chegando a atingir um valor 96% superior aos números obtidos com 1 e 5 Hz.

Medeiros (2012) cita em seu trabalho que Sparks e Menzies (1973), Hanson (1974) e Jansen (1996), apontam que acima de 75% da tensão estática máxima, ao se elevar a frequência, aumenta o número de ciclos até a ruptura. Que Zhang *et al.* (1996) relata os trabalhos nesse sentido realizados por Graf e Brenner na Alemanha entre 1934 e 1936 onde concluíram que entre as frequências de 4,5 e 7,5 Hz há um pequeno efeito na vida à fadiga, mas uma diminuição da vida para valores inferiores a 0,16 Hz.

Em resumo, constata-se que diversos autores que analisaram este comportamento chegam a uma mesma conclusão, a de que o aumento da frequência eleva a vida útil a fadiga e cada experimento apresenta faixas diferentes para essa influência.

Na construção civil, as frequências mais comuns de trabalho estão entre 1 e 5 Hz para a engenharia rodoviária e, no caso de fachadas, em torno de $11,57 \times 10^{-5}$ Hz, ou seja, um ciclo a cada 24 horas se considerarmos como ciclos regulares. O interesse em frequências maiores estaria ligado a bases de equipamentos de alta vibração em indústrias e turbinas hidroelétricas por exemplo.

2.3 Microestrutura dos Materiais

Para melhor entender os processos de rompimento por fadiga e a particularidade de cada material, vê-se que é necessário conhecê-lo microscopicamente. A forma de sua estrutura, a homogeneidade de sua massa e comportamento das suas microfissuras até o rompimento são pontos só vistos nessas dimensões.

2.3.1 Estrutura molecular

O entendimento do próprio comportamento diante das variações de tensão se deve a avaliação na composição e estrutura molecular do material.

A sua composição e a forma em que suas moléculas e átomos são conectados, e os seus limites de expansibilidade explicam o fato de alguns materiais se deformarem em maior ou menor escala que outros e explica a intensidade de tensões internas geradas e absorvidas diante dessas variações de energia.

O tipo, a quantidade, o tamanho, a forma e a distribuição das fases presentes em um sólido constituem a sua microestrutura (MEHTA, 2014). O limite de resolução do olho humano é aproximadamente um quinto de um milímetro (200 μm). A capacidade de aumento dos microscópios eletrônicos modernos é da ordem de 10^6 vezes, segundo este mesmo autor.

2.3.2 Classificação dos materiais

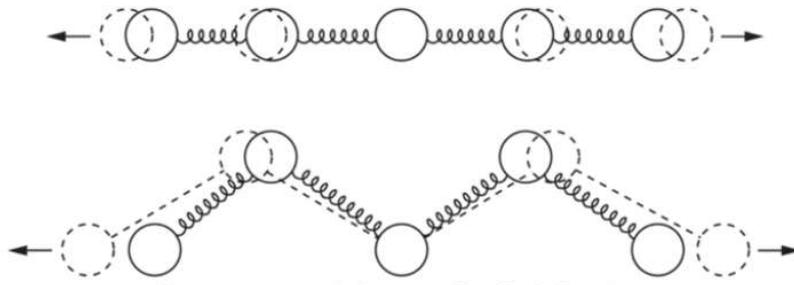
Os materiais são classificados em três categorias básicas: metais, cerâmicas e polímeros (CALLISTER; RETHWISCH 2018). Segundo Ashby e Jones (2018), e Recena (2012), concretos e argamassas estão na classificação de materiais cerâmicos. Esta classificação se refere principalmente à composição química e atômica desses materiais. Historicamente, as cerâmicas exibiram extrema fragilidade, (ausência de ductibilidade), e são altamente suscetíveis à fratura (CALLISTER ; RETHWISCH 2018).

2.3.3 Módulo de elasticidade

O Módulo de elasticidade (módulo de Young), é explicado sob o ponto de vista atômico a partir de dois fatores especiais (ASHBY; JONES, 2018):

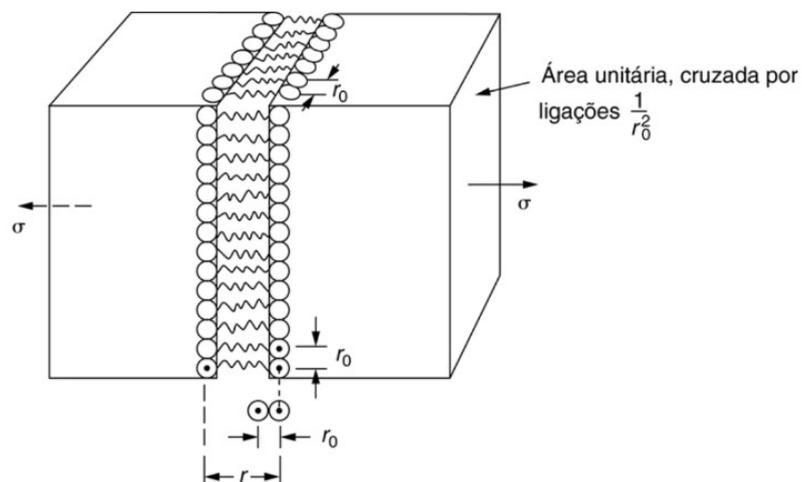
- 1 – As forças que mantêm os átomos unidos (as ligações interatômicas) e que agem como pequenas molas, ligando um átomo ao seguinte (Figuras 22 e 23).
- 2 - Os modos como os átomos e juntam (o empacotamento ou arranjo de átomos).

Figura 22 – Representação simbólica da ligação atômica nos materiais



Fonte: Ashby ; Jones, 2018

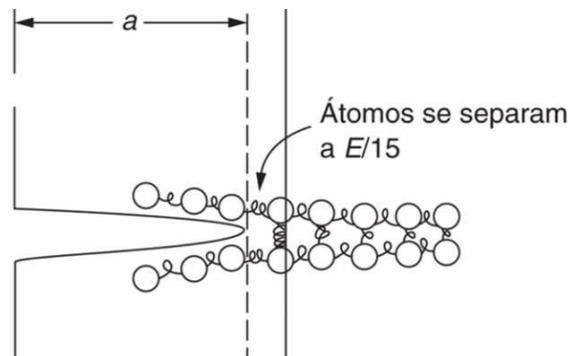
Figura 23 – Representação simbólica da ligação atômica durante a deformação elástica de um material



Fonte: Ashby ; Jones, 2018

Os átomos dos materiais cerâmicos se unem por ligações iônicas e covalentes, que são ligações rígidas e resultam em elevados módulos de elasticidade. Essas ligações rígidas explicam o porquê das trincas nestes tipos de materiais se propagarem sem que ocorram o escoamento plástico, onde as tensões na ponta da trinca são suficientes para romper as ligações interatômicas (Figura 24).

Figura 24 – Propagação da fissura por rompimento interatômico



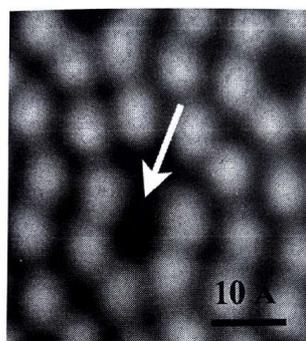
Fonte: Ashby ; Jones, 2018

A energia requerida para romper as ligações interatômicas é muito menor do que a absorvida pela ruptura dúctil em um material tenaz e é por isso que materiais como cerâmicas e vidros são tão frágeis (ASHBY; JONES 2018).

2.3.4 Processo de trincas

Por fim, o processo de iniciação de trincas, conforme já abordado neste trabalho, inicia-se geralmente através de falhas preexistentes no material, entre essas, as falhas em sua estrutura molecular. Segundo Callister; Rethwisch (2018), todos os materiais contêm grande número de uma variedade de defeitos ou imperfeições, por mais homogêneo que possa ser um material.

Figura 25 – Micrografia de varredura por sonda. Mostra uma falha (lacuna) na estrutura atômica do material Silício



Fonte: Callister ; Rethwisch, 2018

Durante a propagação dessas trincas, parte do material é rompido em sua ligação atômica ou molecular, ou seja, no próprio material, ou na interface entre diferentes tipos de materiais unidos, no caso dos materiais heterogêneos, ou ainda, na combinação desses dois tipos de rupturas.

2.3.5 Dispersão dos resultados de ruptura por fadiga

Segundo Callister e Rethwisch (2018), existe sempre uma dispersão considerável nos dados de fadiga, isto é, uma variação nos números de ciclos (N) medidos para vários corpos de provas testados sob o mesmo nível de tensão. Essa variação pode levar a incertezas significativas de projeto quando a vida em fadiga e/ou o limite de resistência à fadiga estiverem sendo considerados.

A dispersão nos resultados é uma consequência da sensibilidade da fadiga a diversos parâmetros do ensaio e do material, impossíveis de serem controlados com precisão. Esses parâmetros incluem a fabricação dos corpos de prova e o preparo da sua superfície, variáveis da estrutura molecular do material, o alinhamento do corpo de prova no equipamento de teste, a tensão média e a frequência dos testes.

As curvas S-N dos materiais, como mostrada na figura 11, representam curvas de melhor ajuste, que foram traçadas por meio de valores médios de pontos experimentais. (CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

2.4 Termologia

Os fenômenos associados ao aquecimento dos corpos são bastantes conhecidos na prática. As sensações térmicas do que é “quente” e “frio” estão relacionadas ao toque, ao tato. Temperatura está ligada à quantidade de energia presente em um determinado material. Essa energia aumenta a movimentação molecular em maior ou menor intensidade dependendo de sua composição e estrutura molecular. Isso está diretamente ligada às gerações de tensões internas nos materiais pela variação de temperaturas.

2.4.1 Calor e temperatura

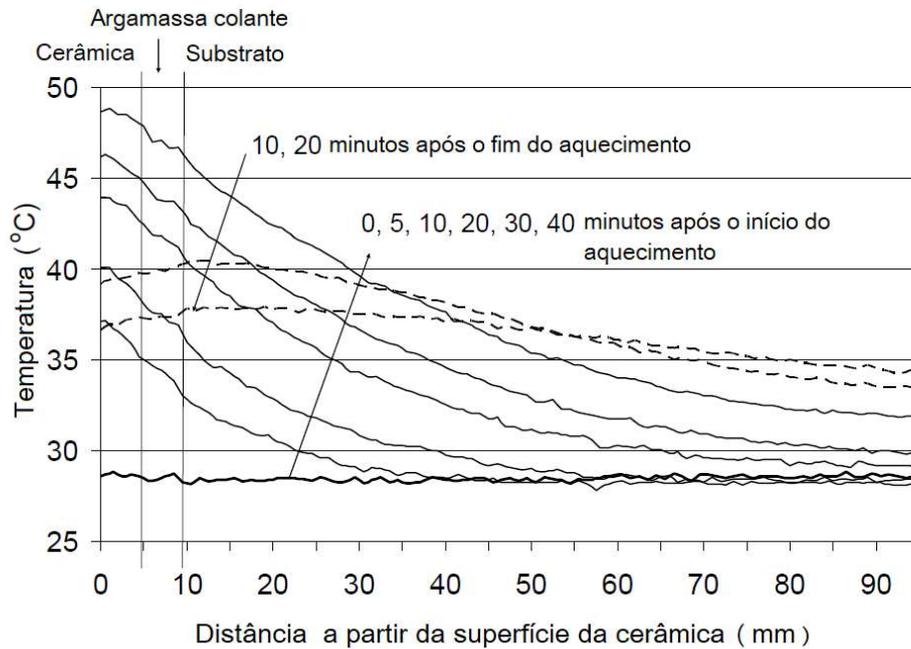
Existe uma energia cinética nos corpos que geram um nível de agitação molecular. Essa energia tende a ser transferida para corpos e massas vizinhas seguindo um fluxo do maior para o menor até atingir uma situação de equilíbrio. Essa energia térmica em trânsito é denominada “Calor” (Álvaro 2005). Temperatura é uma grandeza que mede o estado dessa agitação dessas moléculas, caracterizando o seu estado térmico, ou seja, quantificando a sua Energia Cinética Média. Para medir a temperatura dos corpos utiliza-se o termômetro.

As escalas utilizadas são o Celsius ($^{\circ}\text{C}$) (em homenagem ao Físico Anders Celsius), Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$) (homenagem a Gabriel Daniel Fahrenheit) e Kelvin ($^{\circ}\text{K}$) (homenagem a Willian Thomson – o Lord Kelvin).

Estabeleceu-se como unidade de quantidade de calor a caloria (cal) – a quantidade de calor necessária para aumentar a temperatura de um grama de água de $14,5^{\circ}\text{C}$ a $15,5^{\circ}\text{C}$, sob pressão normal (1 atm.). Contudo, para o Sistema Internacional de unidades a unidade de quantidade de calor é o Joule (J), em honra ao Físico James Prescott Joule (1818 – 1889). A relação entre a caloria e o Joule (chamada de equivalente mecânico) é: $1 \text{ cal} = 4,186 \text{ J}$.

No sistema de revestimento externo essa temperatura se propaga da superfície para dentro de suas camadas constituintes, dissipando como mostrado na figura 26 obtida e adaptada do trabalho de Matsumoto et al. (2007).

Figura 26 – Propagação da temperatura ao longo das camadas do sistema de revestimento



Fonte: Matsumoto et al., 2007

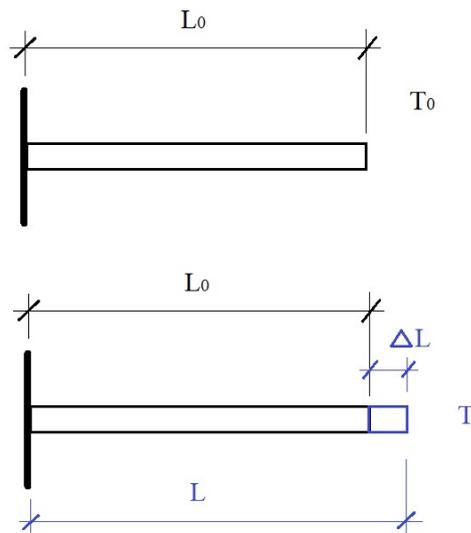
2.4.2 Dilatação térmica

De uma maneira geral, os corpos, sejam eles sólidos, líquidos ou gases, expandem com o aumento da temperatura. Isso está ligado à sua agitação molecular que gera o distanciamento entre seus átomos.

a) Dilatação Linear

A dilatação linear leva em consideração a expansão sofrida por um corpo apenas em uma das suas dimensões. É o que acontece, por exemplo, com um fio, em que o seu comprimento é mais relevante do que a sua espessura. Para calcular a dilatação linear utiliza-se a equação 03:

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (03)$$



Onde:

ΔL : Variação do comprimento

L_0 : Comprimento inicial

α : Coeficiente de dilatação linear ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)

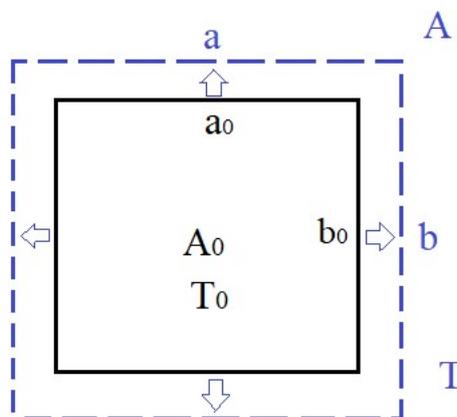
ΔT : Variação de temperatura ($T - T_0$) ($^{\circ}\text{C}$)

b) Dilatação Superficial

A dilatação superficial leva em consideração a expansão sofrida por uma determinada superfície, desconsiderando a expansão de sua espessura. Para calcular a dilatação superficial utiliza-se a equação 04:

$$\Delta A = A_0 \cdot \beta \cdot \Delta T$$

(04)



Onde:

ΔA : Variação da área

A_0 : Área inicial

β : Coeficiente de dilatação superficial ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)

ΔT : Variação de temperatura ($T - T_0$) ($^{\circ}\text{C}$)

O coeficiente de dilatação superficial (β) é igual a duas vezes o valor do coeficiente de dilatação linear (α), ou seja:

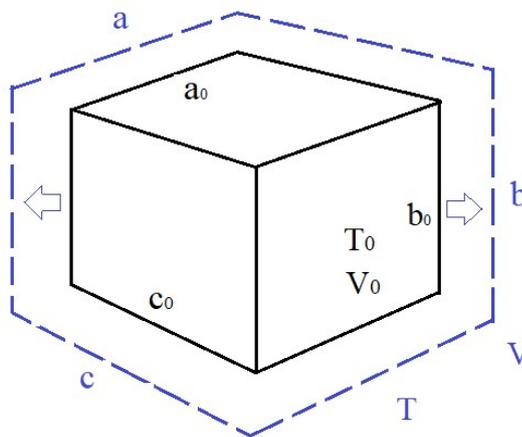
$$\beta = 2 \cdot \alpha$$

c) Dilatação Volumétrica

A dilatação volumétrica resulta do aumento no volume de um corpo, ou seja, as expansões nas três dimensões são consideradas.

Para calcular a dilatação volumétrica utiliza-se a expressão 05:

$$\Delta V = V_0 \cdot \gamma \cdot \Delta T \quad (05)$$



Onde:

ΔV : Variação do volume ($V - V_0$)

V_0 : Volume inicial

V : Volume final

γ : Coeficiente de dilatação volumétrica ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)

ΔT : Variação de temperatura ($T - T_0$) ($^{\circ}\text{C}$)

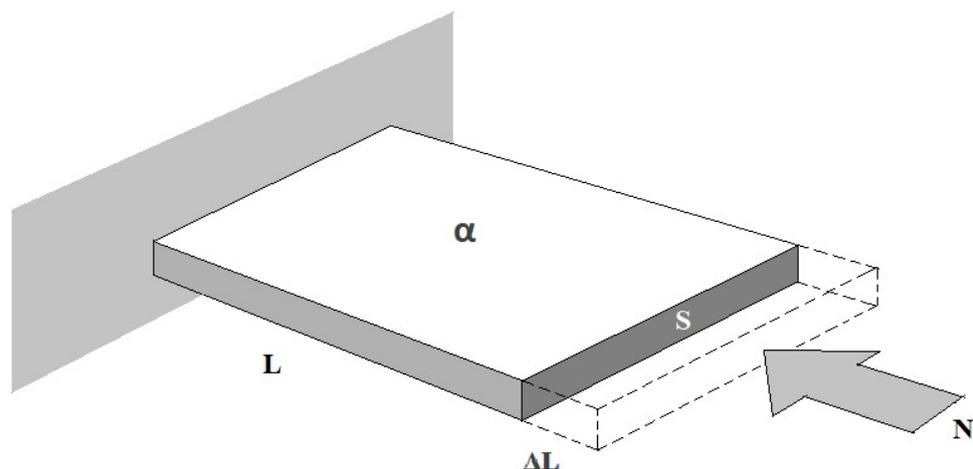
O coeficiente de dilatação volumétrica (γ) é três vezes maior que coeficiente de dilatação linear (α), ou seja:

$$\gamma = 3 \cdot \alpha$$

Estes conceitos, apesar de serem básicos, regem os princípios de deformação e geração de tensões nas edificações e seus diferentes materiais, devido às variações volumétricas causadas pelas diferentes temperaturas. É o caso do sistema de revestimentos e seus constituintes, como as argamassas colantes, objeto de estudo neste trabalho.

Para se conhecer os níveis de tensões geradas por essas variações, são realizados os cálculos a seguir para um pano de revestimento. Apesar deste pano se enquadrar melhor à situação de expansão plana, para fim de simplificação de cálculos será usada a expressão da deformação linear considerando o plano como uma barra de secção S com uma de suas extremidades fixa como mostrado na figura 27.

Figura 27 – Ilustração esquemática de expansão térmica linear



Fonte: O autor

Considerando este corpo livre para deformar-se com uma variação de temperatura ΔT , sua deformação seria dada por:

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (06)$$

Porém, considera-se uma força N , impedindo essa deformação. Neste caso, essa força seria dada por:

$$N = - \alpha \cdot \Delta T \cdot E \cdot S \quad (07)$$

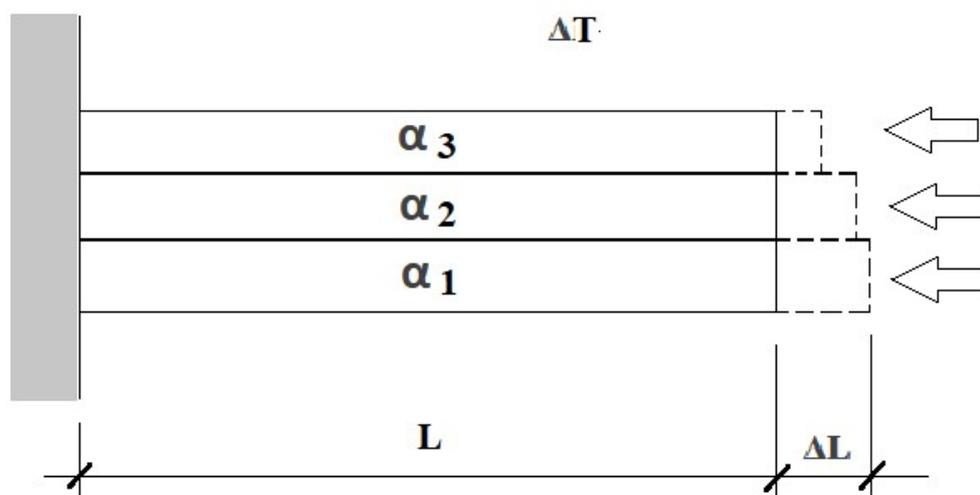
Sendo E o módulo de elasticidade do material.

A tensão que essa “barra” estaria sujeita seria:

$$\sigma = - \alpha \cdot \Delta T \cdot E \quad (08)$$

Agora será adotada a situação da figura 28, composta por três camadas, 1, 2 e 3 seguindo o mesmo raciocínio da figura anterior. Considere cada camada livre para a movimentação também em suas interfaces com as camadas vizinhas. A camada 1 corresponde a uma argamassa de emboço, seguindo da camada de argamassa colante e revestimento cerâmico respectivamente.

Figura 28 – Ilustração esquemática de camadas de revestimento em expansão



Fonte: O autor

Num universo onde o conjunto da figura 28 corresponde a um trecho com as dimensões de um único revestimento cerâmico, teremos os seguintes dados:

$$\alpha_1 = 12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$E_1 = 5 \text{ GPa (50.000 Kg/cm}^2\text{)}$$

$$\alpha_2 = 11 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$E_2 = 7 \text{ GPa (70.000 Kg/cm}^2\text{)}$$

$$\alpha_3 = 5,4 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$E_3 = 30 \text{ GPa (300.000 Kg/cm}^2\text{)}$$

$$\Delta T = 10 \text{ } ^\circ\text{C} \quad L = 30 \text{ cm}$$

Aplicando as equações (06) e (08) obtêm-se as deformações e tensões abaixo para cada camada:

$$\Delta L_1 = 0,36 \text{ mm}$$

$$\sigma_1 = 6,0 \text{ Kgf/cm}^2 \text{ (0,6 MPa)}$$

$$\Delta L_2 = 0,33 \text{ mm}$$

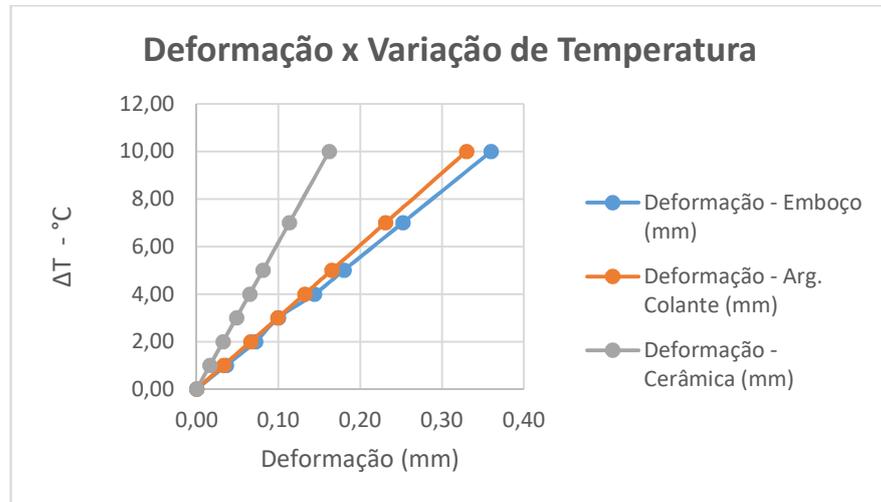
$$\sigma_2 = 7,7 \text{ Kgf/cm}^2 \text{ (0,77 MPa)}$$

$$\Delta L_3 = 0,162 \text{ mm}$$

$$\sigma_3 = 16,2 \text{ Kgf/cm}^2 \text{ (1,62 MPa)}$$

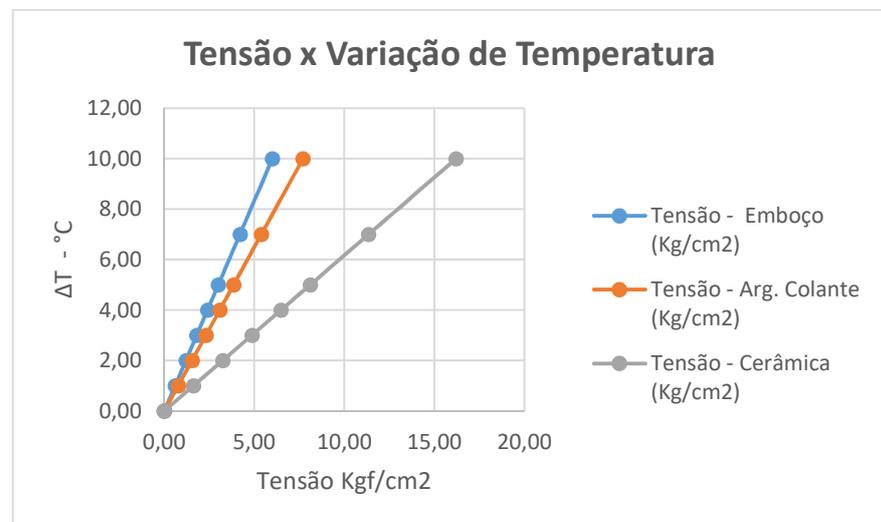
De forma a avaliar o comportamento das tensões e deformações ao longo da variação de temperatura, para este caso teórico onde se considera um universo de uma pastilha cerâmica e suas camadas aderidas de argamassa colante e emboço, foram gerados os gráficos das figuras 29 e 30. Observa-se que as deformações potenciais das argamassas são maiores que a da cerâmica, mas que a tensão necessária para manter a cerâmica sem deformar-se é bem superior às necessárias para as argamassas e variam de acordo com o acréscimo de temperatura.

Figura 29 – Gráfico da deformação em função da variação da temperatura



Fonte: O autor

Figura 30 – Gráfico da tensão em função da variação da temperatura



Fonte: O autor

Dessa forma, ao se elevar a temperatura em 10°C, a cerâmica deformará 0,16mm. Como essa medida é inferior à espessura mínima do rejunte, considerando o valor mínimo de 5mm dado pela NBR 13755:2017, a cerâmica não terá impedimento para essa expansão. Porém, a argamassa colante aderida à cerâmica tende a expandir 0,33 mm, valor superior ao da cerâmica neste caso e assim se verá impedida de deformar-se devido sua aderência com a mesma. Sendo assim, têm-se uma condição de tração para a peça cerâmica e de compressão para a argamassa colante,

gerando uma tensão de cisalhamento entre ambas no valor igual à tensão necessária para conter a argamassa colante, ou seja, 0,77 MPa. Forma-se então uma tensão de cisalhamento entre o revestimento cerâmico e a argamassa colante que varia de 0,0 a 0,77 MPa para cada ciclo e para a variação de temperatura citada ao longo da vida útil deste sistema. Para este exemplo, usou-se a variação de temperatura de 10°C, mas sabe-se que estas temperaturas nos revestimentos cerâmicos podem ser maiores devido à insolação direta e fatores como a cor das mesmas, como mostram os estudos realizados por Rêgo (2012).

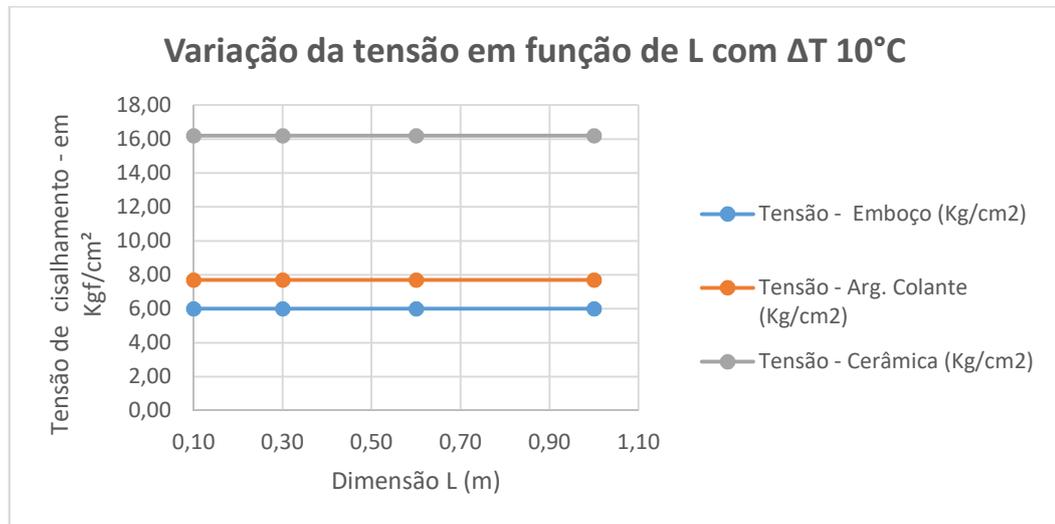
Rêgo (2012) cita ainda em seu trabalho que numa investigação realizada nas fachadas de edifícios na cidade de João Pessoa PB, onde se detectaram patologias de deslocamento, que estas apresentavam em sua grande maioria a ruptura entre a interface da cerâmica com a argamassa colante, o que estaria de acordo, portanto com o exemplo teórico apresentado neste trabalho.

Matsumoto et al. (2007) conclui em sua pesquisa com aplicação de variação de temperatura em um pequeno sistema de revestimento, produzido como corpo de prova para ensaio à fadiga e análise das tensões de interface, que a tensão de cisalhamento nas interfaces se mostraram mais severas que as de tração e compressão.

Deve-se salientar que o fator da expansão dada por variação das temperaturas é apenas um dos causadores de tais patologias que se somam a outros como a expansão por umidade por exemplo. Os cálculos realizados anteriormente e toda essa discussão foi incluída neste trabalho para ilustrar e quantificar melhor as tensões que podem estar gerando fadiga nas argamassas colantes e, por isso, estas são o objeto desta pesquisa.

Uma outra conclusão interessante neste exemplo teórico é apresentada na figura 31. Como a tensão necessária para se inibir a expansão linear do material é dada pela expressão (3), vê-se que as dimensões da cerâmica não influenciariam nos valores dessas tensões de cisalhamento.

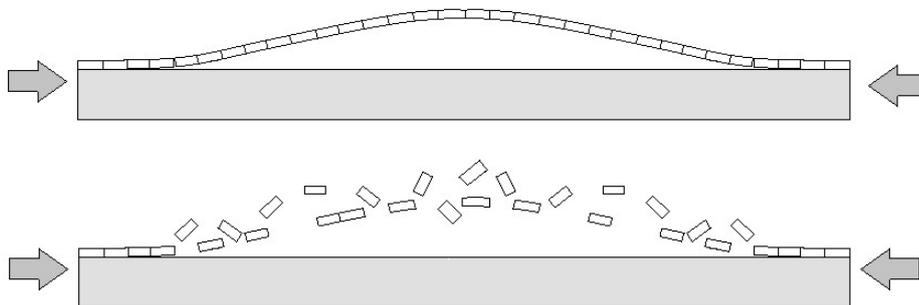
Figura 31 – Variação das tensões em função da dimensão do revestimento cerâmico



Fonte: O autor

Ainda sobre fatores que contribuem para a geração das tensões nas argamassas colantes e demais componentes do sistema de revestimento, Fiorito (1994) apresenta exemplos teóricos semelhantes e inclui também em seu livro situações de compressão e tração dos panos de revestimento gerados pelas deformações das estruturas, e limitações de deformação destas causadas pela falta de juntas de movimentação gerando efeitos como os mostrados na figura 32.

Figura 32 – Deslocamento devido à compressão do pano de revestimento

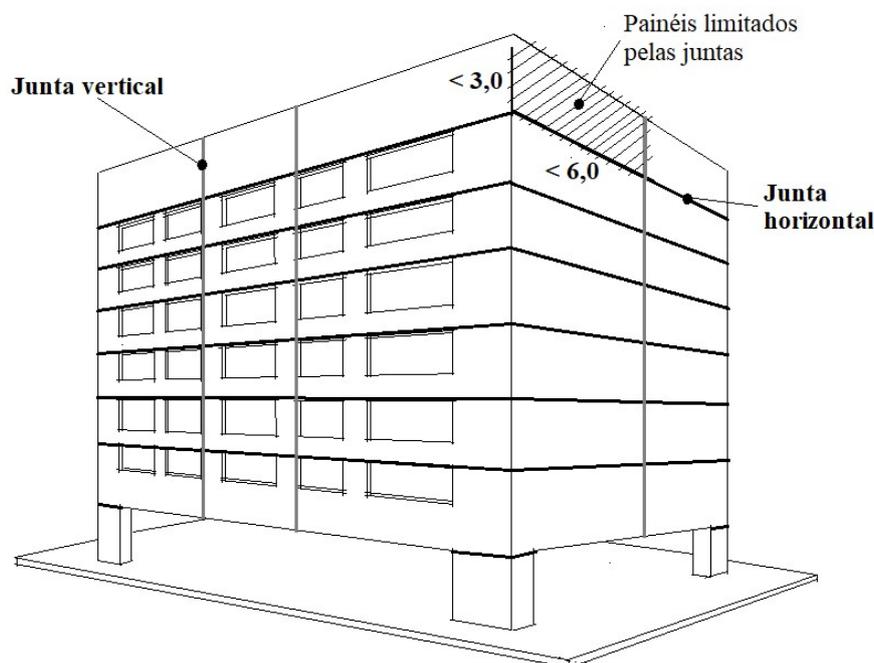


Fonte: Fiorito, 1994

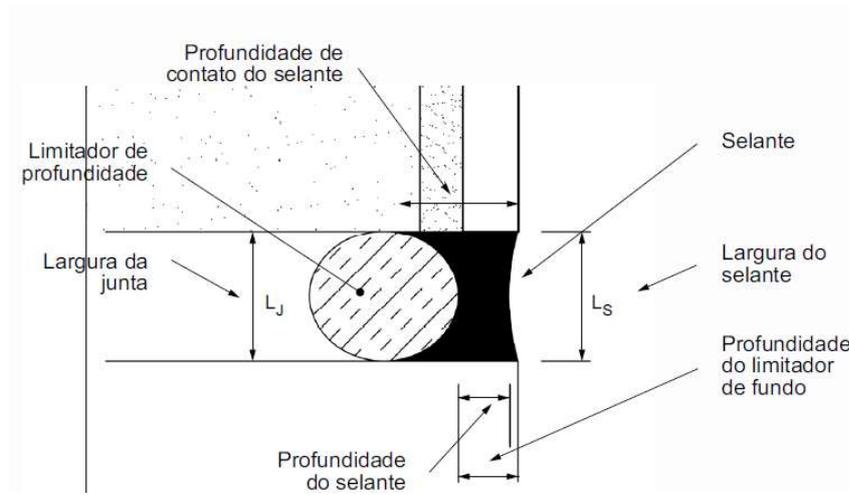
A fim de se evitar tais colapsos, a NBR 13755 (ABNT, 2017) apresenta critérios de projeto e execução desses revestimentos determinando limites máximos para a inclusão de juntas de movimentação (comumente chamadas de juntas de dilatação – ver figura 33), juntas de assentamento, limite de expansão por umidade etc.

Um projeto de revestimento visa apresentar detalhes construtivos e especificações técnicas de materiais para permitir que o sistema de revestimento executado venha a adquirir características e propriedades suficientes para assimilar as tensões a eles impostas ao longo de sua vida útil. Um pano de revestimento, ou seja, a área de revestimento limitada por suas extremidades através de quinas ou juntas de movimentação, não deve, segundo a referida norma, ultrapassar alturas de 3 m e comprimentos de 6 metros, de modo a formar painéis que suportem os efeitos cumulativos das movimentações pelo edifício e pelos fatores climáticos como a temperatura e umidade descritas nesse trabalho como um dos principais fatores geradores de tensões cíclicas nas argamassas colantes os demais constituintes do revestimento.

Figura 33 – Painéis de revestimento e posicionamento das juntas de movimentação segundo critérios da NBR 13755:2017



Fonte: O autor

Figura 34 – Configuração simples das juntas de movimentação

Fonte: ABNT NBR 13755, 2017

3.0 EXPERIMENTO

3.1 Planejamento dos ensaios

Para a definição dos tipos de corpos de prova e demais parâmetros que seriam adotados para a pesquisa, foram considerados a utilização de corpos de prova cilíndricos 5x10cm, 10x10cm e prismáticos 4x4x16cm. Três amostras de cada modelo foram moldadas utilizando argamassa colante ACI e ACII com o intuito de avaliar previamente a melhor alternativa. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Ensaio de Materiais e de Estruturas (LABEME) da UFPB em João Pessoa- PB utilizando a máquina de Ensaio dinâmicos Servopulser da Shimadzu (figuras 35 e 36)

Os corpos de prova cilíndricos foram ensaiados pela compressão diametral e os prismáticos pelo ensaio de tração na flexão (figuras 35 e 36). Em ambos foram obtidas as tensões de ruptura estática para uma unidade e nos demais foi aplicada carga cíclica na frequência de 5HZ com cargas de 80 e 90% da carga de ruptura estática. Diante dos resultados, notou-se o seguinte:

- a) Elevado número de ciclos para rompimento dos corpos de prova cilíndricos comparados com os prismáticos;
- b) Necessidade de ajuste da Sensibilidade da máquina diante da fragilidade do material estudado;
- c) Rupturas bruscas e inconsistentes de alguns corpos de prova, demonstrando o elevado desvio padrão para este tipo de material e ensaio.
(Ver item 2.3.5)

Figuras 35 e 36 – Ensaio de Tração por compressão diametral e de Tração na Flexão

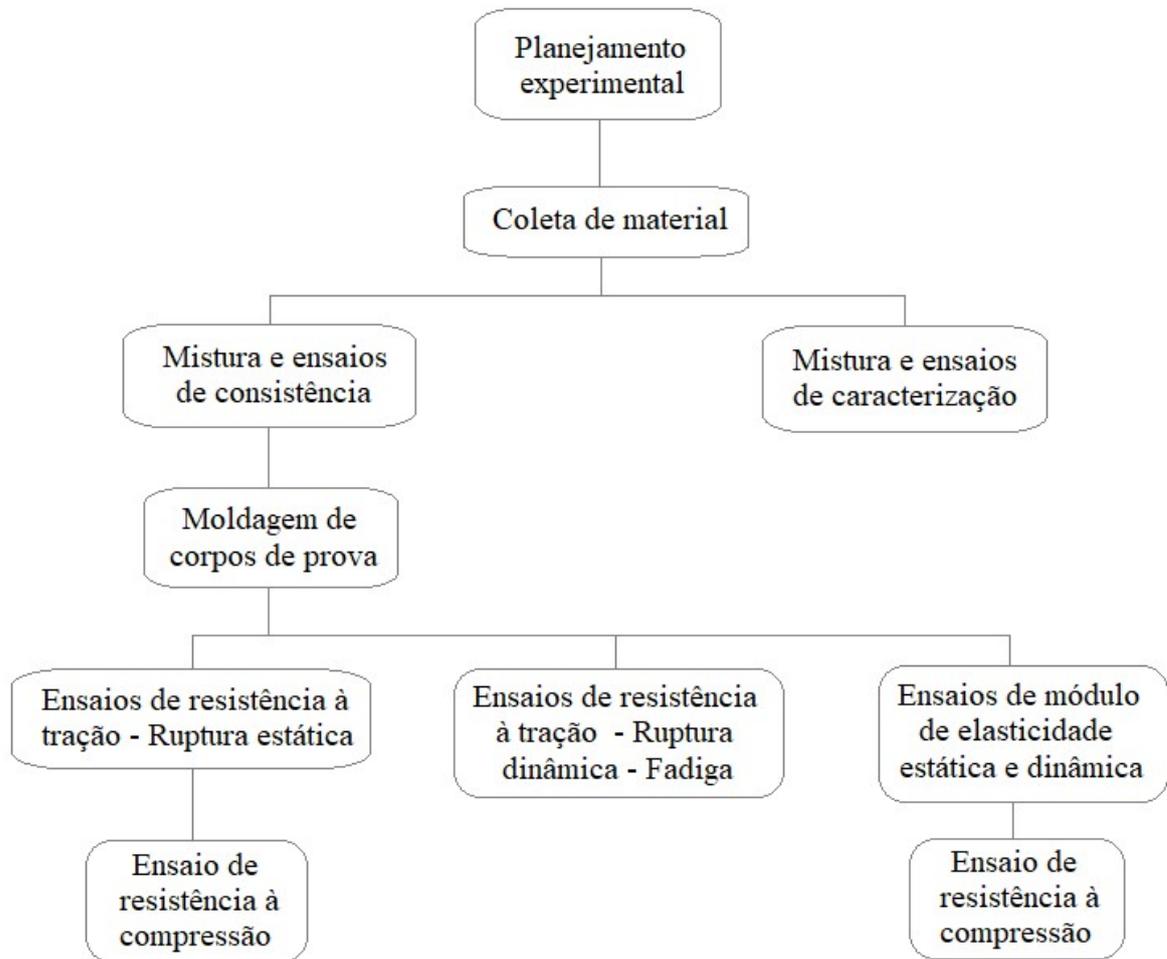


Fonte: O autor

Diante dessas informações, entendeu-se que, para um melhor estudo do comportamento dessas argamassas à fadiga, seriam necessários uma maior quantidade de corpos de prova para que estatisticamente se pudesse chegar a um resultado aceitável, bem como pontos suficientes para a geração da curva S-N. Como consequência desta maior quantidade de corpos de prova a serem ensaiados, optou-se pelo uso de corpos de prova prismáticos com ensaios de tração indireta, visto que suas rupturas em ensaios de cargas dinâmicas ocorreram com menores ciclagens e assim viabilizaria a pesquisa sob o ponto de vista de tempo.

Dessa forma, os ensaios foram planejados seguindo o organograma conforme a figura 37, onde os materiais de um mesmo fornecedor e mesmo lote foram destinados para duas frentes de trabalhos, uma na caracterização e outra para os ensaios de fadiga, tração, compressão e módulos de elasticidade.

Figura 37 – Organograma da pesquisa



Fonte: O autor

A quantidade de corpos de prova definidos para cada tipo de ensaio está apresentada na tabela 03, com a previsão de 12 corpos de prova cilíndricos 10x20cm (Diâmetro x altura) e 180 prismáticos 4x4x16cm.

Tabela 03 – Quantitativos de Corpos de Prova por ensaios

	Volume do CP (Cilíndrico) (10x20)cm - (m ³)	Volume do CP (4x4x16) cm - (m ³)	Volume Total de Argamassa por Tipo (m ³)	Romp. Carga Estática à Tração Indireta (RTI)	Romp. Carga Cíclica à Tração Indireta - (10HZ - 0,9RTI)	Romp. Carga Cíclica à Tração Indireta - (10HZ - 0,8RTI)	Romp. Carga Cíclica à Tração Indireta - (10HZ - 0,7RTI)	Romp. Carga Cíclica à Tração Indireta - (10HZ - 0,6RTI)	Módulo de Elasticidade Estático e Dinâmico (CP 10x20)cm	Total de Corpos de Prova
Copos de Prova Cilíndricos	0,00157		0,00157							
Copos de Prova Prismáticos		0,0003	0,00026							
A			0,0123	9	9	9	9	9	3	48
B			0,0123	9	9	9	9	9	3	48
C			0,0123	9	9	9	9	9	3	48
D			0,0123	9	9	9	9	9	3	48
	Volume total (m ³)		0,0510							192

Fonte: O autor

Devido à falta de alguns equipamentos para alguns tipos de trabalhos no laboratório da Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP), os trabalhos foram realizados nos locais descritos a seguir:

- Mistura, Ensaio de consistência, moldagem e cura no Laboratório de Materiais de construção da UNICAP;
- Ensaio de Caracterização (*Tempo em Aberto, Deslizamento e Resistência de Aderência*) no Laboratório de Materiais de Construção do SENAI em Jaboatão dos Guararapes PE;
- Ensaio de Tração na flexão estática, Fadiga na tração indireta e compressão no LABEME, Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas da UFPB;
- Ensaio de determinação de Módulo de Elasticidade Dinâmico no Laboratório de Materiais de Construção da UNICAP;
- Ensaio de Módulo Estático de Elasticidade e de Deformação à compressão no laboratório da TECOMAT em Recife PE.

3.2 Metodologia dos ensaios realizados

Neste item serão apresentadas as informações necessárias e bibliografias para a realização dos ensaios previstos de acordo com o organograma planejado para esta pesquisa.

3.2.1 Caracterização das argamassas

3.2.1.1 Mistura e ensaio de consistência

A mistura e os ensaios de consistência das argamassas para fins de caracterização são regulamentados pelas normas NBR 16541 (ABNT, 2016), NBR 7215 (ABNT 2019) e NBR 13276 (ABNT, 2016).

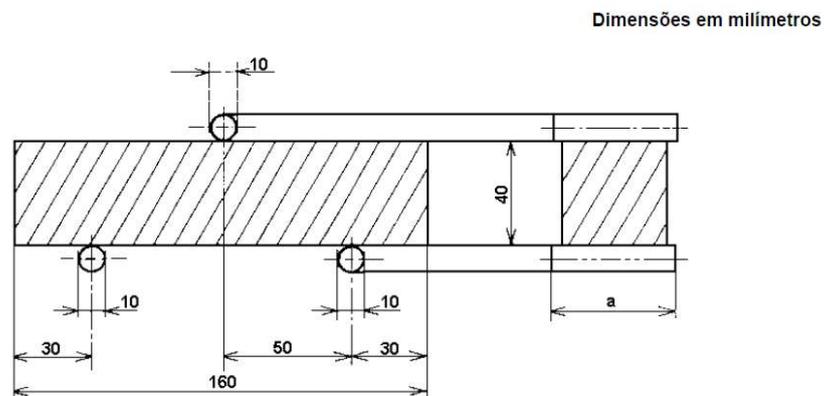
3.2.1.2 Tempo em aberto – Resistência de aderência - Deslizamento

Os ensaios de Tempo em Aberto, Deslizamento e Resistência de Aderência foram realizados conforme descritos nas NBR 14081-1 a 5 (ABNT, 2012 a 2018). Esses ensaios foram realizados no Laboratório do SENAI em Jaboatão dos Guararapes-PE com apoio da equipe técnica local. Os resultados são apresentados na tabela 06 deste trabalho.

3.2.1.3 Resistência à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão é regido pela NBR 13279 (ABNT 2005) e consiste em utilizar corpos de prova prismáticos de secção 4x4x16cm em esforços de flexão conforme mostra a figura 38.

Figura 38 – Ilustração do dispositivo de carga para a determinação da resistência à tração na flexão.



Fonte: ABNT NBR 13279, 2005

As cargas medidas no momento da ruptura na flexão são tratadas conforme a equação a seguir, para se obter a resistência à tração na Flexão "R_f". Os resultados são apresentados na tabela 09 no capítulo 4 deste trabalho.

$$R_f = \frac{1,5 F_f L}{40^3}$$

onde:

R_f é a resistência à tração na flexão, em megapascals;

F_f é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em newtons;

L é a distância entre os suportes, em milímetros;

3.2.1.3 Resistência à compressão

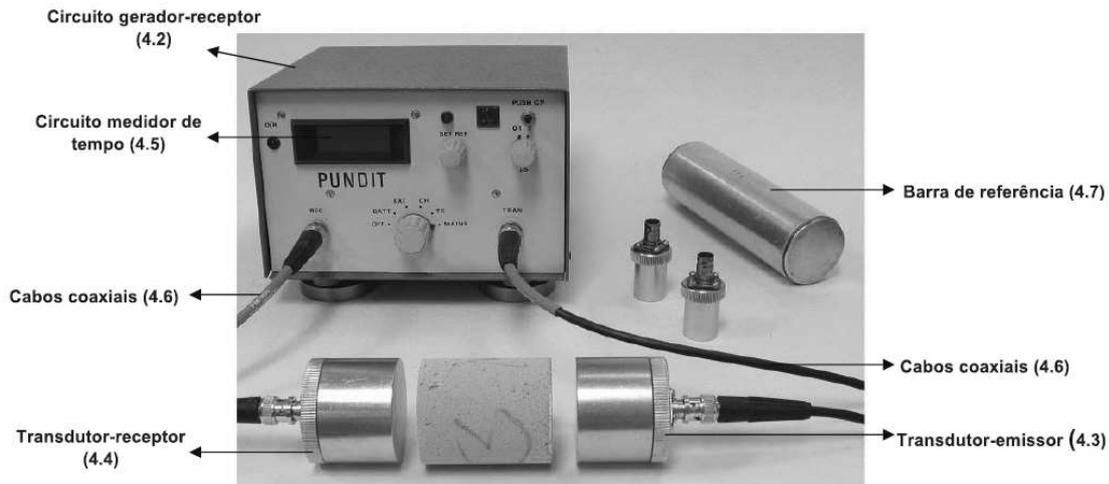
Para a obtenção das Curvas de rupturas das Argamassas, bem como o gráfico de fadiga à compressão, faz-se necessário a realização de ensaios de compressão estática dos corpos de prova, utilizando as metades provenientes das rupturas por tração indireta em regime estático. Esse procedimento é descrito na NBR 13279 (ABNT, 2005).

3.2.1.4 Módulo de Elasticidade

Foram realizados ensaios de Módulo de Elasticidade Dinâmico e Estático seguindo as recomendações das normas NBR 15630 (ABNT, 2009) e NBR 8522 (ABNT, 2017). Para os módulos de elasticidade foram moldados 12 corpos de prova cilíndricos com dimensões 10x20 cm (Diâmetro e Altura), sendo três unidades para cada tipo de argamassa, onde foram realizados inicialmente os ensaios de módulo de elasticidade em todas as unidades e, posteriormente, estes mesmos corpos de prova foram utilizados para os ensaios de módulos de elasticidade estático.

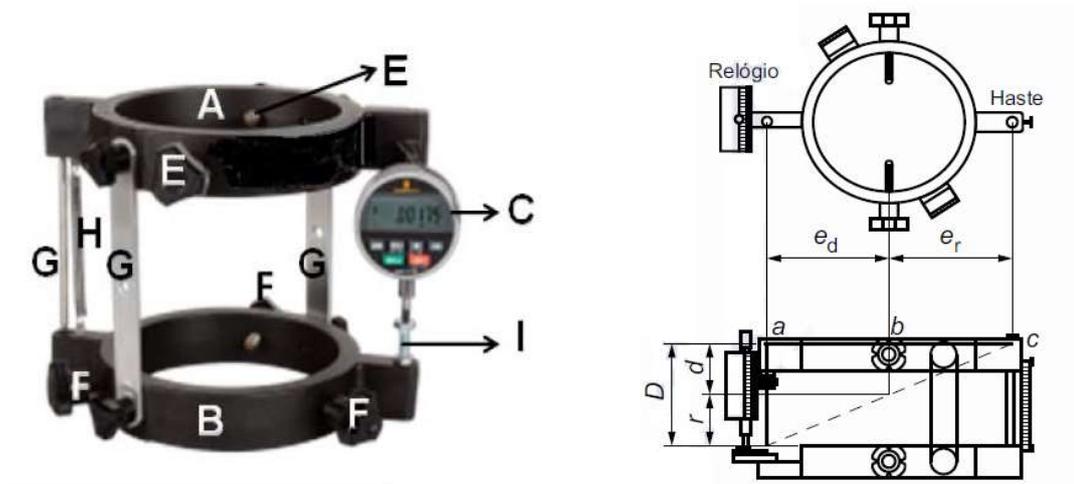
Os aparelhos para a realização dos ensaios são apresentados abaixo através das figuras 39 e 40 para os módulos de elasticidade dinâmico e estático respectivamente.

Figura 39 - Aparelho de pulso elétrico de baixa frequência ultra-sônica usado para obtenção dos módulos dinâmicos



Fonte: ABNT NBR 15630, 2009

Figura 40 – Exemplo de compressômetro com base dependente. Aparelho usado para a obtenção dos módulos de elasticidade estático



Fonte: ABNT NBR 8522, 2017b

3.3 Execução dos ensaios

3.3.1 Produção das argamassas e moldagem dos corpos de prova

3.3.1.1 Materiais para as Amostras

Para a produção das argamassas e moldagem dos corpos de prova foram utilizados 04 tipos de argamassas colantes de um mesmo fabricante, recebendo a nomenclatura de A, B, C e D, para este trabalho de pesquisa.

As embalagens foram utilizadas para duas frentes de trabalho, sendo uma parte com cerca de 10 Kg de cada embalagem utilizada no laboratório da Unicap em Recife, para a moldagem dos corpos de prova e ensaios de consistência, e o volume restante utilizado no Laboratório do Senai em Jaboatão dos Guararapes PE, para os ensaios de caracterização.

3.3.2 Mistura e ensaio de consistência

Para esta etapa foram utilizados os seguintes equipamentos de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 2019) (Anexo A):

- 01-Misturador mecânico de Bancada;
- 02-Espátulas;
- 01-Mesa de consistência – Flow table;
- 01-Molde rígido troncônico;
- 01-Soquete metálico.

As argamassas foram preparadas de acordo com a NBR 13276 (ABNT, 2016). A quantidade de água da mistura adotada foi o valor médio indicado nas embalagens para cada tipo de argamassa.

Figura 41 – Misturador Mecânico e acessórios



Fonte: O autor

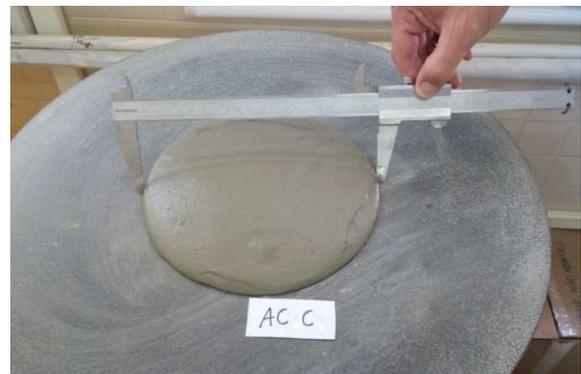
Figura 42 – Flow Table e molde rígido



Fonte: O autor

Os ensaios de consistência foram realizados de acordo com a NBR 13276 (ABNT, 2016):

Figuras 43 e 44 – Determinação do índice de Consistência



Fonte: O autor

3.3.3 Moldagem

As moldagens dos corpos de prova prismáticos ocorreram de acordo com a NBR 13279-2005, utilizando moldes de três unidades com 4x4x16cm. Os corpos de prova de cada tipo de argamassa foram moldados no mesmo dia, usando sua única mistura e sendo manuseada pelo mesmo técnico de laboratório, para dirimir possíveis variações.

Foram utilizados os seguintes equipamentos:

14- Formas metálicas com 03 moldes de 4x4x16cm;

01-Mesa vibratória de adensamento;

Figuras 45 e 46 – Moldagem dos corpos de prova



Fonte: O autor

Figuras 47 e 48 – Moldagem dos corpos de prova prismáticos



Fonte: O autor

Para as moldagens dos corpos de prova cilíndricos foi tomado como referência a NBR 5738-2015, utilizando moldes 10x 20cm.

Foram utilizados os seguintes equipamentos:

06- Formas metálicas cilíndricas de dimensões 10x20cm;

01-Haste de adensamento cilíndrica.

Figuras 49, 50 e 51 – Moldagem dos corpos de prova prismáticos



Fonte: O autor

3.3.4 Ensaios de caracterização

Para os ensaios de caracterização, foram seguidas as orientações das NBR 14081-1 a 5 – 2012. Os aparelhos utilizados foram:

- 01-Balança eletrônica;
- 01-Misturador mecânico;
- 01-Desempenadeira metálica denteada;
- 01-Cronômetro;
- 01-Anemômetro;
- 01-Paquímetro;
- 08-Substratos Padrão;
- 01-Máquina de arrancamento por tração com controle de velocidade;
- 20-Peças metálicas não deformáveis de secção quadrada com dispositivo para acoplamento na máquina;
- 01-Massa adesiva;
- 01-Quadro articulado

Foram realizados os ensaios de Tempo em Aberto, Deslizamento e Resistência de Aderência conforme descritos nas NBR 14081-1 a 5 (ABNT, 2012).

Esses ensaios foram realizados no Laboratório do SENAI em Jabotão dos Guararapes com apoio da equipe técnica local. Cada ensaio segue descrito em maiores detalhes a seguir:

3.3.5 Tempo em aberto

O ensaio para determinação do Tempo em Aberto é regulamentada pela NBR 14081-3 que estabelece um método para determinação do tempo em aberto para argamassa colante industrializada destinada ao assentamento de placas cerâmicas em pisos e paredes pelo método da camada fina, utilizando carga estática.

Para este ensaio foram utilizados os materiais e equipamentos:

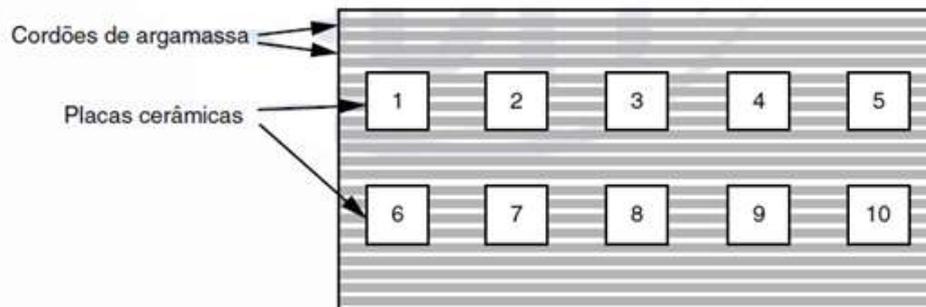
- Argamassa colante preparada conforme a ABNT NBR 14081-2;
- Substrato Padrão conforme ABNT NBR 14081-2;
- Placas cerâmicas para revestimento do grupo BIII, conforme a ABNT 13817;
- Adesivo acrílico;
- Máquina de arrancamento por tração com controle de velocidade;
- Peças metálicas não deformáveis sob carga de ensaio com secção quadrada;
- Pesos padrão de material sólido e rígido com 2,0 Kg e com secção de apoio de formato quadrado na mesma dimensão das peças metálicas;
- Cronômetro com resolução mínima de 1s;

A Argamassa foi estendida/espalhada com a utilização da desempenadeira metálica dentada na direção longitudinal sobre o substrato-padrão, seguindo as prescrições indicadas na NBR 14081-2 (ABNT, 2012) e ao final da operação acionado o cronômetro. Transcorrido o tempo conforme o especificado na NBR 14081-1 para o tempo em aberto do produto ensaiado, foram posicionadas dez placas cerâmicas, conforme figura 35, sobre quatro cordões da argamassa colante estendida e carregada cada placa manual e centralizada com a massa-padrão durante 30 s. O intervalo de tempo entre a colocação da primeira placa cerâmica e a última massa-padrão não pôde exceder 30 s conforme orientação da Norma.

A ordem de colocação e retirada das massas-padrão sobre as placas cerâmicas foi igual à ordem de colocação das placas cerâmicas sobre os cordões de

argamassa. Além disso, as massas-padrão foram posicionadas somente após a colocação da décima placa cerâmica sobre a argamassa.

Figura 52 – Ilustração da distribuição das placas sobre a argamassa estendida



Fonte: ABNT NBR 14081-3, 2015

Após a retirada das massas-padrão, foram retirados os cordões excedentes, deixando aproximadamente 1 cm de cordão ao redor das placas cerâmicas. Operação realizada no máximo 10 min após o final da operação de retirada das massas-padrão sobre as placas cerâmicas.

Os conjuntos formados por substrato-padrão, argamassa e placas cerâmicas foram estocados em local não confinado, com separação mínima de 20 mm entre eles, permanecendo na posição horizontal por no mínimo 24 h. Após esse período puderam ser estocados na posição vertical.

Os conjuntos foram mantidos durante 28 dias nas condições ambientais descritas na NBR 14081-2 (ABNT, 2012), Seção 5.

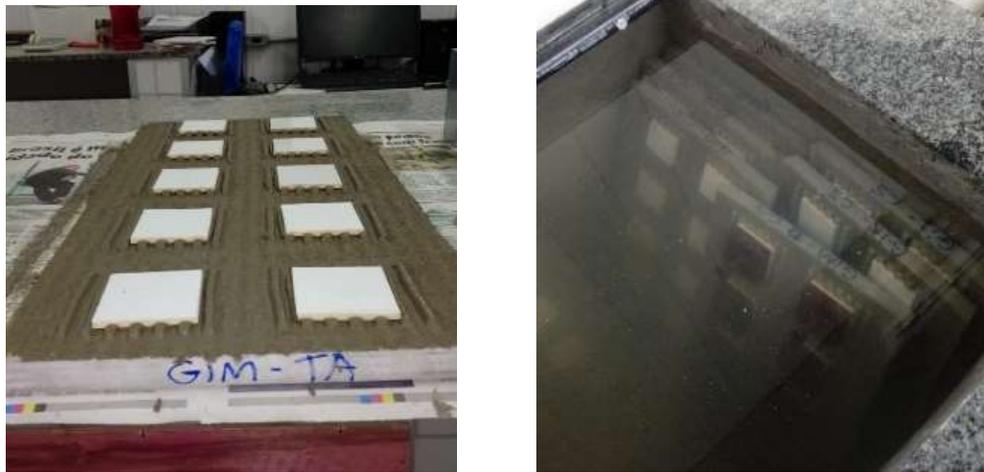
A partir de 72 h antes da data do arrancamento, foi colado em cada placa cerâmica uma peça metálica de arrancamento, utilizando adesivo, de maneira que as suas superfícies ficaram sobrepostas.

3.3.6 Ensaio de resistência de aderência à tração direta

Na idade de 28 dias foi executado o ensaio de arrancamento por tração mecânica e controlada, aplicando carga a uma velocidade uniforme de (250 ± 50) N/s até a ruptura.

As cargas máximas foram registradas e são apresentadas na tabela 06.

Figuras 53 e 54 – AC tipo A – Moldagem e Cura Submersa



Fonte: O autor

Figuras 55 – AC tipo A – Fixação de Suportes para ensaio de Aderência



Fonte: O autor

Figuras 56 e 57 – Cura em estufa AC tipo B e C e Deslizamento



Fonte: O autor

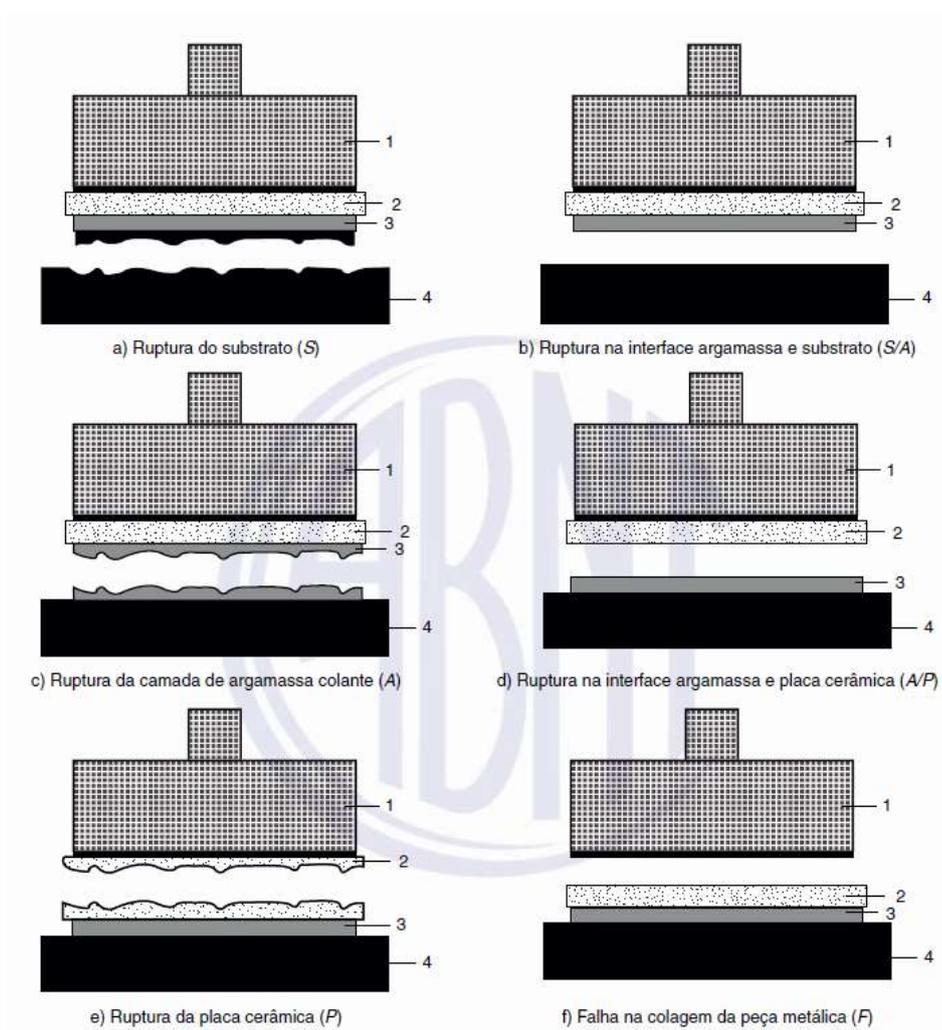
Figuras 58 e 59 – Ensaio de resistência de aderência



Fonte: O autor

Cada placa cerâmica arrancada no ensaio foi analisada para descrever o tipo de ruptura e sua porcentagem aproximada, conforme descreve a NBR 14081-3:2015, através da ilustração (Figura 60).

Figura 60 -Ilustração da NBR 14081-3:2015



Fonte: ABNT NBR 14081-3, 2015

- a) ruptura do substrato (S);
- b) ruptura na interface argamassa e substrato (S/A);
- c) ruptura da camada de argamassa colante (A);
- d) ruptura na interface argamassa e placa cerâmica (A/P);
- e) ruptura da placa cerâmica (P);
- f) falha na colagem da peça metálica (F).

Legenda: 1 – peça metálica; 2 – placa cerâmica; 3 – argamassa colante; 4 – substrato-padrão

3.3.7 Ensaio de resistência à compressão

Os ensaios de compressão estática dos corpos de prova, utilizando as metades provenientes das rupturas por tração indireta em regime estático, foram realizados também na LABEME. Sob orientação do técnico responsável pelo laboratório, tomou-se bastante cuidado na velocidade de aplicação de carga nos corpos de prova, já que se tratava de uma máquina de aplicação manual (Figura 61).

Figura 61 – Ensaio de Compressão



Fonte: O autor

As cargas de ruptura foram obtidas em Kgf, sendo calculadas as tensões em MPa adotando a área de contato de 4x4cm. Os resultados são apresentados na tabela 17 do capítulo 4.

3.3.8 Ensaio de módulo de elasticidade

Os módulos de elasticidade das argamassas foram obtidos através dos ensaios de Módulo de Elasticidade Dinâmico e Estático seguindo as recomendações da NBR 15630 (ABNT, 2009) e NBR 8522 (ABNT, 2017) respectivamente.

Para o ensaio de propagação de onda ultrassônica os 12 corpos de prova tiveram suas superfícies regularizadas através de uma retífica. Após isso, os CPs receberam identificação com numeração em complemento ao tipo de argamassa já

marcado. Os ensaios foram realizados utilizando o aparelho de pulso elétrico e acessórios idênticos ao descrito em norma, onde após a realização da calibração realizada através de uma barra de referência do próprio equipamento, pôde-se realizar as leituras para cada corpo de prova e registrá-las. Os valores obtidos em μs (microsegundo) são mostrados na tabela 4.

Tabela 4 – Dimensões dos corpos de prova e medições no aparelho de ultrassom

	CP	D (mm)	L (mm)	μs
ACI	1	99,00	195,00	65,50
ACI	2	99,00	195,00	68,90
ACI	3	99,00	193,00	65,90
ACII	4	97,00	194,00	72,60
ACII	5	100,00	195,00	68,40
ACII	6	99,00	194,00	76,50
ACIII	7	99,00	197,00	73,80
ACIII	8	99,00	197,00	73,50
ACIII	9	100,00	196,00	74,40
ACIII B	10	100,00	195,00	66,40
ACIII B	11	100,00	198,00	62,60
ACIII B	12	100,00	197,00	63,40

Fonte: O autor

Com estes resultados pode-se calcular os demais parâmetros para a obtenção dos módulos de elasticidade seguindo a NBR 15630-2009:

$$V = \frac{L}{t}$$

Onde:

V - é a velocidade de propagação da onda ultrassônica, expressa em milímetros por micros segundos ($\text{mm}/\mu\text{s}$), arredondado à segunda casa decimal;

L - é a distância entre os pontos de acoplamento dos transdutores (comprimento do corpo de prova);

T - é o tempo registrado pelo mostrador digital, expresso em micros segundos (μs).

Dessa forma, os módulos de elasticidade são calculados com a equação (6.0):

$$E_d = v^2 \rho \frac{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}{1 - \mu} \quad (6.0)$$

Onde:

E_d – é o módulo de elasticidade dinâmico expresso em megapascal (MPa);

V – é a velocidade de propagação da onda ultrassônica, expressa em milímetros por micros segundos (mm/ μ s);

P – é a densidade da massa aparente do corpo de prova, expressa em quilogramas por metro cúbico (Kg/m³);

μ - é o coeficiente de Poisson. Adota-se nessa equação o valor 0,2.

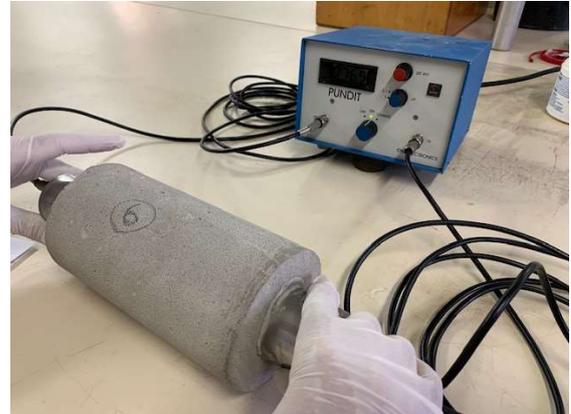
Todos os valores calculados são apresentados na tabela 05.

Tabela 05 – Dados gerais dos ensaios de módulo de elasticidade dinâmica

	CP	ρ (Kg/m ³)	E_d (GPa)
ACI	1	1.535,16	12,25
ACI	2	1.535,16	11,07
ACI	3	1.535,16	11,85
ACII	4	1.378,91	8,86
ACII	5	1.378,91	10,09
ACII	6	1.378,91	7,98
ACIII	7	1.390,63	8,92
ACIII	8	1.390,63	8,99
ACIII	9	1.390,63	8,69
ACIII B	10	1.535,16	11,92
ACIII B	11	1.535,16	13,82
ACIII B	12	1.535,16	13,34

Fonte: O autor

Figuras 62 e 63 – Ensaio de módulo de elasticidade dinâmico



Fonte: O autor

Os ensaios para obtenção do módulo de elasticidade estático foram realizados com o apoio da Tecomat em Recife. Foram rompidos 12 corpos de prova, sendo 8 na obtenção dos módulos estáticos. Os resultados médios são apresentados na tabela 06.

Tabela 06 – Dados da resistência a compressão e módulos de elasticidade estático medidos durante os ensaios

	F_c (MPa)	E_c (GPa)
A	15,37	9,50
B	11,33	10,70
C	10,63	7,65
D	18,05	8,85

Fonte: O autor

3.4 Ensaio de fadiga

Em consulta ao portal da ABNT (abnt.org.br), encontram-se disponíveis 39 normas para ensaios de fadiga, porém nenhuma para compostos cimentícios, como argamassas e concretos. Medeiros (2012) e Uchoa (2007) citam que não existe um ensaio padrão para caracterizar o comportamento à fadiga para este tipo de material. Para este trabalho, conforme já citado, foi adotado como referência o ensaio de

resistência à tração na flexão conforme a NBR 13279, (ABNT 2005). Ensaios semelhantes foram realizados por Arapirak et al. (2002).

Estes experimentos foram realizados no Laboratório de Ensaios de Materiais e Estruturas da UFPB – LABEME, utilizando corpos de prova prismáticos 4x4x16cm e a máquina de Ensaios dinâmicos Servopulser da Shimadzu (Figura 64).

Figura 64 – Servopulser Shimadzu E-type Load Frame com o Software Controller 4890 – Imagens do catálogo do Fabricante



Fonte: Shimadzu (2014)

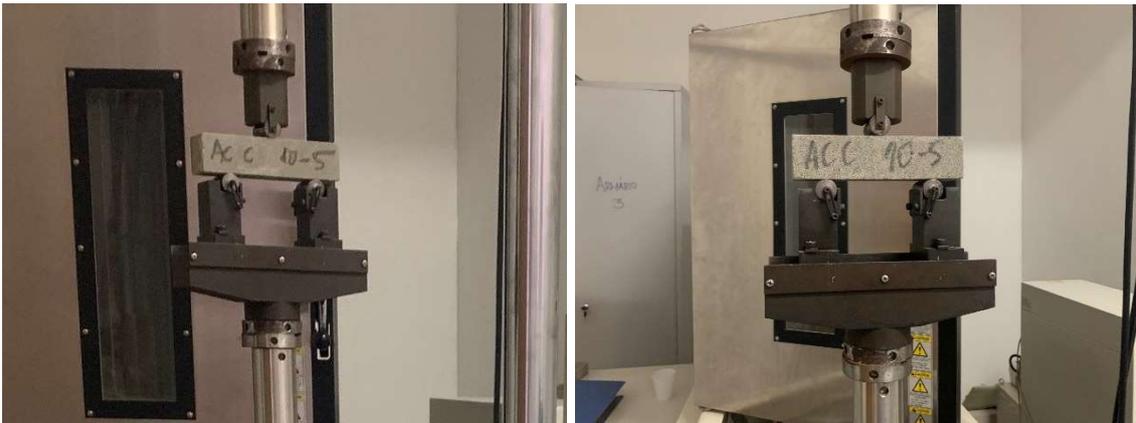
Inicialmente foram obtidas as tensões de ruptura estática média utilizando 09 corpos de prova para cada tipo de argamassa, e nos demais foi aplicada carga cíclica na frequência de 10Hz com cargas de 90%, 80%, 70% e 60% da carga de ruptura estática média obtida. A carga de 10 Hz é atualmente adotada para ensaios de fadiga em concreto para uso rodoviário. Para evitar o efeito de impacto nos corpos de prova, uma carga de 0,05 KN era aplicada previamente pela máquina, para a partir de então, iniciar o carregamento cíclico.

Figuras 65 e 66– Montagem dos acessórios para a fixação dos corpos de prova



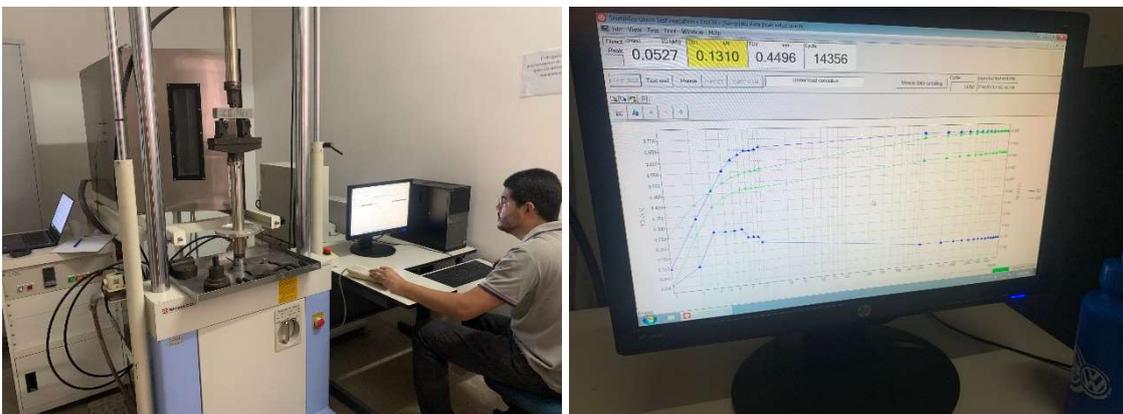
Fonte: O autor

Figuras 67 e 68– Ensaio de Tração na Flexão com carregamento cíclico



Fonte: O autor

Figuras 69 e 70– Ensaio de Tração na Flexão com carregamento cíclico



Fonte: O autor

Figuras 71 e 72– Ensaio de Tração na Flexão com carregamento cíclico e amostras após o rompimento



Fonte: O autor

Os números de ciclos para cada amostra ensaiada foram registrados nas tabelas 08, 09, 10 e 11 que estão disponíveis no capítulo 4 deste trabalho.

4.0 RESULTADOS

Apesar de alguns resultados já terem sido apresentados no capítulo anterior, onde se descrevem os procedimentos nas realizações dos ensaios, este capítulo os resume de forma mais objetiva e organizada para uma consulta mais prática dos dados obtidos e assim posterior análise.

4.1 Caracterização das Argamassas

4.1.1 Consistência

A tabela 07 apresenta os resultados médios de consistência das argamassas em seu estado fresco.

Tabela 07 - Consistência das argamassas

CONSISTÊNCIA – FLOW TABLE (mm)			
A	B	C	D
256	208	215	200
259	212	209	206
256	211	211	205

Fonte: O autor

4.1.2 Tempo em aberto, Resistência de aderência e deslizamento

Os resultados dos ensaios de caracterização realizados no laboratório do Senai são apresentados na tabela 08.

Tabela 08 – Dados dos ensaios de caracterização

ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO			Tipo			
Ensaio	Tipo de Cura	Unidade	A	B	C	D
Tempo em aberto (ACI \geq 15, ACII, ACIII e ACIII B \geq 20 minutos)	Normal	MPa	0,7	0,56	0,74	1,27
Resistência de Aderência à Tração aos 28 dias	Normal	MPa	0,86	0,7	0,85	1,42
Resistência de Aderência à Tração aos 28 dias	Submersa	MPa	0,68	0,61	0,76	0,89
Resistência de Aderência à Tração aos 28 dias	Estufa	MPa	N.D*	0,33	0,31	1,13
Deslizamento		mm	24,44	3,46	24,51	10,15

Nota : N.D* - não determinado

Fonte: O autor

4.1.3 Resistência à Tração por flexão

A tabela 09 refere-se aos dados de ruptura estática através de ensaio de resistência à tração na flexão. As cargas de ruptura estão em KN (quilonewtons) seguindo o padrão do equipamento de teste. Na coluna final são apresentados os valores médios de ruptura para cada tipo de argamassa ensaiada.

Tabela 09 - Ruptura Estática (RE)

	Amostra 01 (KN)	Amostra 02 (KN)	Amostra 03 (KN)	Amostra 04 (KN)	Amostra 05 (KN)	Amostra 06 (KN)	Amostra 07 (KN)	Amostra 08 (KN)	Amostra 09 (KN)	Resist. Estática Média (KN)
A	1,060	1,530	1,236	1,438	1,585	1,529	1,189	1,430	1,386	1,38
B	1,234	1,929	1,075	0,000	1,278	1,085	1,283	1,076	1,930	1,36
C	1,238	0,876	0,939	1,130	1,035	0,840	0,984	1,090	0,984	1,01
D	2,288	1,786	2,029	1,615	1,984	2,025	1,582	1,639	1,590	1,84

Fonte: O autor

4.1.4 Resistência à compressão

Esses dados se referem aos ensaios de resistência à compressão em três das metades dos corpos de prova, para cada tipo de argamassa, após o rompimento pelo ensaio de resistência à tração na flexão. Escolha aleatória.

Tabela 10 – Resumos de dados de tensão de tração e compressão e relação entre elas

	A	B	C	D
Kgf	1.913,00	2.009,00	1.722,00	3.222,00
Kgf	3.051,00	1.681,00	1.426,00	2.420,00
Kgf	2.415,00	1.750,00	1.955,00	3.021,00
Média (Kgf)	2.459,67	1.813,33	1.701,00	2.887,67
Tensão MPa (Compressão) fck	15,37	11,33	10,63	18,05
Tensão MPa (Tração) ftk	3,22	3,19	2,37	4,31
η (fck/ftk)	4,77	3,55	4,49	4,19

Fonte: O autor

4.1.5 Módulos de Elasticidade

As tabelas 11 e 12 apresentam todos os dados obtidos durante os ensaios de módulos de elasticidade, sendo a primeira uma apresentação geral e a seguinte um resumo com suas médias.

Tabela 11 – Tabela geral com dados dos ensaios para Módulos de Elasticidade

	CP	D (mm)	L (mm)	μs	V (mm/ μs)	ρ (Kg/m ³)	Ed (GPa)	Ee (GPa)
A	1	99,00	195,00	65,50	2,98	1.535,16	12,25	
A	2	99,00	195,00	68,90	2,83	1.535,16	11,07	8,50
A	3	99,00	193,00	65,90	2,93	1.535,16	11,85	10,50
B	4	97,00	194,00	72,60	2,67	1.378,91	8,86	
B	5	100,00	195,00	68,40	2,85	1.378,91	10,09	10,70
B	6	99,00	194,00	76,50	2,54	1.378,91	7,98	10,70
C	7	99,00	197,00	73,80	2,67	1.390,63	8,92	
C	8	99,00	197,00	73,50	2,68	1.390,63	8,99	7,20
C	9	100,00	196,00	74,40	2,63	1.390,63	8,69	8,10
D	10	100,00	195,00	66,40	2,94	1.535,16	11,92	
D	11	100,00	198,00	62,60	3,16	1.535,16	13,82	7,59
D	12	100,00	197,00	63,40	3,11	1.535,16	13,34	10,10

Fonte: O autor

Tabela 12 - Resumo com as médias dos Módulos de Elasticidade estático e dinâmico experimentais

	Fc (MPa)	Ed (GPa)	Ee (GPa)
A	15,37	11,72	9,50
B	11,33	8,98	10,70
C	10,63	8,87	7,65
D	18,05	13,03	8,85

Fonte: O autor

4.2 Ensaios de fadiga nas argamassas

Nas tabelas 13 a 16 são apresentados os dados em números de ciclos até o rompimento (N), isto é, a quantidade de ciclos até a ruptura de cada amostra para tensões de 90, 80, 70 e 60% da resistência estática média, em quilonewtons (KN), e a média das 09 amostras inseridas em suas respectivas colunas finais.

Tabela 13 – Fadiga 01 (90%REM)

	Amostra 01 (N)	Amostra 02 (N)	Amostra 03 (N)	Amostra 04 (N)	Amostra 05 (N)	Amostra 06 (N)	Amostra 07 (N)	Amostra 08 (N)	Amostra 09 (N)	Média Nº ciclos (N)
A	392	5486	278	2	5	3	14883	37	4	2343
B	28	13	10009	3	2	2	26	41	2	1125
C	2	1	1	29038	144	168	1	8119	85	4173
D	3	535	782	4186	227	423	78	76	253	729

Fonte: O autor

Tabela 14 – Fadiga 02 (80 % REM)

	Amostra 01 (N)	Amostra 02 (N)	Amostra 03 (N)	Amostra 04 (N)	Amostra 05 (N)	Amostra 06 (N)	Amostra 07 (N)	Amostra 08 (N)	Amostra 09 (N)	Média Nº ciclos (N)
A	1153	1191	2312	1208	7733	148	96	5	6274	2236
B	138	4	52	4	5	2260	654	5	48	352
C	836	466	863	1165	53	841	4	2308	11002	1949
D	7322	65937	545	1226	9867	103	1674	1197	292	9796

Fonte: O autor

Tabela 15- Fadiga 03 (70% REM)

	Amostra 01 (N)	Amostra 02 (N)	Amostra 03 (N)	Amostra 04 (N)	Amostra 05 (N)	Amostra 06 (N)	Amostra 07 (N)	Amostra 08 (N)	Amostra 09 (N)	Média Nº ciclos (N)
A	7	4	3057	48669	2667	1085	1518	5978	1348	7148
B	156	7420	7679	83	2003	1147	10694	4	3	3243
C	12419	29409	73000	6041	18259	16785	361	993	4	17475
D	884	1437	2141	14456	13569	85000	1059	4209	73000	21.751

Fonte: O autor

Tabela 16- Fadiga 04 (60% REM)

	Amostra 01 (N)	Amostra 02 (N)	Amostra 03 (N)	Amostra 04 (N)	Amostra 05 (N)	Amostra 06 (N)	Amostra 07 (N)	Amostra 08 (N)	Amostra 09 (N)	Média Nº ciclos (N)
A	73000	9473	27312	79811	40598	2732	23358	36442	81148	41.542
B	7112	17951	2116	8009	10	42419	74000	20	46	16854
C	73000	73098	55974	88002	95271	73000	73000	73000	73000	75.261
D	78798	108614	29022	77172	74983	73000	40621	44323	10982	59.724

Fonte: O autor

4.2.1 Curva S-N das argamassas

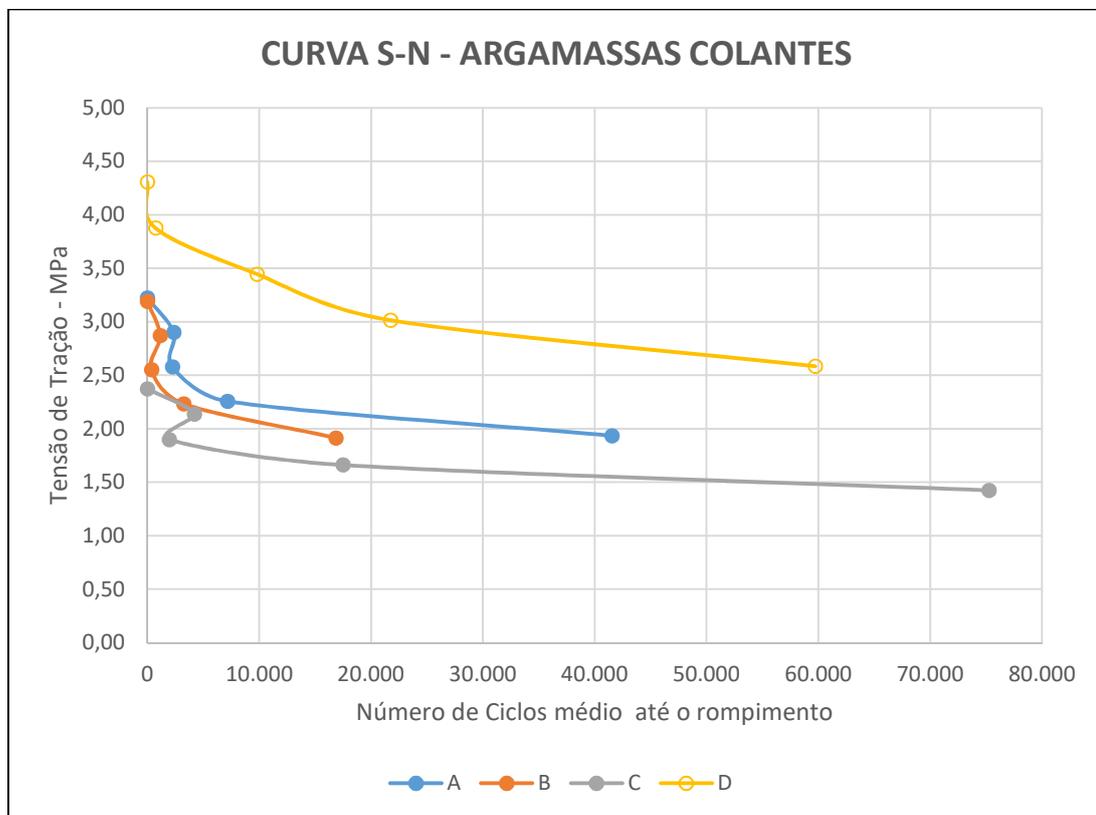
Com os dados obtidos e apresentados nas tabelas anteriores, foram realizados os cálculos de Tensão de Tração na flexão conforme descrição no item 3.2.3 deste trabalho, obtendo a tabela 17 e gerando a Curva de Tensão versus número de ciclos até a ruptura (figuras 73 e 74).

Tabela 17 – Dados das tensões médias de tração e ciclos médios até a ruptura das amostras

	A		B		C		D	
	Mpa	Ciclos	Mpa	Ciclos	Mpa	Ciclos	Mpa	Ciclos
100%	3,22	1	3,19	1	2,37	1	4,31	1
90%	2,90	2.343	2,87	1.125	2,14	4.173	3,88	729
80%	2,58	2.236	2,55	352	1,90	1.949	3,45	9.796
70%	2,26	7.148	2,23	3.243	1,66	17.475	3,01	21.751
60%	1,93	41.542	1,91	16.854	1,42	75.261	2,58	59.724

Fonte: O autor

Figura 73 – Curva S-N das Argamassas ensaiadas, objetos deste estudo



Fonte: O autor

Tabela 18 – Dados de Tensão e Log (N) para ACI

A			
	Mpa	Ciclos	Log (N)
100%	3,22	1	0,00
90%	2,90	2.343	3,37
80%	2,58	2.236	3,35
70%	2,26	7.148	3,85
60%	1,93	41.542	4,62

Fonte: O autor

Tabela 19 – Dados de Tensão e Log (N) para ACII

B			
	Mpa	Ciclos	Log (N)
100%	3,19	1	0,00
90%	2,87	1.125	3,05
80%	2,55	352	2,55
70%	2,23	3.243	3,51
60%	1,91	16.854	4,23

Fonte: O autor

Tabela 20 – Dados de Tensão e Log (N) para ACIII

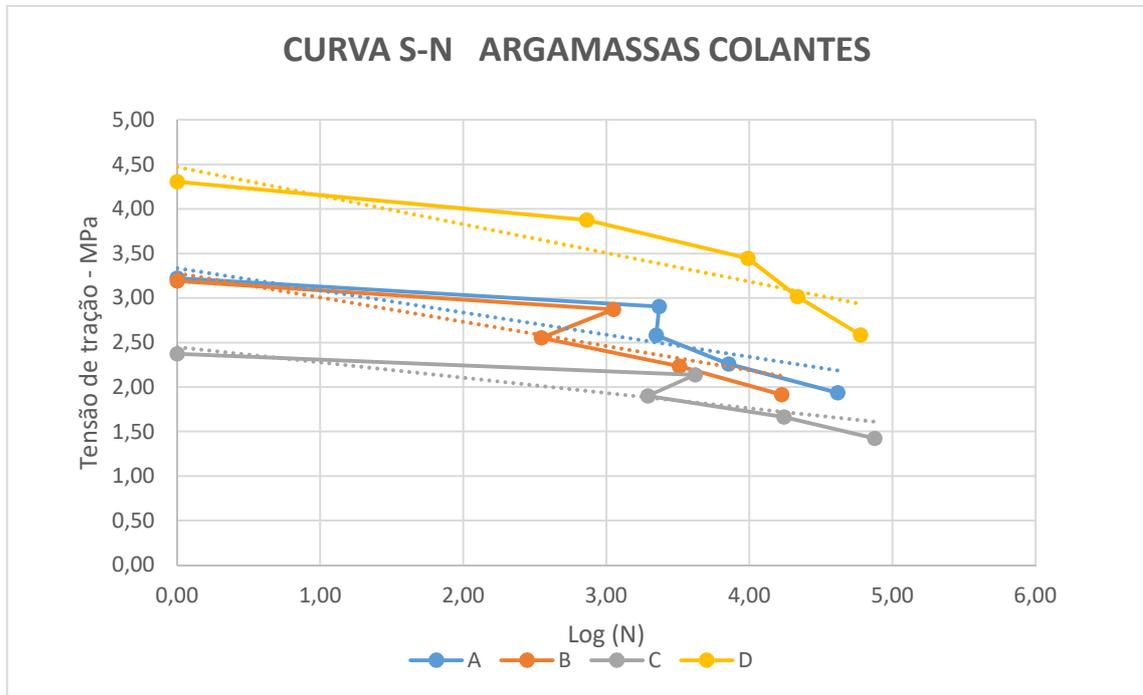
C			
	Mpa	Ciclos	Log (N)
100%	2,37	1	0,00
90%	2,14	4.173	3,62
80%	1,90	1.949	3,29
70%	1,66	17.475	4,24
60%	1,42	75.261	4,88

Fonte: O autor

Tabela 21 – Dados de Tensão e Log (N) para ACI

D			
	Mpa	Ciclos	Log (N)
100%	4,31	1	0,00
90%	3,88	729	2,86
80%	3,45	9.796	3,99
70%	3,01	21.751	4,34
60%	2,58	59.724	4,78

Fonte: O autor

Figura 74 - Curva S-N das Argamassas colantes. Tensão de tração versus logaritmo de N

Fonte: O autor

4.2.2 Discrepância dos resultados

Os comportamentos das amostras quanto à sua discrepância de resultados foram analisados através de cálculos dos Coeficientes de Variação (COV), onde os resultados em função dos percentuais dos carregamentos estáticos de ruptura, são apresentados nas tabelas 22 e através do gráfico da figura 76, após a análise de outliers.

Tabela 22 – Coeficientes de variação dos resultados das argamassas

A		B		C		D	
Relaç. T/Tmáx	COV						
100%	13%	100%	49%	100%	12%	100%	14%
90%	246%	90%	104%	90%	268%	90%	90%
80%	86%	80%	196%	80%	103%	80%	133%
70%	100%	70%	129%	70%	151%	70%	152%
60%	72%	60%	151%	60%	12%	60%	51%

(a) (b) (c) (d)

Fonte: O autor

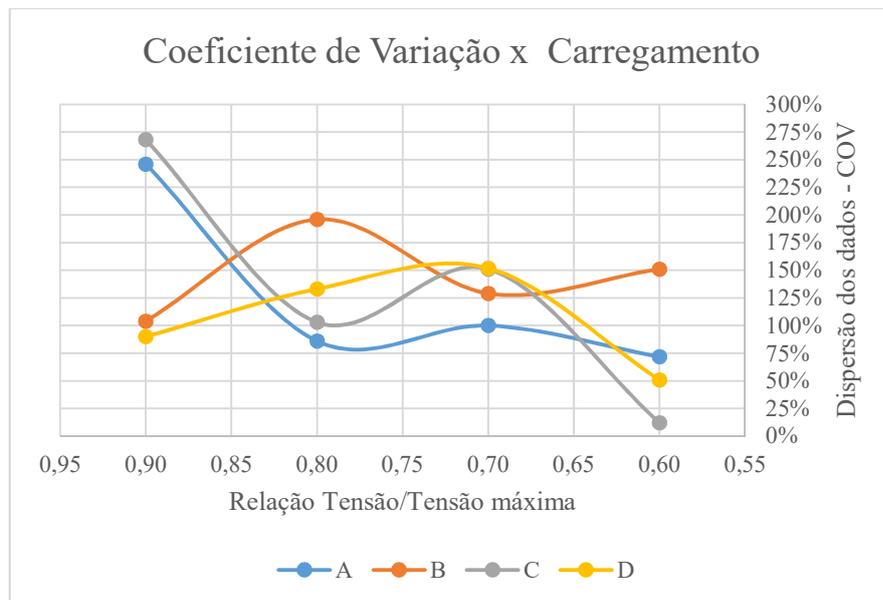
De acordo com a classificação apresentada na figura 75, os dados à fadiga se mostraram altamente discrepantes para todas as argamassas, apenas a argamassa C que, em 60% de sua carga máxima, apresentou um coeficiente de variação de 12%. Para os dados de ruptura estática, excluindo a argamassa B, todas as demais apresentaram baixa dispersão de dados.

Figura 75 – Análise de dispersão de dados – Notas de Aula

Faixa	cov	dispersão
menor ou igual a 15%	baixo	baixa dispersão dos dados
entre 15% e 30%	médio	média dispersão dos dados
maior do que 30%	alto	alta dispersão dos dados

Fonte: Romilde Almeida 2018.1

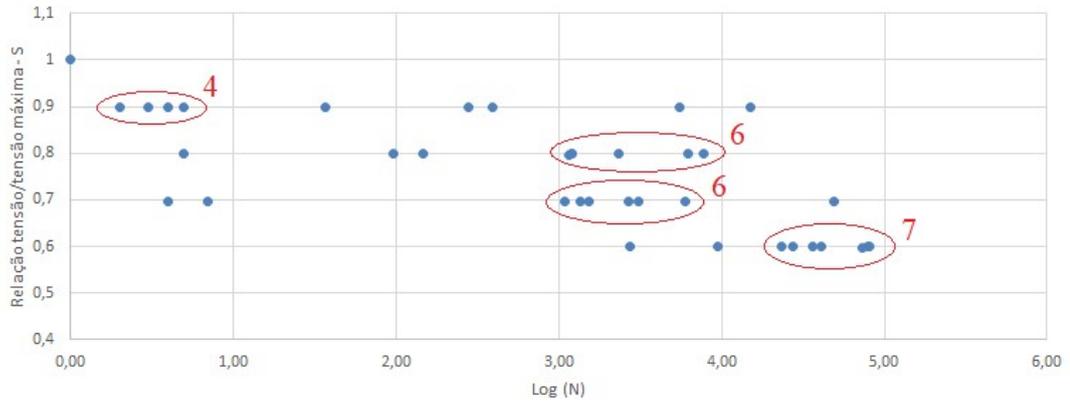
Figura 76 – Gráfico mostrando a relação entre o coeficiente de variação em função da relação de carregamento de carregamento



Fonte: O autor

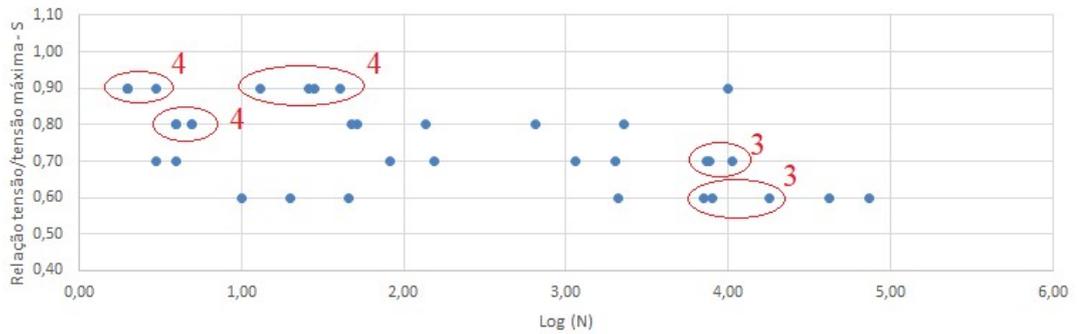
Para uma melhor visualização destas discrepâncias, os dados de todas as amostras foram lançados num único gráfico, separados por tipo de argamassas e para cada relação de tensão. Os círculos vermelhos separam as maiores aglomerações de resultados e assim podendo verificar onde estaria a maior tendência de resultado real para cada material e também identificar os pontos fora e sua dispersão.

Figura 77 – Análise da dispersão dos dados para a argamassa A



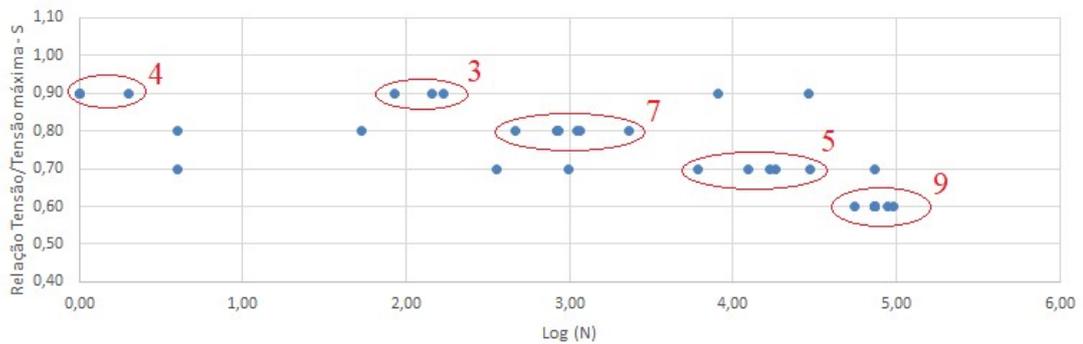
Fonte: O autor

Figura 78 – Análise da dispersão dos dados para a argamassa B



Fonte: O autor

Figura 79 – Análise da dispersão dos dados para a argamassa C



Fonte: O autor

ACII. Destaca-se que a argamassa D foi a única argamassa aprovada na cura em estufa dentre as argamassas ensaiadas neste trabalho;

4.3.1.4 Deslizamento

Todas as argamassas ensaiadas neste trabalho apresentaram deslizamentos elevados, porém não é citado um limite pela NBR 14081-5 (ABNT, 2012).

4.3.1.5 Módulos de Elasticidade das Argamassas

Os resultados médios dos módulos de elasticidade dinâmico (E_d) e estático (E_e) são apresentados na tabela 10 e mostram uma relativa aproximação, mas com valores mais elevados para os módulos dinâmicos para os casos das argamassas A, C e D, correspondendo ao comportamento teórico esperado. Porém, chama a atenção o resultado superior para o módulo estático da argamassa B em comparação a seu módulo medido através de ultrassom. (Na opinião deste autor, trata-se de uma possível falha na realização destes ensaios).

O organograma da figura 81, coloca de forma crescente as argamassas ensaiadas segundo seus resultados para módulos, números de ciclos na fadiga, resistência à compressão e tração. Percebe-se que a argamassa C apresentou menor módulo de elasticidade e maior número de ciclos à fadiga e obteve a menor resistência mecânica à compressão e tração. Comportamento semelhante ocorreu para a argamassa A. A argamassa D apresentou um comportamento diferente, possuindo o maior módulo de elasticidade (No caso do dinâmico), e obteve o segundo maior número de ciclos.

Figura 81– Organograma das argamassas ensaiadas

Módulo de elasticidade dinâmico - E_d

Menor Módulo

Maior módulo



Módulo de elasticidade estático - E_c

Menor Módulo

Maior módulo



Número de ciclos na Fadiga

Menor N

Maior N



Resistência à compressão

Menor Resistência

Maior resistência



Resistência à tração

Menor Resistência

Maior resistência



Fonte: O autor

4.3.2 Análise dos resultados dos Ensaio de Fadiga

Os resultados dos ensaios à fadiga para os corpos de prova de argamassas colantes estão apresentados nas tabelas 12 a 14 deste trabalho. Em resumo, pôde ser observado um comportamento de aumento de capacidade de resistência à fadiga com um maior número de ciclos em decorrência da redução da carga aplicada. Este comportamento é facilmente detectado através do gráfico apresentado na figura 73,

onde se observa uma linearidade e “estabilidade” dos pontos a partir de 70% da carga de ruptura estática.

Os elevados dados de coeficiente de variação, mesmo se tratando de corpos de prova moldados com a mesma mistura, da mesma embalagem, no mesmo dia e pelo mesmo técnico, e manuseados durante o ensaio por uma única pessoa, corroboram com o comportamento citado por Callister e Rethwish (2018), que cita tais discrepâncias mesmo para aços, relativamente mais homogêneos que compósitos como argamassas. Por esse motivo foram adotados um maior número de corpos de prova para este trabalho.

Um ponto que se destaca nessa análise de dados é que os materiais estudados aqui, sabendo que estarão sob regime de variação de carregamento ao longo de sua vida útil, não deverão estar dimensionados para trabalharem próximos de sua resistência estática, visto que o comportamento deste material nestas condições apresentou coeficiente de variação muito elevado. Isso significa que, numa mesma área de aplicação desse material, alguns pontos poderão se comportar de forma distinta e imprevisível. Infelizmente, os ensaios foram planejados para se encerrarem a 60% da carga estática de ruptura, devido ao elevado número de ciclos para tensões inferiores a esta, o que inviabilizaria este trabalho. A obtenção do comportamento dessa discrepância para tensões menores, como 50%, 40%, 30% e 20% seriam interessantes para obter um patamar de maior segurança deste material. O que se pode observar, é que o material apresenta maior regularidade de resultados e vida útil ao trabalhar o mais próximo possível de seu regime elástico.

A evidência da existência de uma relação entre tensão aplicada e número de ciclos de carregamento para o material estudado, é de suma importância para a engenharia de revestimentos, mostrando a capacidade desses materiais de suportarem ciclagens em sua vida útil desde que respeitando suas faixas de limite de carregamento. Esse comportamento já foi apresentado por outros pesquisadores, porém com um número bastante reduzido de corpos de prova. O presente estudo trata de diferentes tipos de argamassas colantes.

No gráfico da figura 73, estão os comportamentos à fadiga para tensões de 90, 80, 70 e 60% da carga estática para as Argamassas colantes denominadas previamente como A, B, C e D. Nele pode-se identificar também a semelhança de suas curvas, variando apenas seus níveis de tensão. Chama atenção a menor tensão de trabalho apresentado para a argamassa C comparada as demais argamassas. Em

contraponto, a argamassa C apresentou um maior número médio de ciclos. Este comportamento deve estar associado ao seu menor módulo de elasticidade dentre as outras argamassas. Tal fato será discutido mais a seguir.

Do ponto de vista da fadiga, respeitando suas cargas relativas de ruptura estática, observa-se maior resistência em número de ciclagens para as argamassas C, D, A e B respectivamente. A argamassa B foi a que apresentou maior instabilidade de resultados, sendo a de maior coeficiente de variação, e apresentando resistência à números de ciclos bem inferior às demais.

Apesar do gráfico de Tensão x número de ciclos mostrado na figura 73 apresentar uma estabilidade e uma tendência de patamar que poderia ser entendida como um limite de resistência de fadiga para essas argamassas estudadas, as curvas S-N com o a tensão e Log do número de ciclos não mostra esse patamar.

O gráfico na figura 74 apresenta um comportamento linear decrescente para ambas as argamassas estudadas. Além disso, a argamassa C foi a única que chegou a atingir a escala de 10^5 , ficando as demais nas faixas de 10^4 ciclos. Valor muito baixo para se poder considerar tal possibilidade de patamar, mostrando um comportamento frágil deste material coerente com outros resultados de pesquisas realizadas em concretos e com as bibliografias estudadas.

Observando a figura 12, que trata do modelo padrão de uma curva de Woller e em seguida as curva S-N das argamassas estudadas neste trabalho. Observa-se que o comportamento se assemelha mais à projeção de materiais que não apresentam limite de fadiga do que o contrário. Porém, para uma melhor afirmação, os ensaios deveriam ter prosseguido com cargas a 50, 40 e 30% da ruptura estática, para assim poder se ter uma conclusão mais segura. Esta continuidade fica como sugestão de trabalho futuro, já que, em estudos semelhantes realizados por outros autores este patamar também não foi alcançado, mas em nenhum deles se trabalhou com tensões abaixo de 40%.

A argamassa B, mesmo apresentando um resultado médio de 17 mil ciclos, teve amostras que atingiram valores acima dos 70 mil ciclos. A superior discrepância da argamassa B reduziu sua média e a colocou em situação aquém das demais argamassas. Deve ser considerado o possível favorecimento a estes resultados a adoção da frequência de 10 Hz, visto que as bibliografias apresentadas neste trabalho mostram o aumento da resistência à fadiga com a elevação da frequência de carregamento. Apesar da frequência de 10 Hz ser comumente usada em ensaios de

pavimentos, diante da frequência real de solicitação para as argamassas em sistemas de revestimento por exemplo, ficarem abaixo de 0,01 Hz, espera-se uma influência nos resultados de expectativa de vida desses materiais à fadiga.

5.0 CONCLUSÕES

5.1 Destaques:

Como conclusão a respeito da pesquisa realizada e apresentada neste trabalho, destacam-se os pontos a seguir:

- a) Após a apreciação dos resultados de caracterização das argamassas, as argamassas A, B e C podem ser classificadas pela NBR 14081-1:2012 como argamassas do tipo ACI e a argamassa D como ACII.
- b) As Argamassas colantes de uma forma geral apresentaram uma maior vida útil à fadiga com a redução da relação entre a tensão aplicada e sua tensão de ruptura estática;
- c) As Argamassas colantes ensaiadas não apresentaram patamar de limite de resistência à fadiga no gráfico S-N, comportando-se de forma decrescente até a tensão de 0,6 da carga de ruptura estática;
- d) As argamassas colantes apresentaram números de ciclos médios entre 10^4 e 10^5 , estando de acordo com os valores médios encontrados em pesquisas bibliográficas para ensaios à fadiga em materiais cimentícios como concretos e argamassas comuns;
- e) As argamassas com menores módulos de elasticidade apresentaram maior vida à fadiga e as com maiores módulos os piores resultados. A argamassa B apresentou a maior incerteza e menor número de ciclos médio e a Argamassa C apresentou o melhor resultado neste quesito;
- f) As argamassas colantes ensaiadas à fadiga apresentaram elevados coeficientes de variação;
- g) As argamassas ensaiadas apresentaram rupturas bruscas durante os ensaios de fadiga, sem desenvolvimento e propagação de fissuras visíveis, mostrando comportamento frágil diante deste tipo de solicitações;

O fato de não ter obtido por estes materiais, neste trabalho, um patamar de resistência à fadiga, não significa que estes não o possuam. É necessário estudá-los para cargas e frequências mais baixas. Porém, baseado em pesquisas publicadas sobre fadiga em concretos e argamassas, citadas neste trabalho, materiais cimentícios como argamassas e concretos não parecem possuir esse tipo de patamar, devendo ser atribuído um limite de projeto.

5.2 Dificuldades

A execução deste trabalho apresentou diversas barreiras e dificuldades, não só com a questão da disponibilidade de ferramentas e equipamentos adequados, como a questão de agendamento nos laboratórios. De forma a reduzir o tempo de ensaio, foram adotados os ensaios de tração indireta em corpos prismáticos (4x4x16) cm, devido a necessidade de se moldar 180 corpos de prova. Para que esses corpos de prova fossem moldados num intervalo de tempo reduzido e com a produção única para cada tipo de argamassa, ou seja, a argamassa A era moldada num mesmo momento usando uma única mistura e assim para as demais. Esse cuidado para não comprometer os estudos comparativos, o prazo de desforma de 48h, bem como a quantidade de corpos de prova a ser moldado, fez com que fosse necessária a aquisição de formas metálicas para esta execução, visto que o laboratório da Universidade dispunha apenas de 04 unidades.

A quebra eletrônica do equipamento para ensaio de fadiga e a posterior demanda de uso pela comunidade acadêmica também foi um fato gerador de dificuldades.

5.3 Sugestões de trabalhos futuros

Como sugestão para novas pesquisas sobre esse tema, este autor considera relevante o estudo da influência da frequência de aplicação de carga no ensaio de fadiga em argamassas, bem como nas variações de resultados, visto que em consulta ampla às bibliografias existentes, é recorrente encontrar dados de trabalhos realizados em aços e concretos, no caso deste último, influenciado pela engenharia rodoviária, mas nenhum especificamente sobre argamassas. Também se sugere avaliar a influência da frequência para baixos valores, visto que se tratam dos comumente usados em nossas construções e comparar este comportamento ao

estudo da fluência. De uma forma subjetiva, detectou-se que alguns autores brasileiros ao estudarem o efeito da fadiga nos materiais constituintes de fachadas, comparam o ciclo de um dia num sistema de revestimento exposto à variação de temperatura com um ciclo ensaiado com frequência bem superior. Os estudos apresentados na revisão bibliográfica deste trabalho mostram que isso seria um equívoco. Sendo assim, é relativamente importante o estudo da interferência da frequência nos ensaios de fadiga dos materiais constituintes dos sistemas de revestimento.

Destaca-se também, a investigação dos resultados à fadiga com outras marcas de argamassas disponíveis no mercado, além da investigação para relações de tensão abaixo do 0,6 realizados aqui.

Outro questionamento sobre o estudo de argamassas sob regime em fadiga é a relação entre ensaios com baixíssimas frequências e a fluência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **13276**, Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Preparo da mistura e determinação do índice de consistência, Rio de Janeiro, Brasil 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. 2 Ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **13749**, Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Especificação. Rio de Janeiro, Brasil 2013

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **7222**. Concreto e Argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, Brasil 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **14081-1**. Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas - Requisitos. Rio de Janeiro, Brasil 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14081-2**, Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas - Execução de substrato padrão e aplicação da argamassa para ensaios. Rio de Janeiro, Brasil 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **14081-3**. Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas - Determinação do tempo em aberto. Rio de Janeiro, Brasil 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **14081-4**. Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas - Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, Brasil 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **14081-5**. Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas - Determinação do deslizamento. Rio de Janeiro, Brasil 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **15630** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de

elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, Brasil 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **8522**. Concreto - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro, Brasil 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **13755**: Revestimentos cerâmicos de fachadas e paredes externas com utilização de argamassa colante — Projeto, execução, inspeção e aceitação — Procedimento. 2 Ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 57 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **6118**. Projeto de estrutura de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASHBY, M. F e JONES, D. R. H. Engineering Materials. – 4 ed. Tradução Ed. **ELSEVIER**, Rio de Janeiro, Brasil 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ARGAMASSAS INDUSTRIALIZADAS – ABAI. <https://abai.org.br/mercados/> - pesquisa em 25 de mai. 2020

ARAPIRAK, S. et al. Flexural fatigue failure characteristic of an engineered cementitious composite and polymer cement mortars. **J. Materials, Conc. Pavements. JSCE**, N° 718/V-57, 121-134. Tokyo, Japan 2002.

ABRAHÃO, R. R. R. **Fadiga de materiais** – Uma revisão bibliográfica. XII Seminário de Iniciação Científica – Universidade Federal de Uberlândia – Brasil 2008.

BALASUBRAMANIAN, J. et al. Strength and microstructure of mortar with sand substitutes. **Gradevinar** 68. 29-37. India 2016.

BEZERRA, A. C. S. **Relações de módulo de elasticidade dinâmico, estático e resistência à compressão do concreto**. Anais do 51^o Congresso Brasileiro do Concreto. Brasil 2009.

BUSSAB, W. O e MORETTIN, P. A. **Estatística básica**. Editora Saraiva, 9^a ed. São Paulo, 2017.

CERVO, T. C. **Estudo da resistência à fadiga de concreto de cimento Portland para pavimentação**. Tese de Doutorado. EP-USP, Brasil 2004.

CIMM – CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA – ABAI.

https://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/7103-tensao-deformacao-e-o-comportamento-dos-materiais - pesquisa em 21/06/2020.

FIORITO, A. J. S. I, **Manual de Argamassas e Revestimento** – Estudo e procedimento de execução. Editora Pini, São Paulo, Brasil 1994.

FUJCZAK, R. R. The effects of fatigue loading frequency on fatigue life of high-strength pressure vessel steels. US Army Armament research. **Technical Report**. Nova York, EUA 1994.

GUENNEC, B. et al. Effect of loading Frequency in fatigue properties and micro-plasticity behavior of **JIS S15C low carbon steel**. 13th International Conference on Fracture, 16-21. Beijing, China 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET.

<http://www.inmet.gov.br/portal/> – Pesquisa realizada em 20 de jun.2020

MATSUMOTO, T. et al. Thermal stress analysis and fatigue strength measurement of the interface between concrete and polymer cement mortar. Tokyo Japan 2007.

MEDEIROS, A. **Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras**. Tese de Doutorado. PUC-Rio de Janeiro, Brasil 2012.

MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M, **Concreto. Microestrutura, Propriedades e Materiais** – 2 ed. IBRACON, São Paulo, Brasil 2014.

MAIA, R. P e NASCIMENTO, M. A. L. Relevos graníticos do Nordeste Brasileiro – **Revista Brasileira de Geomorfologia** – v.19, nº2 – São Paulo, SP 2018.

NEVILLE, A. M. **Tecnologia do concreto** - tradução: Ruy Alberto Cremonimi – 2 ed. Bookman, Porto Alegre, Brasil 2013.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto** – tradução: Ruy Alberto Cremonimi- 5 ed. Bookman, Porto Alegre, Brasil 2016.

PINOTTI, A. M. e CARNEIRO, C. R. **Geologia estrutural na previsão e contenção de queda de blocos em encostas**: aplicação no Granito Santos, SP – Terra e Didática, Campinas – SP 2013.

REGO, S. R. **Aderência de placas cerâmicas submetidas a variações térmicas cíclicas**. Dissertação de Mestrado. UFPB, João Pessoa, Brasil 2008.

REGO, S. R. **Mecanismos de adesão em sistemas cerâmicos aderidos sujeitos à variações térmicas cíclicas**. Tese de Doutorado. UFPB, João Pessoa, Brasil 2012.

RECENA, F. A. P. **Conhecendo argamassa**. Tese de Doutorado. 2 ed. EDIPUCRS , Porto Alegre, Brasil 2012.

SARMENTO, C. V. S. **Monitoração de edifícios altos para ações dinâmicas do vento**. Trabalho de conclusão de curso de engenharia civil. UNICAP, Recife, Brasil 2012.

SHIMADZU (Brasil). **Shimadzu Servopulser**. 2014. Disponível em: <https://www.shimadzu.com/an/> Acesso em: 10 jun. 2020.

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 Estrutura e Construção Civil, Universidade de Brasília, 2007.