



PRÓ-REITORIA DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA ÁREA DE CONTATO NA
ADERÊNCIA DA INTERFACE ARGAMASSA COLANTE-CERÂMICA**

ANNE CAROLINE MELO DA SILVA

Recife
2018



ANNE CAROLINE MELO DA SILVA

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA ÁREA DE CONTATO NA
ADERÊNCIA DA INTERFACE ARGAMASSA COLANTE-CERÂMICA**

Dissertação apresentada à Universidade Católica de Pernambuco como requisito parcial, exigido pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, na Área de Concentração em Engenharia das Construções, orientada pelos professores Angelo Just da Costa e Silva e Sandro Marden Torres.

Recife

2018

S586c

Silva, Anne Caroline Melo da

Contribuição ao estudo da influência da área de contato na aderência da interface argamassa colante-cerâmica / Anne Caroline Melo da Silva, 2018
121 f. : il.

Orientadores: Angelo Just da Costa e Silva, Sandro Marden Torres

Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de Pernambuco. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Mestrado em Engenharia Civil, 2018.

1. Revestimento cerâmico. 2. Fachadas. 3. Aderência (Construção civil). I. Título.

CDU 624.012

Ficha catalográfica elaborada por Catarina Maria Drahomiro Duarte - CRB
4/463

ANNE CAROLINE MELO DA SILVA

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA ÁREA DE CONTATO NA
ADERÊNCIA DA INTERFACE ARGAMASSA COLANTE-CERÂMICA**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, na Área de Concentração em Engenharia das Construções.

Avaliado por:

Prof. Dr. Angelo Just da Costa e Silva
(Orientador – UNICAP)

Prof. Ph.D Sandro Marden Torres
(Co-Orientador – UFPB)

Prof(a). Dra. Eliana Cristina Barreto
Monteiro – UNICAP – Avaliadora Interna

Prof(a). Dra. Helena Carasek Cascudo –
UFG – Avaliadora Externa

Prof. Dr. João Manoel de Freitas Mota –
IFPE – Avaliador Externo

Data: 09 / 07 / 2018

Recife

2018

AGRADECIMENTOS

A Deus Pai, Jesus Cristo e ao Divino Espírito Santo por Sua infinita misericórdia e amor.

Aos meus pais, irmã e demais familiares por todas as orações oferecidas a Deus pedindo em meu favor.

A Rui Alcântara Júnior, pelo apoio em todos os momentos.

Ao meu orientador Angelo Just, por absolutamente tudo que ele fez por mim, minha eterna gratidão.

Ao professor Sandro Marden que com incrível paciência me apresentou uma nova maneira de enxergar o universo da ciência dos materiais.

A todos os funcionários e laboratoristas da Universidade Federal da Paraíba que tornaram real a chance de realizar esta pesquisa, em especial, o professor José Félix, que foi uma luz no meu caminho.

A todos os professores e funcionários da Universidade Católica de Pernambuco, pela atenção e carinho dedicados a mim.

Aos professores do Instituto Federal de Pernambuco, Ronaldo Pontes e João Manoel pelos conselhos dados que me ajudaram a chegar até aqui.

Ao Felipe Câmara pela contribuição e apoio.

Ao SENAI PE, através da Karla Guimarães e seus técnicos, que aceitaram participar deste trabalho por meio da realização de alguns ensaios laboratoriais imprescindíveis para este estudo.

Ao PROSUP/CAPES, pelo apoio financeiro.

A todos os meus companheiros do Mestrado.

Aos pesquisadores, que contribuíram, e aos que continuam contribuindo para o desenvolvimento da pesquisa, com publicações de grandes trabalhos.

RESUMO

O descolamento de placas de revestimento em edificações é um problema que ainda persiste em várias construções modernas, apesar dos diversos avanços alcançados no setor de tecnologia de fachadas e de um público consumidor cada vez mais exigente. Tais descolamentos podem ocorrer por ruptura adesiva nas interfaces do sistema ou, ainda, por ruptura coesiva no interior de qualquer uma de suas camadas. Estudos mostraram que a maioria dos descolamentos cerâmicos em fachadas acontecem na interface argamassa colante e placa cerâmica e isso se dá em razão que é a região do sistema de revestimento mais solicitada por esforços de cisalhamento. No Brasil, a metodologia mais utilizada para avaliação da aderência de revestimentos cerâmicos é o ensaio de resistência de aderência à tração direta, contudo, tal avaliação pode ser insuficiente para constatação da qualidade da adesão dos revestimentos ao substrato, visto que a aderência do sistema é resultante não somente da resistência de aderência à tração, mas também da resistência de aderência ao cisalhamento e da extensão de aderência da argamassa. Esta dissertação objetiva contribuir para o estudo e compreensão da influência da área de contato na aderência da interface entre argamassa colante e placa cerâmica por meio da avaliação da resistência de aderência a partir do ensaio de propagação de fissura no modo misto de tensões (*MMF – Mixed Mode Flexure*) que simula esforços de tração e cisalhamento simultaneamente. Os sistemas produzidos em laboratório reproduzem condições onde a falha na extensão da argamassa contribui para a diminuição da resistência de aderência. Através de uma máquina de ensaios mecânicos universais, aplicou-se uma carga progressiva pontual nos 120 corpos de prova produzidos, de modo a promover esforços internos de tração e cisalhamento. As variáveis incorporadas ao experimento foram o tipo de argamassa utilizada, a espessura da argamassa no corpo de prova e o tamanho da falha de colagem induzida no conjunto. Os resultados experimentais mostram que a resistência de aderência na interface entre a argamassa colante e placa cerâmica decresce à medida que a falha na colagem aumenta, apresentando perda de aderência de até 44,2% e 51,4% (AC II e AC III, respectivamente). Os valores de resistência de aderência encontrados por meio do ensaio de tração direta são 60,8% (AC II) e 58,1% (AC III) maiores que os resultados obtidos pelo ensaio mecânico em modo misto, indicando um resultado superdimensionado do sistema de revestimento da fachada quando verificada a resistência de aderência à tração direta isoladamente.

PALAVRAS-CHAVE: Revestimento cerâmico, fachada, MMF, aderência.

ABSTRACT

The detachment of ceramic tiles in buildings is a problem that still persists in several modern buildings, despite the various advances achieved in the sector of façade technology and an increasingly demanding consumer public. Such detachments may occur by adhesive rupture at the interfaces of the system or by cohesive rupture within any of its layers. Studies have shown that most ceramic façades in facades occur in the interface mortar and ceramic plaque and this is because it is the region of the most requested coating system by shear stresses. In Brazil, the most used methodology to evaluate the adhesion of ceramic coatings is the adhesion strength test to direct traction, however, such evaluation may be insufficient to verify the adhesion quality of the coatings to the substrate, since the adherence of the system is resulting not only from the tensile strength, but also from the shear bond strength and the extent of adhesion of the mortar. This dissertation aims to contribute to the study and understanding of the influence of the contact area on the adhesion of the interface between adhesive mortar and ceramic plate by means of the evaluation of the adhesion resistance from the crack propagation test in mixed mode of stress (MMF - Mixed Mode Flexure) simulates tensile and shear forces simultaneously. The systems produced in the laboratory reproduce conditions where the failure in the extension of the mortar contributes to the decrease of the resistance of adhesion. Through a universal mechanical testing machine, a punctual progressive load was applied to the 120 specimens produced in order to promote internal tensile and shear forces. The variables incorporated into the experiment were the type of mortar used, the thickness of the mortar in the specimen and the size of the glue failure induced in the set. The experimental results show that the adhesion strength at the interface between the adhesive mortar and the ceramic plate decreases as the adhesion failure increases, with a loss of adhesion of up to 44.2% and 51.4% (AC II and AC III, respectively). The adhesion strength values found by the direct drive test were 60.8% (AC II) and 58.1% (AC III) higher than the results obtained by the mechanical test in mixed mode, indicating an oversized system result of the facade cladding when the direct tensile adhesion strength was verified alone.

KEY WORDS: Ceramic tiles, facade, MMF, bond.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Consumo Mundial de Revestimento Cerâmico.	25
Figura 2 - Estrutura do sistema de revestimento.	27
Figura 3 - Imagem esquemática dos mecanismos de ancoragem.	34
Figura 4 - Falha de colagem em placas cerâmicas aderidas com argamassa colante.	35
Figura 5 - Verificação em canteiro de obra da colagem efetiva da placa cerâmica...35	
Figura 6 - Tipos de ruptura no ensaio de RATD.	38
Figura 7 - Evolução da rugosidade superficial ao longo das etapas da fabricação de revestimentos cerâmicos por via seca.	40
Figura 8 - Fratura frágil ocorrida em um navio de carga Liberty que separou o navio em duas partes em 1941.	46
Figura 9 - Micro cavidades na seção de ruptura.	48
Figura 10 - Facetas de clivagem, indicando o sentido de propagação da trinca.	49
Figura 11 - Mecanismo de separação intergranular.	49
Figura 12 - Diferentes modos de carregamento de uma trinca.	52
Figura 13 - Esquema simplificado dos esforços de fachadas.	54
Figura 14 - Placa cerâmica indicando falha no espalhamento da argamassa colante sobre o tardo.	55
Figura 15 - Extensão de aderência nos corpos de prova.	58
Figura 16 - Revestimento cerâmico 60 x 60 cm utilizado.	59
Figura 17 - Ensaio de absorção do revestimento cerâmico. (A) Pesagem inicial; (B) Pesagem final.	60
Figura 18 - Fragmento cerâmico para ensaio perfilométrico.	61
Figura 19 - Perfilômetro óptico.	62
Figura 20 - Colocação da massa padrão de material não deformável sobre os azulejos.	64
Figura 21 - Ensaio de arrancamento.	65
Figura 22 - Desenho esquemático ensaio MMF.	67
Figura 23 - Ensaio MMF.	68

Figura 24 - (A) Cortador profissional; (B) Cerâmicas cortadas na dimensão desejada.	69
Figura 25 - Exemplo de espaçador emborrachado.	70
Figura 26 - Espaçadores confeccionados.	70
Figura 27 - Produção da pasta de argamassa.	71
Figura 28 - Esquema dos corpos de prova produzidos.	71
Figura 29 - Corpos de prova do ensaio MMF.	72
Figura 30 - Perfil revestimento cerâmico (A) Condição 1; (B) Condição 2; (C) Condição 3.	75
Figura 31 - Família AC III 7-20 após ensaio MMF.	81
Figura 32 - Tenacidade calculada através da área sob a curva. Espessura = 2mm.	93
Figura 33 - Tenacidade calculada através da área sob a curva. Espessura = 4mm.	95
Figura 34 - Tenacidade calculada através da área sob a curva. Espessura = 7mm.	97

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Nomenclatura de identificação dos corpos de prova.....	72
Quadro 2 - Requisitos para argamassas colantes - critérios fundamentais.	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Média do parâmetro Ra indicador de rugosidade superficial para diferentes tipologias de revestimentos cerâmicos.	39
Tabela 2 - Variáveis consideradas no experimento.....	57
Tabela 3 - Características do revestimento cerâmico.	59
Tabela 4 - Indicações de uso de duas argamassas colantes.	63
Tabela 5 - Resultados ensaio de absorção.	73
Tabela 6 - Grupos de absorção de água.	74
Tabela 7 - Classificação das cerâmicas pelo método de fabricação.	74
Tabela 8 - Resultados do ensaio perfilométrico da placa cerâmica.	74
Tabela 9 - Resultados AC II - Tempo em aberto.	77
Tabela 10 - Resultados ACIII - Tempo em aberto.	78
Tabela 11 - Resultados AC II - Resistência de aderência à tração direta.	79
Tabela 12 - Resultados AC III - Resistência de aderência à tração direta.	79
Tabela 13 - AC II Aumento ou diminuição da resistência em função da extensão de aderência.....	89
Tabela 14 - AC III Aumento ou diminuição da resistência em função da extensão de aderência.....	89
Tabela 15 - Tenacidade E=2mm	93
Tabela 16 - Tenacidade E=4mm.	95
Tabela 17 - Tenacidade E= 7mm.	97

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Percentual total do emprego de revestimento em fachadas de edifícios residenciais na cidade do Recife.....	26
Gráfico 2 - Estágios da curva de propagação da fissura.....	81
Gráfico 3 - Curvas de propagação da fissura (AC II – 2 mm).....	83
Gráfico 4 - Força máxima atingida (AC II – 2 mm).....	83
Gráfico 5 - Curvas de propagação da fissura (AC II – 4 mm).....	84
Gráfico 6 - Força máxima atingida (AC II – 4 mm).....	84
Gráfico 7 - Curvas de propagação da fissura (AC II – 7 mm).....	85
Gráfico 8 - Força máxima atingida (AC II – 7 mm).....	85
Gráfico 9 - Curvas de propagação da fissura (AC III – 2 mm).....	86
Gráfico 10 - Força máxima atingida (AC III – 2 mm).....	86
Gráfico 11 - Curvas de propagação da fissura (AC III – 4 mm).....	87
Gráfico 12 - Força máxima atingida (AC III – 4 mm).....	87
Gráfico 13 - Curvas de propagação da fissura (AC III – 7 mm).....	88
Gráfico 14 - Força máxima atingida (AC III – 7 mm).....	88
Gráfico 15 - Projeção linear de perda de resistência em função da perda de área de contato na argamassa AC II.....	90
Gráfico 16 - Projeção linear de perda de resistência em função da perda de área de contato na argamassa AC III.....	90
Gráfico 17 - Curvas de propagação da fissura (AC III – 2 mm x AC II – 2 mm).....	92
Gráfico 18 - Força máxima atingida (AC III – 2 mm x AC II – 2 mm).....	92
Gráfico 19 - Curvas de propagação da fissura (AC III – 4 mm x AC II – 4 mm).....	94
Gráfico 20 - Força máxima atingida (AC III – 4 mm x AC II – 4 mm).....	94
Gráfico 21 - Curvas de propagação da fissura (AC III – 7 mm x AC II – 7 mm).....	96
Gráfico 22 - Força máxima atingida (AC III – 7 mm x AC II – 7 mm).....	96
Gráfico 23 - Ensaio MMF x Ensaio Tração Direta.....	98
Gráfico 24 – AC II Falha 0 mm - Espessuras de argamassa.....	101
Gráfico 25 - Força máxima atingida (AC II – Falha 0 mm).....	101
Gráfico 26 - AC II Falha 5 mm x Espessuras de argamassa.....	102
Gráfico 27 - Força máxima atingida (AC II – Falha 5 mm).....	102

Gráfico 28 - AC II Falha 10 mm x Espessuras de argamassa.....	103
Gráfico 29 - Força máxima atingida (AC II – Falha 10 mm).	103
Gráfico 30 - AC II Falha 20 mm x Espessuras de argamassa.....	104
Gráfico 31 - Força máxima atingida (AC II – Falha 20 mm).	104
Gráfico 32 - AC III Falha 0 mm x Espessuras de argamassa.....	105
Gráfico 33 - Força máxima atingida (AC III – Falha 0 mm).	105
Gráfico 34 - AC III Falha 5 mm x Espessuras de argamassa.....	106
Gráfico 35 - Força máxima atingida (AC III – Falha 5 mm).	106
Gráfico 36 - AC III Falha 10 mm x Espessuras de argamassa.....	107
Gráfico 37 - Força máxima atingida (AC III – Falha 10 mm).	107
Gráfico 38 - AC III Falha 20 mm x Espessuras de argamassa.....	108
Gráfico 39 - Força máxima atingida (AC III – Falha 20 mm).	108
Gráfico 40 - Força x Tenacidade das 24 Famílias estudadas.	111

SUMÁRIO

CAPÍTULO 01 - INTRODUÇÃO

1.1 IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA DO TEMA.....	17
1.2 OBJETIVOS.....	21
1.2.1 OBJETIVO GERAL.....	21
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
1.3 METODOLOGIA E LIMITAÇÕES DO ESTUDO.....	22
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	23

CAPÍTULO 02 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ADERÊNCIA DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS	24
2.1.1 REVESTIMENTOS – CONCEITOS BÁSICOS	24
2.1.2 FUNÇÕES PROPRIEDADES E COMPORTAMENTOS DO SISTEMA DE REVESTIMENTO	27
2.1.2.1 BASE	28
2.1.2.2 CHAPISCO	29
2.1.2.3 EMBOÇO	29
2.1.2.4 ARGAMASSA COLANTE	31
2.1.2.5 PLACA CERÂMICA.....	32
2.1.3 ADESÃO E ADERÊNCIA DE REVESTIMENTOS	32
2.1.4 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO	36
2.1.5 PERFILOMETRIA APLICADA À AVALIAÇÃO DO TARDOZ	38
2.1.6 INFLUÊNCIA DOS COMPONENTES DAS ARGAMASSAS COLANTES NA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA	40
2.1.7 INFLUÊNCIA DE AGENTES EXTERNOS NA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA	41
2.1.8 CHOQUE TÉRMICO NOS REVESTIMENTOS DE ARGAMASSA	43

2.1.9 GRADIENTE TÉRMICO NO BRASIL.....	44
2.2 MECÂNICA DA FRATURA	45
2.2.1 ASPECTO HISTÓRICO	45
2.2.2 ASPECTOS GERAIS.....	46
2.2.3 MECÂNICA DA FRATURA LINEAR ELÁSTICA (MFLE).....	50
2.2.4 MECÂNICA DA FRATURA E REVESTIMENTOS CERÂMICOS	53

CAPÍTULO 03 – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 ASPECTOS GERAIS.....	56
3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	59
3.2.1 PLACA CERÂMICA	59
3.2.1.1 DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA	60
3.2.1.1 PERFILOMETRIA.....	61
3.2.2 ARGAMASSA COLANTE INDUSTRIALIZADA	62
3.2.2.1 DETERMINAÇÃO DO TEMPO EM ABERTO	63
3.2.2.2 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA.....	66
3.3 ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE FISSURA	66
3.3.1 PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DO ENSAIO MMF	68

CAPÍTULO 04 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	73
4.1.1 PLACA CERÂMICA	73
4.1.1.1 ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	73
4.1.1.2 PERFILOMETRIA	74
4.1.2 ARGAMASSA COLANTE	76
4.1.2.1 TEMPO EM ABERTO.....	76
4.1.2.2 RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO.....	78

4.2 ENSAIO MECÂNICO DE PROPAGAÇÃO DAS FISSURAS EM MODO MISTO (MMF).	80
4.2.1 INFLUÊNCIA DA EXTENSÃO DE FALHA	82
4.2.1.1 AC II – ESPESSURA 2 mm.....	83
4.2.1.2 AC II – ESPESSURA 4 mm.....	84
4.2.1.3 AC II – ESPESSURA 7 mm.....	85
4.2.1.4 AC III – ESPESSURA 2 mm.....	86
4.2.1.5 AC III – ESPESSURA 4 mm.....	87
4.2.1.6 AC III – ESPESSURA 7 mm.....	88
4.2.2 INFLUÊNCIA DA ARGAMASSA COLANTE.....	91
4.2.2.1 AC III 2 mm X AC II 2 mm	92
4.2.2.2 AC III 4 mm X AC II 4 mm	94
4.2.2.3 AC III 7 mm X AC II 7 mm	96
4.2.3 INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DA ARGAMASSA COLANTE	99
4.2.3.1 AC II – FALHA 0 mm.....	101
4.2.3.2 AC II – FALHA 5 mm.....	102
4.2.3.3 AC II – FALHA 10 mm	103
4.2.3.4 AC II – FALHA 20 mm.....	104
4.2.3.5 AC III – FALHA 0 mm	105
4.2.3.6 AC III – FALHA 5 mm	106
4.2.3.7 AC III – FALHA 10 mm.....	107
4.2.3.8 AC III – FALHA 20 mm.....	108
4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	109

CAPÍTULO 05 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES.....	112
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	113

REFERÊNCIAS

CAPÍTULO 01

INTRODUÇÃO

1.1 IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA DO TEMA

A tecnologia de revestimentos de fachadas com material cerâmico no Brasil remonta ao século XVII, segundo Silva (2003), quando os azulejos cerâmicos eram trazidos de Portugal, França e Alemanha. Atualmente, largamente difundida, essa tecnologia, que se aprimorou ao longo do tempo, aparece em todo país e em diversos lugares do mundo. O sistema de revestimento cerâmico desponta no cenário nacional, principalmente nas regiões costeiras do país, como uma das principais alternativas para a proteção das fachadas, apresentando características positivas tais como a estanqueidade, durabilidade, valorização do empreendimento, conforto térmico e acústico, dentre outros. Para Costa e Silva (2001), os revestimentos das superfícies externas, em especial as fachadas, são verdadeiros formadores da imagem do imóvel, indicativo do que se deve encontrar no seu interior.

As produções industriais em larga escala de peças cerâmicas e o desenvolvimento de adesivos à base de cimento Portland são os dois aspectos principais que contribuíram para o desenvolvimento tecnológico desses revestimentos para uso em fachada. No entanto, apesar de existirem diversas técnicas específicas para a prevenção de quedas de materiais em fachadas, o descolamento de placas cerâmicas em edificações é um problema que ainda persiste em diversas construções modernas, principalmente quando não sujeitas a manutenções periódicas específicas. De acordo com Gaspar e Brito (2005) citado por Antunes (2010) a degradação é a perda da capacidade do material responder às exigências ao longo do tempo, frente aos agentes de deterioração, à natureza do material e, em alguns casos, à própria maturação deste (a exemplo dos rebocos ou dos concretos).

O deslocamento de cerâmicas, pode gerar acidentes em indivíduos que estejam no entorno da edificação, sem contar o dano causado quando as placas atingem bens de consumo, causando prejuízo financeiro e grande insatisfação do

usuário. Moradores de um edifício na cidade de Pirituba – SP contaram em reportagem ao SPTV em 2010 que a queda das pastilhas de revestimento da fachada do edifício os deixa assustados; muitos esperam que a qualquer momento uma das pastilhas atinja algum usuário. “Ela caiu do lado dele (referindo-se ao seu filho). Quando desço com meus filhos falo para eles se protegerem o máximo possível. Olhar para ver se não está caindo” afirma o aposentado Paulo Jones, morador do edifício (G1 SÃO PAULO, 2010). Em Recife, parte do revestimento da fachada do prédio onde funciona o Porto Digital da cidade, caiu, havendo a necessidade de interdição da via entre a avenida Rio Branco e a rua Álvares Cabral, alterando o trânsito da região. Os engenheiros da Defesa Civil do Recife responsáveis pela verificação do fato, recomendaram ao Porto Digital a colocação de uma tela de proteção e a instalação de bandejas de contenção na lateral do edifício (JC ONLINE, 2018).

Para Toledo (2007), o edifício, como conjunto da cidade, não pertence somente aos seus proprietários, mas à sociedade, visto que o elemento de interface entre o ambiente interno e externo – chamado de fachada, embora esteja incorporado ao edifício, está exposto ao meio ambiente construído.

Diversos pesquisadores estudaram os possíveis fatores que têm influência no deslocamento cerâmico de fachadas.

Fiorito (1994) pontua que a falta de aderência entre as camadas, a expansão da cerâmica pela umidade local, a retração excessiva das argamassas utilizadas, e principalmente, as tensões cíclicas oriundas do efeito térmico no revestimento cerâmico, são fatores que por fadiga, podem levar o sistema ao colapso.

É importante dizer também que a qualidade e durabilidade do sistema de revestimentos está, dentre outros fatores, ligada ao planejamento do serviço, aos materiais escolhidos, à mão de obra executora e as manutenções realizadas ao longo do tempo. De acordo com Campante e Baia (2003), as manifestações patológicas surgem em dada região do edifício, em algum momento de sua vida útil, deixando assim de apresentar o desempenho para o qual tinha sido previsto. Os autores ainda comentam que as patologias no revestimento cerâmico podem ter origem na fase de projeto, quando são escolhidos materiais incompatíveis com as condições de uso, ou quando são desconsideradas as interações do revestimento com outras partes do edifício.

Carasek *et al.* (2014) aborda que a aderência está relacionada com a qualidade na execução do revestimento e sua idade, com as características e propriedades da argamassa e do substrato, assim como com aspectos das condições climáticas durante a aplicação da argamassa e também ao longo da vida útil do revestimento.

Silfwerbrand, Beushausen e Courard (2011) *apud* Campos (2014) afirmam que todo mecanismo de aderência depende da real superfície de contato, em detrimento da superfície geométrica, culminando numa superfície efetiva de contato.

Selmo (1996) comenta que, em uma pesquisa realizada pelo “Technical Committee on Mortars and Renderings, 13-MR” da Rilem, em 1982, verificou-se que as principais causas que influenciam e afetam o comportamento dos revestimentos externos são: movimentações higroscópicas no revestimento; movimentações térmicas do revestimento; movimentações higroscópicas da base; movimentações térmicas da base; incidência de chuvas e ventos na superfície.

Bowman e Westgate (1992) ressaltam que o surgimento de manifestações patológicas não está relacionado a uma causa isolada, mas a um conjunto de fatores que resultam no aparecimento dos problemas.

Uchôa (2015) também afirma que ainda é pouco estudado no Brasil a durabilidade dos revestimentos cerâmicos externos perante a ação mecânica originada pelo agente térmico. Quando a temperatura varia, as diferentes camadas do revestimento também sofrem uma variação tridimensional, o que pode causar, dependendo da sua magnitude, o aparecimento de fissuras e trincas nas fachadas, e progressivamente a perda da aderência do sistema.

Selmo (1989) e Saraiva (2001) comentam que, independentemente da natureza do material, os agentes atuantes sobre a superfície externa dos edifícios são: forças e cargas de impacto, fogo, animais, plantas e microorganismos, temperatura ambiente, radiação, luz e vibrações. Essas mesmas pesquisadoras ainda ressaltam que a agressividade do clima é um dos principais agentes de degradação dos revestimentos, sendo que, quando combinados, os agentes climáticos produzem efeito muito maior do que quando considerados atuando isoladamente.

Na verdade, os movimentos dos edifícios, que têm diversas origens, modificam-se constantemente, e não necessariamente de forma simultânea. Com relação aos materiais empregados nas construções, observa-se que estes podem

sofrer variações de acordo com as condições de aplicação, que também não são constantes. Como consequência, a magnitude real dos esforços resultantes dos movimentos se torna muito complexa para ser determinada com exatidão segundo Rêgo (2008).

Para Hovde (2004) e Silva *et al.* (2013) *apud* Bauer *et al.* (2015) a vida útil das fachadas é influenciada pelo comportamento das propriedades dos elementos (sistemas) e dos seus componentes (subsistemas) e da interação entre estes ao longo do tempo. Sendo assim, fachadas que apresentam manifestação patológica principalmente em idades precoces devem ser avaliadas no sentido de verificar quais foram os fenômenos de degradação que conduziram à perda de sua funcionalidade e, por conseguinte, provocaram um envelhecimento prematuro em função da vida útil prevista (SILVESTRE, BRITO; 2011 *apud* BAUER *et al.* ;2015)

Diversos autores verificaram que, nos edifícios de múltiplos pavimentos, são impostas às vedações verticais deformações, muitas vezes, incompatíveis com sua capacidade de resisti-las, resultando em manifestações patológicas como a fissuração excessiva do revestimento ou mesmo seu destacamento. (SABBATINI, 1998; FRANCO, 1998; ABREU, 2001). Para tanto, alternativas que possam ser usadas para mensurar a aderência dos revestimentos às fachadas tornam-se cada vez mais indispensáveis para o avanço da tecnologia de revestimentos aderidos.

No Brasil, a metodologia mais utilizada para avaliação da aderência de revestimentos cerâmicos é o ensaio de resistência de aderência à tração direta cujo procedimento consta na NBR 13528 (ABNT, 2010). Tal avaliação, contudo, pode ser insuficiente para constatação da qualidade da adesão dos revestimentos ao substrato, visto que, Maciel, Barros e Sabbatini (1998) consideram que a resistência de aderência ao cisalhamento e a extensão de aderência da argamassa são fatores que juntamente com a resistência de aderência à tração resultam na aderência do sistema.

Uma revisão da literatura revela que poucos trabalhos sistemáticos abordam a aderência de elementos cerâmicos em fachadas, sob o ponto de vista do ensaio de propagação de fissuras no regime de modo misto (MMF¹), que por sua vez é uma combinação dos modos de tração (DCB²) e de cisalhamento (ENF³), sendo um dos

¹ Mixed Mode Flexure

² Double-Cantilever Beam

³ End-Notched Flexure

mais comuns para placas coladas. Neste sentido, esta pesquisa se propõe a dar sua contribuição para o entendimento do comportamento mecânico de fachadas, através de estudos experimentais de placas cerâmicas aderidas com argamassas colantes comerciais pelo ensaio MMF considerando diferentes extensões de aderência da argamassa.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

O presente estudo tem como objetivo avaliar fatores de influência na aderência entre revestimentos cerâmicos e argamassas colantes, a saber tipo e espessura da camada de argamassa colante e a extensão (ou área) de contato, por meio de estudos experimentais de laboratório para avaliação simultânea da resistência à tração e ao cisalhamento.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar método de ensaio para o entendimento dos esforços simultâneos de tração e cisalhamento na interface argamassa colante-cerâmica;
- Verificar a relação entre o percentual de falhas de extensão da argamassa colante e a perda de aderência do conjunto na interface;
- Avaliar a espessura da argamassa colante no comportamento mecânico do sistema;
- Identificar a influência do tipo de argamassa colante AC II e AC III na aderência do conjunto.

1.3 METODOLOGIA E LIMITAÇÕES DO ESTUDO

Essa pesquisa tem um caráter experimental e consiste na simulação de situações encontradas em campo durante a execução de revestimentos cerâmicos, notadamente em elementos de fachada.

Nesse sentido, o experimento foi realizado com a confecção de corpos de prova prismáticos (4 x 16) cm compostos de duas placas cerâmicas (de mesmas características) recheadas com argamassa colante (AC II ou AC III) em três diferentes espessuras (2 mm, 5 mm e 7 mm) utilizados para determinação do seu comportamento quando submetido a esforços simultâneos de tração e cisalhamento, empregando o método MMF.

Todos os materiais empregados foram também caracterizados para efeito de comparação com produtos similares encontrados no mercado.

Em face das características do estudo, é importante também destacar algumas limitações não consideradas, sendo elas:

- Admitindo poucos precedentes do método de ensaio utilizado para o objetivo proposto, optou-se por adotar uma maior quantidade de variáveis em detrimento do número de amostras para cada caso, com o intuito de melhor perceber a sensibilidade do método para a investigação desejada. Isso impossibilitou a realização de um estudo probabilístico mais aprofundado para análise dos valores encontrados;
- as análises de campo foram realizadas apenas para identificar as principais variáveis a serem adotadas no experimento, de modo que não foram executados ensaios de obra;
- para a confecção dos corpos de prova foi utilizada apenas um tipo de placa cerâmica (grupo BIIa), de modo que não se verificou a influência, por exemplo, da absorção de água desse elemento na aderência do conjunto. Para as argamassas colantes, utilizou-se amostras de um mesmo fornecedor para os dois tipos (AC II e AC III);
- todas as condições ambientais de cura das amostras foram de laboratório, de maneira que não foi avaliada a influência desses condicionantes (umidade, temperatura, ensolação etc.) nos resultados;

- os ensaios de resistência de aderência à tração direta e em modo misto de todos os corpos de prova utilizados neste estudo foram realizados aos 28 dias após a sua confecção, de modo que o tempo de cura não fosse mais uma variável a ser considerada nesta pesquisa.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho de dissertação está organizado em cinco capítulos. Neste capítulo procurou-se abordar a importância do tema, a complexidade do assunto a ser tratado e as motivações para a pesquisa.

No segundo capítulo descreve-se os principais trabalhos e pesquisas realizados na área de sistemas de revestimentos cerâmicos. Tópicos sobre a aderência dos sistemas de revestimentos colados também serão apresentados, assim como os seus principais fatores de influência, com destaque especial para revestimentos externos de fachada. Por fim serão mostrados alguns conceitos clássicos da mecânica da fratura para melhor entendimento da propagação das fissuras em materiais frágeis, como as argamassas colantes por exemplo.

O terceiro capítulo aborda a metodologia usada na realização dos ensaios experimentais para a caracterização da cerâmica e das argamassas colantes industrializadas que serão utilizadas neste trabalho, bem como o ensaio de modo misto para verificação da propagação da primeira fissura.

O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos e as discussões dos mesmos, sendo apresentadas as curvas de força *versus* deslocamento que indicam a resistência de aderência máxima dos corpos de prova em cada situação estudada.

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

CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ADERÊNCIA DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS

Neste capítulo serão abordados os fundamentos teóricos e os conceitos utilizados nesta pesquisa, especialmente os revestimentos cerâmicos e mecânica da fratura.

2.1.1 REVESTIMENTOS – CONCEITOS BÁSICOS

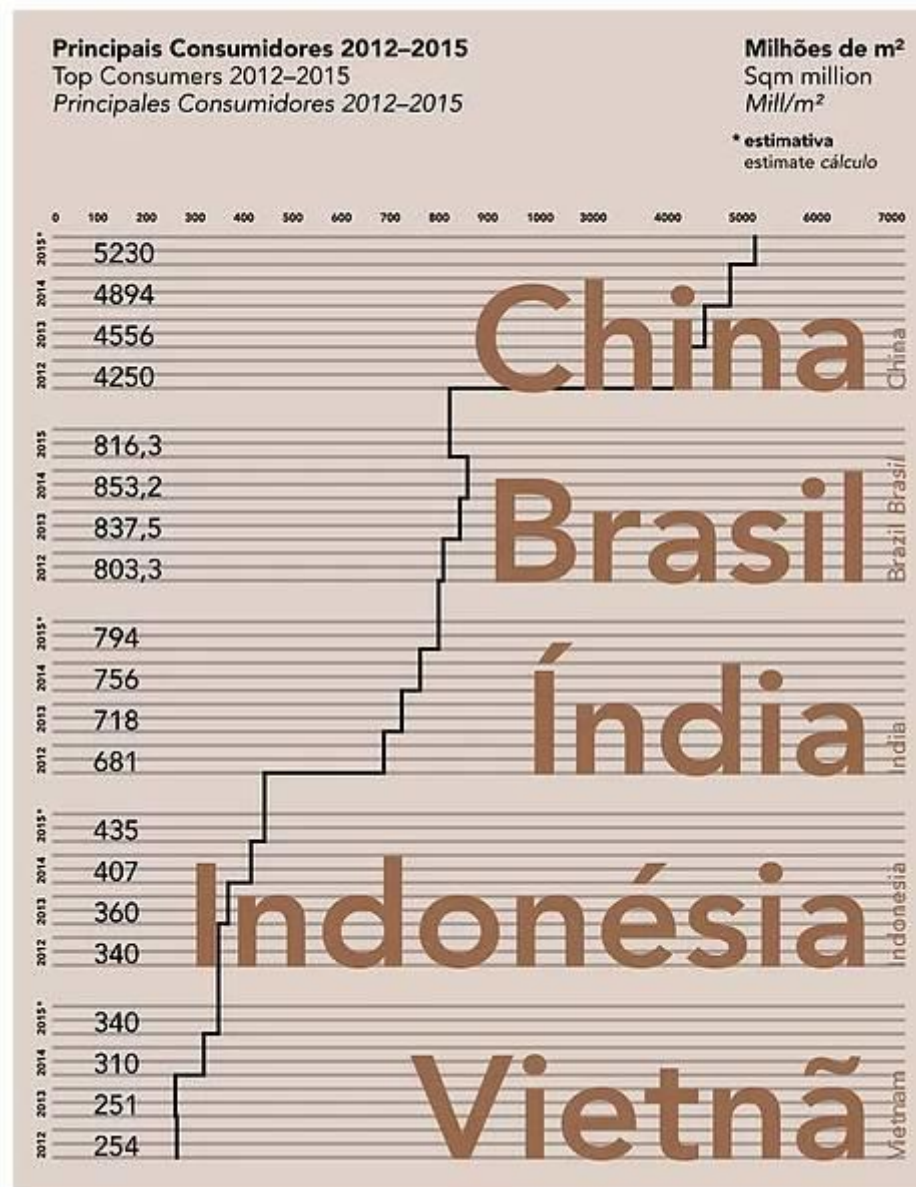
A composição de um sistema de revestimento cerâmico, propriedades dos materiais e tensões atuantes no sistema de revestimento são temas que serão apresentados nesta seção.

Os sistemas de revestimentos que geralmente são dispostos em camadas podem ser constituídos de diversos materiais, sendo diferentes suas texturas e formas, assim como os métodos construtivos utilizados para a sua confecção.

Na região metropolitana do Recife, o revestimento cerâmico semi-grés, conhecido comercialmente apenas como revestimento cerâmico, é o material mais utilizado para o revestimento da fachada devido a sua eficiência na proteção da alvenaria de periferia e por seu potencial refratário, além do custo inferior, quando comparado a outros materiais como porcelanato, granito e placas de alumínio composto (ARAÚJO, 2016).

Este trabalho está focado em estudar o sistema de revestimento cerâmico composto por argamassa colante e peças cerâmicas (semi-grés), uma vez que este tipo de revestimento é largamente utilizado pela indústria da construção civil, sendo o Brasil o segundo maior consumidor de revestimentos cerâmicos do mundo, perdendo apenas para a China, conforme pesquisa divulgada pela ANFACER – Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres (Figura 1).

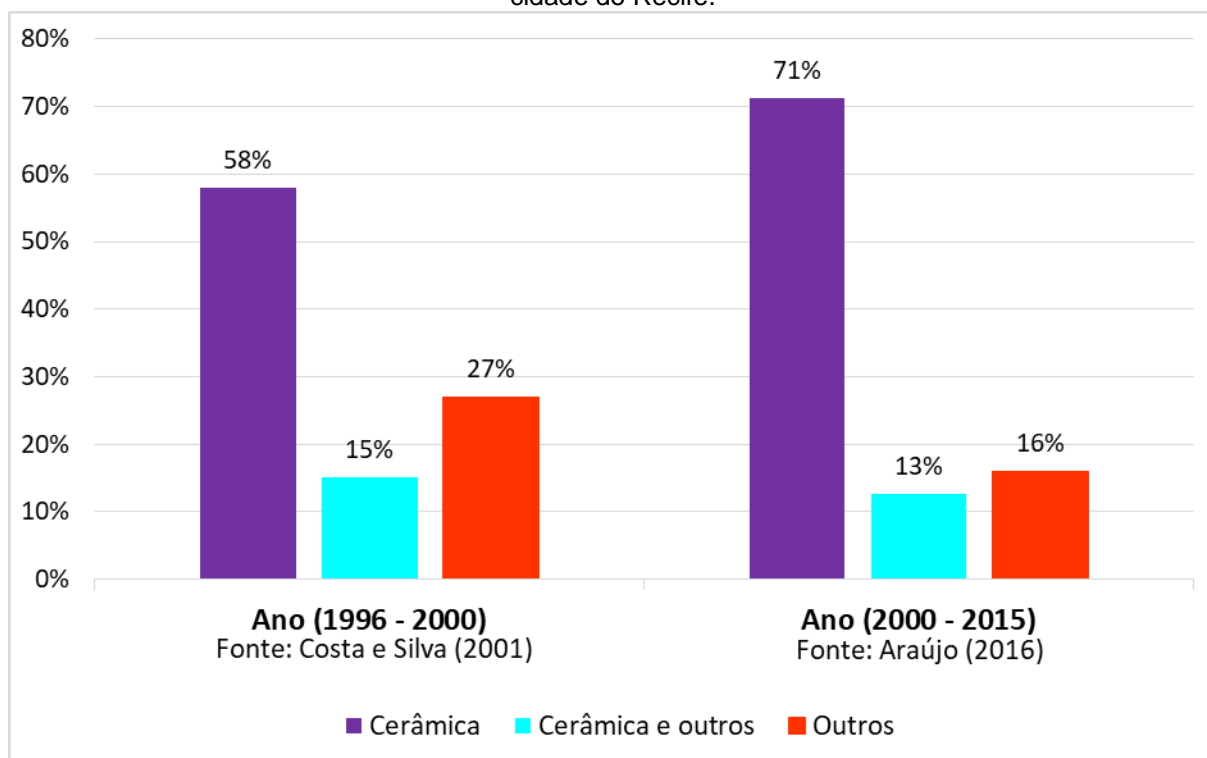
Figura 1 - Consumo Mundial de Revestimento Cerâmico.



Fonte - ANFACER (2016).

Em pesquisas realizadas por Costa e Silva (2001) e Araújo (2016) constata-se que, para um dado intervalo de tempo, mais da metade de todos os edifícios analisados, tiveram suas fachadas revestidas com material cerâmico. Percebe-se no Gráfico 1 que a tendência do uso deste material tem crescido ao longo do tempo.

Gráfico 1 - Percentual total do emprego de revestimento em fachadas de edifícios residenciais na cidade do Recife.



Fonte: Adaptado Costa e Silva (2001), Araújo (2016).

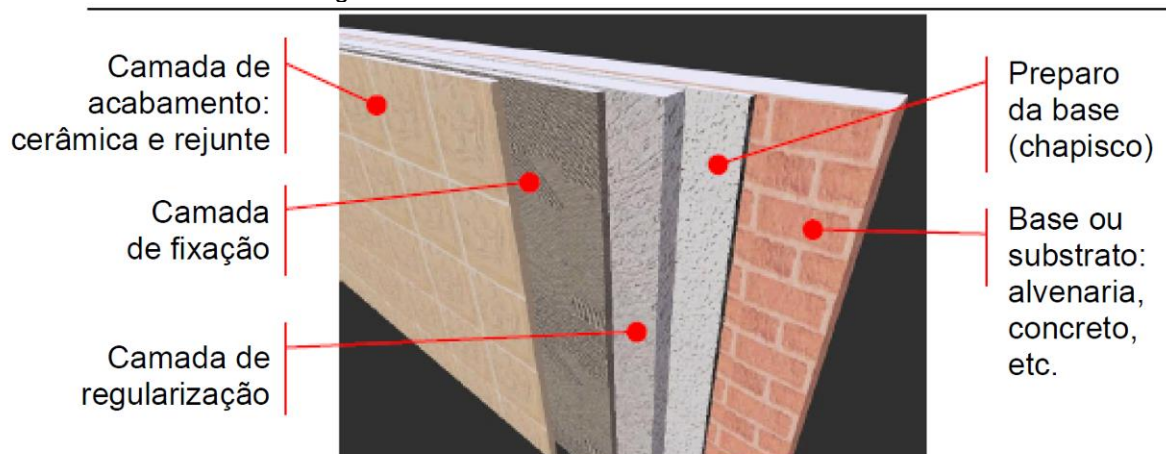
As camadas de revestimentos são inicialmente formadas por uma base ou substrato, que pode ser em concreto, alvenaria etc. Em seguida tem-se uma camada de chapisco, argamassa de emboço, argamassa colante ou pasta de cimento e, por último, o revestimento cerâmico cujas juntas são preenchidas por rejunte. É de extrema importância que este conjunto se comporte de maneira monolítica, ou seja, como um só elemento, minimizando, assim, os riscos do aparecimento futuro de patologias que poderão comprometer o funcionamento do sistema.

Junginger (2003), ilustra a estrutura do sistema de revestimento (Figura 2) e descreve a principal função das camadas no conjunto, sendo:

- Base, as superfícies sobre as quais são aplicadas as camadas do revestimento, segundo a ABNT NBR 13755 (2017);
- a camada de preparo da base ou chapisco, é responsável por fornecer a aderência necessária entre a camada de regularização (emboço) e a base;

- a camada de emboço tem como objetivo regularizar a superfície de aplicação da cerâmica de modo a deixá-la lisa e sem depressões e saliências indesejáveis;
- a camada de fixação, cujo principal elemento utilizado é a argamassa colante industrializada, tem a função de manter as placas cerâmicas indiretamente aderidas ao substrato;
- e por último tem-se os revestimentos cerâmicos, que normalmente apresentam juntas preenchidas por rejunte com a finalidade de garantir beleza e estanqueidade à fachada.

Figura 2 - Estrutura do sistema de revestimento.



Fonte - Junginger (2003).

2.1.2 FUNÇÕES, PROPRIEDADES E COMPORTAMENTOS DO SISTEMA DE REVESTIMENTO

Para atender as necessidades dos usuários, os sistemas de revestimentos cerâmicos devem apresentar algumas características, tais como: estabilidade mecânica frente aos fenômenos climáticos ou térmicos, estanqueidade à água e aos gases, isolamento termo-acústico, resistência ao fogo, regularização da base, contribuição estética, etc. (MACIEL, SABBATINI, 2016; CINCOTTO *et al.*, 1995).

Numa síntese, pode-se dizer que os revestimentos cerâmicos têm como principal função proteger e dar acabamento estético às edificações. Além da

valorização econômica do imóvel, o revestimento também atua como uma barreira protetora contra agentes deletérios como umidade, névoa salina, gás carbônico, etc. Também evita desgastes mecânicos, mantendo a integridade da base ao qual está aderido.

Analisar as peculiaridades de cada camada em um sistema de revestimento cerâmico é uma etapa primordial para o entendimento do surgimento das manifestações patológicas, sobretudo o descolamento das placas cerâmicas. Abaixo são mostradas as principais características de cada uma dessas camadas.

2.1.2.1 BASE

No Brasil e em alguns lugares do mundo, a base normalmente é constituída de duas partes, sem do elas a alvenaria (na maioria dos casos blocos cerâmicos e blocos de concreto assentados com argamassa de cimento e areia) e pelos elementos estruturais de concreto (vigas, pilares, etc.). A NBR 13755 (ABNT, 2017) define base como sendo as superfícies sobre as quais são aplicadas as camadas do revestimento.

A aderência da base será influenciada pela característica dos materiais utilizados, visto que estes possuem porosidade distinta (capacidade de absorção de água) e rugosidade diferenciada (textura superficial).

A porosidade da base é extremamente importante no processo de aderência, uma vez que ela determina a quantidade de água da argamassa de emboço que será perdida para a base. Esta interação que provoca um transporte de água da argamassa fresca para o substrato dependerá das características da argamassa de emboço, da natureza do substrato e da espessura do revestimento (PAES, 2004).

Kazmierczak *et al.* (2007) verificou em sua pesquisa que a alvenaria de vedação de bases feitas com blocos cerâmicos, blocos de concreto e tijolo maciço (com e sem chapisco) apresentam capacidade de sucção de água diferentes, em virtude de uma sensível diferença na distribuição dos poros. Particularmente neste trabalho, os autores constataram que o bloco cerâmico pode ser considerado com porosidade mediana, enquanto o bloco de concreto e o tijolo maciço podem ser considerados com elevada porosidade.

Em relação a rugosidade da base sabe-se que quanto mais rugosa for a sua superfície, maior será a sua resistência de aderência ao cisalhamento, a julgar que as rugosidades aumentam a área de contato entre a argamassa e a base, aumentando potencialmente a aderência entre eles.

2.1.2.2 CHAPISCO

Uma das funções do chapisco é preparar a base a fim de uniformizar a sucção e a rugosidade da base, principalmente quando a superfície da base é muito lisa ou apresenta porosidade e capacidade de sucção inadequadas, ou ainda quando os revestimentos estão sujeitos a solicitações mais severas, como os revestimentos de fachada.

O chapisco pode melhorar consideravelmente, aumentando a aderência entre o substrato e o revestimento, e neste caso, quanto mais aderidos estiverem, menor a probabilidade de futuros descolamentos. A superfície extremamente rugosa proporcionada pelo chapisco auxilia na adesão no estado fresco além de diminuir a avidez por água dos substratos muito absorventes.

2.1.2.3 EMBOÇO

Segundo a NBR 13529 (ABNT, 2013) o emboço é a camada de revestimento executada para cobrir e regularizar a superfície da base ou do chapisco, propiciando uma superfície que permita receber outra camada, de reboco ou de revestimento decorativo, ou que se constitua no acabamento final, afinal, atualmente existem inúmeras possibilidades de decoração das superfícies planas verticais.

Um breve comentário sobre algumas propriedades das argamassas para emboço será feito a seguir (trabalhabilidade, capacidade de retenção de água, densidade de massa, capacidade de aderência), visto que tais propriedades influenciam o mecanismo de aderência e, conseqüentemente, o descolamento das placas cerâmicas.

▪ **Trabalhabilidade**

Pode-se dizer que as duas propriedades fundamentais da argamassa que regem a trabalhabilidade são a consistência e a plasticidade. A consistência tem a ver com a capacidade da argamassa resistir às deformações que lhe são impostas, já a plasticidade refere-se à capacidade da argamassa manter a deformação resultante da ação de cargas externas, mesmo depois da retirada das cargas, com ausência de ruptura.

Trabalhabilidade da argamassa é a habilidade de fluir ou espalhar-se sob a superfície substrato, por suas saliências e reentrâncias, definindo a intimidade do contato entre a argamassa e o substrato (CARASEK, 1996).

Apesar de ser um parâmetro muito importante na garantia da qualidade da argamassa, a avaliação da condição de trabalhabilidade de uma argamassa ainda é muito empírica, e na maioria das vezes, é feita pelo operário a partir do manuseio da colher de pedreiro (DAS CHAGAS, 2009).

▪ **Retenção de água**

A propriedade da retenção de água nas argamassas está relacionada com a capacidade da argamassa de revestimento não alterar o seu comportamento reológico de forma a comprometer a sua trabalhabilidade. Ou seja, a argamassa deve-se manter aplicável por um período máximo de tempo mesmo que exista a perda de água através da evaporação, sucção do substrato e hidratação do cimento.

Maciel e Sabbatini (2016) salientam que se a perda de água é muito rápida, podem ser prejudicadas a aderência, resiliência, resistência mecânica do sistema de revestimento, comprometendo consequentemente a durabilidade e a estanqueidade do conjunto.

▪ **Densidade de massa**

Alves (2002) comenta que a densidade de massa é um indicativo do teor de ar presente na mistura e da facilidade de aplicação da argamassa, sabendo que quanto menor a densidade de massa menor o esforço para sua aplicação, isso em seu estado fresco.

Em estado endurecido ela indica a compacidade resultante da proporção de mistura agregado/aglomerante e da distribuição granulométrica do conjunto. (NAKAKURA E CINCOTTO, 2004).

▪ **Aderência**

Aderência tem que ver com a capacidade do revestimento de se manter estável sobre o substrato mesmo quando submetido a solicitações diversas. O entendimento do mecanismo de aderência é parte do conhecimento técnico que precisa ser aprofundado para uma melhor compreensão do comportamento destes revestimentos. Alguns autores fazem distinção entre os processos de desenvolvimento da aderência, sendo eles:

- Adesão inicial: união inicial da argamassa no estado fresco ao substrato.
- Adesão: Ocorre durante o período de tempo na qual a argamassa está à espera do sarrafeamento. É caracterizada pelo transporte intenso de água.
- Aderência: O enrijecimento completo da argamassa marca esta fase. O intertravamento mecânico passa a ser determinante para esta propriedade.

Stolz *et al.* (2011) constataram uma relação entre a aderência da argamassa com a rugosidade superficial do substrato afirmando que é necessário haver uma compatibilidade entre a ambos para que a área potencial de contato proporcionada seja totalmente “molhada” pela argamassa, aumentando a extensão e aderência e conseqüentemente a resistência de aderência do sistema.

2.1.2.4 ARGAMASSA COLANTE

De acordo com a NBR 13755 (ABNT, 2017), argamassa colante (AC) é um 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. Segundo Medeiros e Sabbatini (1999), a argamassa colante proporciona muitos benefícios quando utilizada de modo adequado, tais como: racionalização do processo executivo e redução de custos, manutenção das características dos materiais, maior uniformização do serviço, facilidade de controle, menor consumo de material, maior possibilidade de adequação às necessidades de projeto e grande potencial de aderência.

A argamassa colante é capaz de suportar esforços de tração direta normais ao plano de referência e tangenciais de cisalhamento.

Outra propriedade significativa da argamassa colante é a retenção de água, que possibilita a aplicação da argamassa colante em camada fina, sem a necessidade de molhar as peças cerâmicas, nem tampouco o substrato. A retenção de água está relacionada com o tempo em aberto, definido pela NBR14081 (2012) como tempo em aberto teórico como o maior intervalo de tempo para o qual uma placa cerâmica pode ser assentada sobre a pasta de argamassa colante, a qual proporcionará, após um período de cura, resistência à tração simples ou direta.

É importante dizer também que a argamassa colante a ser utilizada será definida em virtude do ambiente em que será utilizada e do tipo de cerâmica escolhida.

2.1.2.5 PLACA CERÂMICA

Comercializada no mercado com inúmeras formas, cores e texturas, a cerâmica tornou-se um elemento versátil capaz de trazer personalidade para as edificações. Contudo não é apenas por razões estéticas que os revestimentos cerâmicos são cada vez mais procurados, este elemento além de possuir facilidade de limpeza é bastante durável.

As movimentações higroscópicas possuem grande influência nas solicitações sobre as cerâmicas. Elas acontecem pela absorção de água da placa cerâmica oriunda de chuvas ou até mesmo da umidade relativa do ar. Para que este efeito seja minimizado, a NBR 13755 (ABNT, 2017) sugere que as placas cerâmicas para uso em fachadas devem apresentar absorção máxima de 6%. Para regiões onde a temperatura atinja 0°C, a absorção máxima não pode ser superior a 3%; já que essas movimentações higroscópicas podem gerar tensões que ao longo do tempo se refletem no deslocamento das peças.

2.1.3 ADESÃO E ADERÊNCIA DE REVESTIMENTOS

Alguns autores definem aderência como sendo a resistência e a extensão de contato entre a argamassa e uma base porosa (CARASEK; CASCUDO; SCARTEZINE, 2001), já a NBR 13528 (ABNT, 2010) define aderência como sendo “a propriedade do revestimento de resistir tensões normais ou tangenciais atuantes na interface do substrato”.

Segundo Moreno Júnior e Selmo (2007), o progresso do mecanismo de aderência se dá em duas etapas distintas, consecutivas e intrinsecamente relacionadas: a adesão inicial e a aderência. A adesão inicial acontece no momento em que a argamassa no estado fresco é lançada sobre o substrato poroso, a segunda etapa do processo é a aderência propriamente dita, que desenvolve-se ao longo do processo de hidratação dos aglomerantes da argamassa.

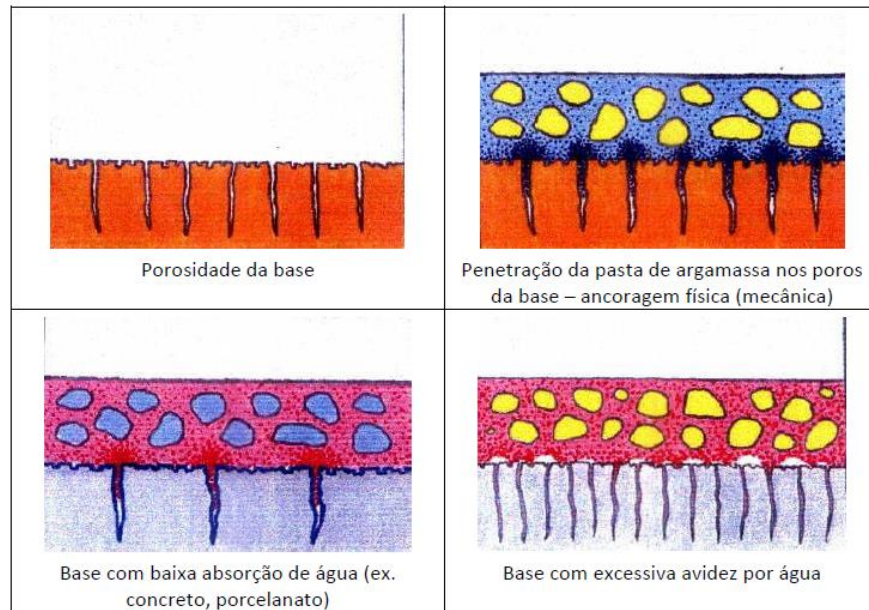
Diversos fenômenos podem influenciar a adesão, como: a molhabilidade do substrato, as forças de atração físicas induzidas no sistema, a geometria da superfície do substrato e o teor de umidade do substrato *versus* o tipo de material a ser assentado (GARBACZ; COURARD; KOSTANA, 2006). Bauer (2005) reiterou que o mecanismo de aderência instantânea da argamassa ao substrato no momento do lançamento é governado pela difusão e adsorção das moléculas de argamassa nas paredes dos poros do substrato, e que a aderência final em si ocorre com o enrijecimento da pasta, no período em que a argamassa está à espera do sarrafeamento.

Ainda neste contexto, outros conceitos sobre aderência são caracterizados, como por exemplo, os fenômenos de microaderência e macroaderência. No primeiro, a aderência se dá através da absorção da argamassa no momento do contato desta com um substrato poroso, sendo que o preenchimento destes poros proporciona uma fixação mecânica da argamassa ao substrato (RECENA, 2008). Na macroaderência por sua vez, a fixação é caracterizada pelo preenchimento de reentrâncias e saliências presentes na superfície, as quais manterão a porção da argamassa projetada presa à superfície. Para que a macroaderência seja garantida, é importante que seja promovida na superfície a rugosidade adequada, sendo que os principais efeitos desta rugosidade superficial na aderência são: o intertravamento mecânico, ou seja, a influência da macrorugosidade; e a modificação do ângulo de contato. (CZARNECKI; GARBACZ; KOSTANA, 2003).

A ancoragem física (Figura 3) é relativa a um encunhamento mecânico ligado à penetração e endurecimento da fase líquida da pasta aglomerante nos poros dos

materiais da base ou do revestimento (COSTA E SILVA, 2001). Carasek (1996) estudou este mecanismo e verificou que, no caso das argamassas à base de cimento Portland, trata-se de um fenômeno que decorre do intertravamento dos cristais de etringita no interior dos poros do material.

Figura 3 - Imagem esquemática dos mecanismos de ancoragem.



Fonte: www.poli.usp.br - Disciplina: Tecnologia das Construções II

É importante salientar que o intertravamento mecânico depende da extensão de aderência, sendo que esta é a razão entre a área de contato efetivo e a área total possível de ser unida (CARASEK; DJANIKIAN, 1997). Para Pagnussat (2008) é fundamental considerar aspectos relativos à extensão de aderência, já que muitas falhas de aderência ocorrem devido à ineficiência ou ausência de contato na interface argamassa/substrato.

Conforme Gonçalves (2004), para que se obtenha uma extensão de aderência adequada entre as camadas é necessário que exista certa uniformidade de contato, a qual pode ser obtida através de uma boa molhagem do substrato pela argamassa e da escassez de falhas, além da utilização de um adesivo com boa trabalhabilidade, potencializando o efeito de molhagem e, conseqüentemente, a aderência ao substrato.

No entanto, nem sempre essas condições são vistas nos canteiros de obra, induzindo, assim, falhas de colagem, como observado nas Figura 4 e Figura 5, que acarretarão danos prematuros, reduzindo a vida útil do sistema de revestimento.

Figura 4 - Falha de colagem em placas cerâmicas aderidas com argamassa colante.



Fonte: autora.

Figura 5 - Verificação em canteiro de obra da colagem efetiva da placa cerâmica.



Fonte: autora.

Solidez e coesão são aspectos que a superfície deve apresentar para possibilitar uma boa ancoragem, além disto deve estar isenta de poeira ou óleos, caso este que nem sempre se verifica nos canteiros de obras. Pretto (2007) afirma que é necessário remover totalmente resíduos de desmoldante que ficam aderidos à

superfície do concreto, além de outras partículas que podem estar depositadas sobre a superfície. Esta limpeza pode ser realizada de diversas formas, segundo a autora, como por exemplo: mecânica (jato de areia ou água quente), química (escovamento com água e detergente) ou com o apicoamento do concreto.

Conforme Carasek, Cascudo e Scartezini (2001) e Gonçalves (2004) a aderência mecânica das argamassas ao substrato resulta da conjunção de três propriedades, sendo elas:

- a resistência de aderência à tração, devido aos esforços normais gerados na utilização de um sistema de revestimento;
- a resistência de aderência ao cisalhamento, pelos esforços verticais e tangenciais ao revestimento gerados com a atuação da gravidade na argamassa aderida ao substrato;
- a extensão de aderência, que evidencia a possível existência de falhas de contato com espaços vazios na interface.

Diversos são os fatores que podem influenciar a resistência de aderência, como a energia de aplicação da argamassa, a pressão exercida após o seu lançamento, a espessura da camada de argamassa, as condições climáticas durante a aplicação, as condições de cura do revestimento etc. (CARASEK, CASCUDO e SCARTEZINI, 2001).

2.1.4 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO

No Brasil, a resistência de aderência à tração (RAT) de argamassas inorgânicas de paredes e tetos é determinada por meio do método normalizado pela NBR 13528 (ABNT, 2010). Para placas cerâmicas coladas com argamassa colante, o método de determinação da RAT está normalizado na NBR 14081-4 (ABNT, 2012).

A resistência de aderência à tração, no contexto de placas cerâmicas coladas com argamassa colante, é um parâmetro que informa o quanto a fixação da argamassa no substrato e no tardo das placas é eficiente. Patologias geradas pelo descolamento de placas cerâmicas tanto em fachadas quanto em ambientes

internos sempre é motivo de insatisfação de usuários mesmo pouco tempo após a compra dos imóveis.

Os descolamentos de revestimentos cerâmicos de fachadas podem ocorrer por ruptura adesiva nas interfaces entre placa cerâmica e argamassa colante, argamassa colante e emboço, emboço e chapisco e chapisco e substrato, ou ainda por ruptura coesiva, no interior de qualquer uma destas camadas (MANSUR, 2007). Em levantamento de manifestações patológicas em revestimentos com placas cerâmicas, observou-se que em 84% dos edifícios analisados houve o descolamento com ruptura adesiva na interface placa cerâmica/argamassa colante (MANSUR; DO NASCIMENTO E MANSUR, 2012). Isso se dá em razão que esta interface é a região do sistema de revestimento mais solicitada por esforços de cisalhamento, quando são considerados efeitos térmicos e de expansão higroscópica das placas cerâmicas (ABREU; LEITÃO E LUCAS, 2004; SARAIVA, BAUER E BEZERRA, 2001).

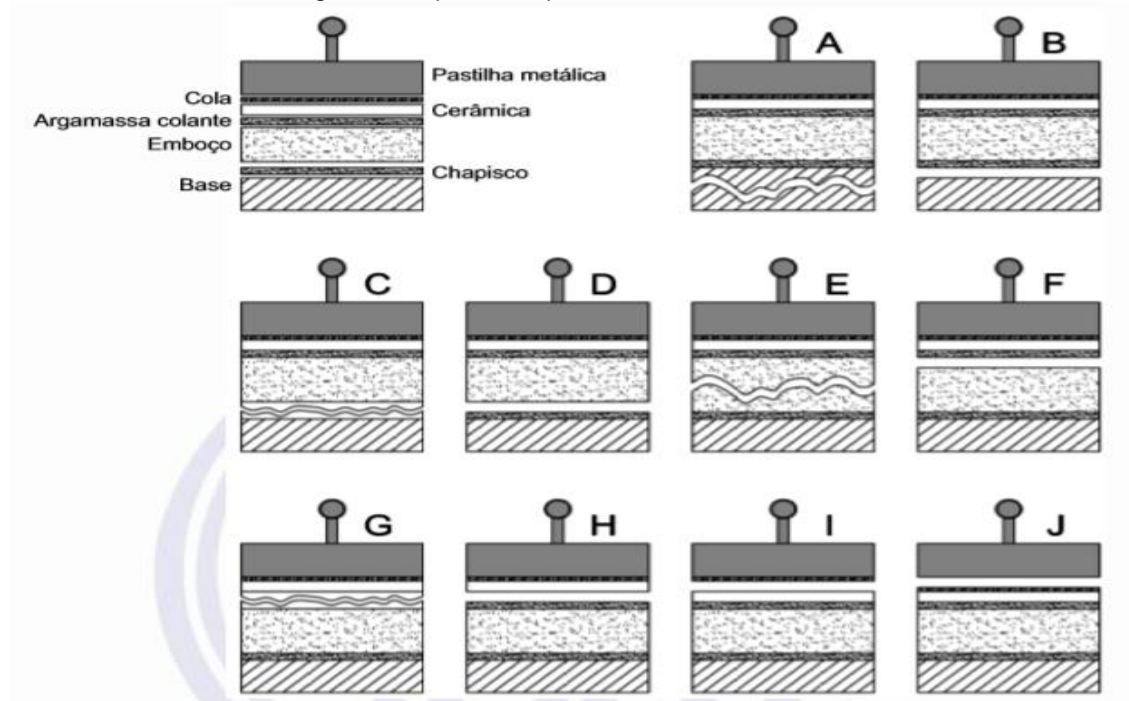
A Figura 6 ilustra os diferentes tipos de ruptura que podem acontecer no ensaio de resistência de aderência de tração direta.

A ruptura no ensaio de resistência de aderência à tração direta (RATD) pode ocorrer aleatoriamente entre quaisquer das interfaces ou no interior de uma das camadas que constituem o revestimento. Assim, as formas de ruptura relacionadas a seguir devem ser declaradas junto com o valor da resistência de aderência do sistema:

- a) ruptura no interior da base;
- b) ruptura na interface chapisco/base;
- c) ruptura do chapisco;
- d) ruptura na interface chapisco/emboço;
- e) ruptura no interior do emboço;
- f) ruptura na interface argamassa colante/emboço;
- g) ruptura no interior da argamassa colante;
- h) ruptura na interface argamassa colante/placa cerâmica;
- i) ruptura na interface cola/placa cerâmica;

j) ruptura na interface cola/pastilha metálica.

Figura 6 - Tipos de ruptura no ensaio de RATD.



Fonte: NBR 13755 (ABNT, 2017).

2.1.5 PERFILOMETRIA APLICADA A AVALIAÇÃO DO TARDOZ

Em consequência do desenvolvimento tecnológico e científico, tornou-se muito importante o estudo dos parâmetros de superfície de vários substratos, como por exemplo, dispositivos semicondutores, discos magnéticos e ópticos, cerâmicas, vidros, metais etc.

A rugosidade superficial pode ser definida como um conjunto de irregularidades, fundamentalmente saliências e reentrâncias, que caracteriza uma determinada superfície. No caso dos revestimentos cerâmicos, a rugosidade superficial afeta diretamente as seguintes propriedades de interesse do produto acabado:

- as propriedades óticas;
- a durabilidade química;
- a resistência ao desgaste por abrasão;

- a facilidade de limpeza e retenção de sujeira; e
- a resistência ao escorregamento.

Para melhor compreensão do fenômeno de aderência, o estudo da rugosidade superficial do tarso permite avaliar, de forma quantitativa, as reentrâncias e saliências presentes.

O parâmetro de rugosidade adotado nesta pesquisa foi o de amplitude Ra (*rugosidade aritmética ou média*), onde a rugosidade é determinada em função de uma linha de referência disposta na direção do perfil. No Brasil, esse sistema de medição, conhecido como sistema M, é indicado pelas normas NBR ISO 4287 (ABNT, 2002) e NBR 8404 (ABNT, 1984). Cabe destacar que esse parâmetro não está presente na NBR 13818 (ABNT, 1997), que trata das placas cerâmicas para revestimento, mas se mostra bastante interessante para o estudo da ancoragem com argamassas.

Estudos mostram que o processo de fabricação dos revestimentos cerâmicos tem influência na sua rugosidade superficial (PARRA et al., 2006). A Tabela 1 mostra a média do parâmetro indicador Ra para diferentes tipologias de revestimentos cerâmicos. A

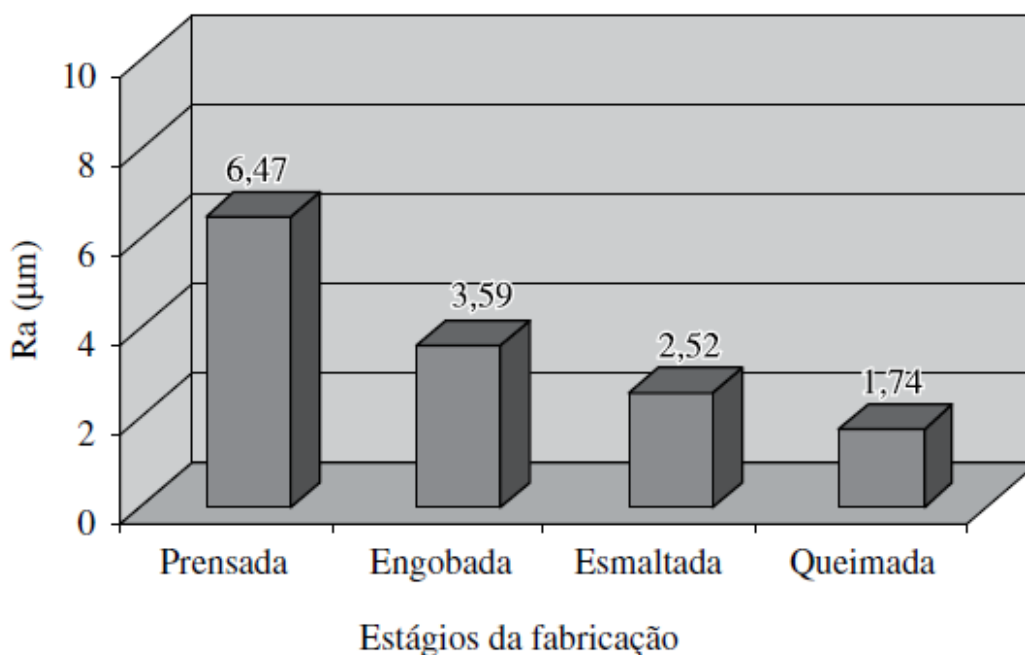
Figura 7 também apresenta a evolução a rugosidade superficial ao longo das etapas de fabricação de revestimentos cerâmicos por via seca.

Tabela 1 - Média do parâmetro Ra indicador de rugosidade superficial para diferentes tipologias de revestimentos cerâmicos.

Produtos	Parâmetro
	Ra (μm)
Via seca	1,74
Via úmida	0,69
Porcelanatos polidos	0,36

Fonte: Parra et. al (2006).

Figura 7 - Evolução da rugosidade superficial ao longo das etapas da fabricação de revestimentos cerâmicos por via seca.



Fonte: Parras *et. al* (2006).

Os instrumentos que existem atualmente para realizar estas medidas são o microscópio óptico, microscópio de força atômica (AFM) e o perfilômetro de ponteira.

2.1.6 INFLUÊNCIA DOS COMPONENTES DAS ARGAMASSAS COLANTES NA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA

O cimento Portland é o aglomerante típico das argamassas disponíveis no mercado, usado em combinação com diferentes tipos de cargas minerais. O C-S-H é um dos principais componentes da hidratação do cimento, e é um dos maiores responsáveis por grande parte das propriedades da pasta de cimento endurecida (SANTOS, 2006).

Segundo Akiama *et al.* (1997) a diminuição da quantidade de cimento ou a adição de polímeros especiais pode tornar as argamassas colantes mais deformáveis e, portanto, mais flexíveis. A diminuição da quantidade de cimento, por outro lado, reduz significativamente a capacidade de aderência.

Os aditivos mais utilizados nas argamassas colantes são os éteres de celulose (HEC - Hidroxietil celulose e MHEC - Metil hidroxietil celulose) os látex poliméricos (poli álcool vinílico - PVA). Este último, consiste da dispersão de partículas esféricas de polímero orgânico em água, formando um fluido leitoso, geralmente branco. O látex melhora o comportamento reológico da argamassa fresca, mas, principalmente, proporcionam flexibilidade e resistência à tração para a argamassa endurecida (JENNI *et al.*, 2005).

No que se diz respeito ao tipo de agregado utilizado em argamassas colantes, a areia usada nas dosagens de argamassas são predominantemente areias quartzosas com tamanho de grãos menores que 0,50 mm (MANSUR, 2007). Características como forma, textura e distribuição granulométrica exercem grande influência na trabalhabilidade e aderência de argamassas colantes. A forma e textura de materiais particulados são as maiores responsáveis por alterações no coeficiente de atrito. Lee e Seed (1967) *apud* Mendes (2008), ao medir o coeficiente de atrito de areias com morfologias diferentes, demonstraram que partículas com forma mais arredondada possuem um coeficiente de atrito menor se comparado àquelas com forma irregular.

Areias com uma finura elevada aumentam o consumo de água da mistura, o que pode provocar uma retração acentuada nas argamassas, após a evaporação da água. Além disto, os finos da areia podem preencher os poros dos substratos ocupando espaços dos produtos de hidratação (MANSUR, 2007; ANTUNES, 2010).

Um aumento na proporção de areia, mantida a mesma quantidade de água na mistura, diminui a trabalhabilidade das argamassas, provocando uma diminuição em sua resistência de aderência. Verifica-se também que areias grossas provocam o comprometimento do envolvimento dos grãos pela pasta de cimento, o que compromete a extensão da aderência (ANTUNES, 2010).

2.1.7 INFLUÊNCIA DE AGENTES EXTERNOS NA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA

O sistema de revestimentos em seu estado endurecido é submetido a diversos agentes de exposição que podem comprometer a sua durabilidade. Esses

agentes (temperatura, umidade relativa e vento, atuam sobre o sistema de revestimento como agentes deletérios, sendo neste caso, o microclima mais importante que o macroclima (SILVA, 2003). Tais agentes podem gerar tensões nos revestimentos que superam a sua capacidade de suporte (resistência) ou de absorver as deformações, ocasionando fissuras, descolamentos etc. As juntas de movimentação e de assentamento (rejunte) exercem também papel importante para atenuar esses problemas ao longo do tempo (fadiga).

De acordo com Maciel, Barros e Sabbatini (1998), a capacidade de absorver deformações é a propriedade que o revestimento apresenta, quando exposto a pequenas tensões, de suportá-las sem apresentar rupturas ou alterações que comprometam sua estrutura, aderência, estanqueidade e durabilidade. O mesmo autor ainda complementa dizendo que a capacidade de uma argamassa de absorver deformações depende do módulo de deformação da argamassa colante, da espessura das camadas (deve-se tomar cuidado para não se ter espessuras excessivas que poderão comprometer a resistência de aderência), e das juntas de trabalho do revestimento, as quais delimitam panos com dimensões menores, compatíveis com as deformações, contribuindo para a obtenção de um revestimento sem fissuras prejudiciais.

Os revestimentos e suas camadas suportes sofrem deformações térmicas diferentes devido aos seus coeficientes de dilatação. Estas variações térmicas geram tensões de tração e compressão no revestimento cerâmico. O surgimento da tração entre as camadas de materiais diferentes dá origem também a tensões de cisalhamento entre o tardo das peças e a argamassa colante, resultando em empenamento da placa cerâmica (WETZEL *et al.*, 2012) ou estufamento pela perda gradual de resistência (fadiga). Pereira (2012) reitera dizendo que a maior diferença de módulo de elasticidade se dá entre as argamassas colantes e as placas cerâmicas, portanto esta interface pode ser considerada a mais crítica em um sistema de revestimento cerâmico.

Outro fator que pode gerar tensões de tração no revestimento é a pressão de sucção do vento, embora seja menos importante (MEDEIROS, 1999). Mesmo que não influencie de forma direta nos mecanismos de aderência, é importante citar também o transporte de água que ocorre em sentido contrário ao substrato: a evaporação. Segundo Bastos (2001) *apud* Nogami (2007), a argamassa colante no estado fresco perde vapor de água para o ambiente pelo desequilíbrio de umidade,

sendo que a água migra do ambiente mais saturado para o menos saturado. A influência indireta da evaporação na resistência de aderência dos revestimentos ocorre em função de sua intensidade, se irá interferir ou não na quantidade de água necessária para as reações de hidratação.

2.1.8 CHOQUE TÉRMICO NOS REVESTIMENTOS DE ARGAMASSA

Os revestimentos de argamassa de base cimentícia são utilizados em várias partes do mundo como uma camada de proteção e vedação da estrutura, e em alguns casos funciona também como acabamento decorativo. Apesar de sua longa tradição de uso, os revestimentos de argamassa apresentam pontos relativos ao seu desempenho que ainda não foram completamente estudados, como o seu comportamento mecânico.

Para que o nível de desempenho de uma argamassa de revestimento seja mantido durante toda a sua vida útil, o revestimento deverá se comportar de maneira resistente desde as suas primeiras idades até o seu estado endurecido, onde geralmente os agentes de degradação ocorrem de maneira simultânea.

A temperatura é um dos agentes de degradação mecânica dos materiais de base cimentícia. Sua variação provoca tensões de tração altamente prejudiciais para o sistema, visto que a resistência à tração das argamassas é baixa.

Esquiavel e Barros (2009) afirmam que a variação da temperatura que os revestimentos de argamassa podem ser submetidos dependem das condições de uso e de exposição do edifício. Quando de uso industrial, por exemplo, em determinados ambientes internos essas variações podem atingir uma ou várias centenas de graus Celsius; por outro lado, podem ocorrer situações em que as temperaturas atingem valores negativos ($<0^{\circ}\text{C}$). Quando o uso é residencial ou comercial, usualmente os revestimentos estão sujeitos à variação de temperatura do meio ambiente e, neste caso, podem ocorrer variações de dezenas de graus principalmente na sua superfície.

No caso das fachadas, esse choque térmico pode ser ainda mais intenso, em decorrência da exposição direta a insolação, ventilação, chuva, além das diferentes cores utilizadas como acabamento, especialmente em placas cerâmicas.

Quando a variação de temperatura é muito rápida, a taxa de carregamento no material é alta; portanto, a propagação das deformações de origem térmica no material dependerá da velocidade de resposta do mesmo, até atingir o equilíbrio.

Kingery (1960) explica que quando o choque térmico é por resfriamento, a superfície do sólido atingirá rapidamente a nova temperatura e irá retrair; no entanto, o seu interior continuará na sua temperatura inicial, com isso, é gerado um gradiente térmico que provoca o aparecimento de tensões de tração na superfície e compressão no centro do sólido. Kingery (1955) destacou que, para os materiais cerâmicos, as tensões de tração geradas em sua superfície pelo choque térmico podem atingir valores que superem a resistência à tração do material, resultando na fratura do mesmo.

Para os materiais e componentes de construção são também diversas as situações em que o fenômeno pode ocorrer, seja pela exposição ao meio ambiente (ciclos de gelo e degelo, períodos de aquecimento solar seguidos de períodos de chuva), pelas diversas condições de uso (fornos industriais, pisos, saunas etc.), e, até mesmo, em casos de incêndios.

2.1.9 GRADIENTE TÉRMICO NO BRASIL

Como visto na seção anterior, a temperatura exerce grande influência nos revestimentos, principalmente externos, especialmente a variação da temperatura (gradiente térmico). Em razão disto, é interessante conhecer algumas características climáticas das regiões do Brasil para um melhor entendimento do comportamento do sistema de revestimentos cerâmicos.

O ciclo diurno da temperatura, ao qual também é conhecido como gradiente térmico diário, reflete a variação da incidência dos raios solares ao longo do dia. Tipicamente a temperatura mínima registra-se pouco antes do nascer do sol e vai aumentando gradualmente até o período entre 14h e 16h, quando se registra a temperatura máxima, decrescendo até pouco antes do nascimento do sol no dia seguinte (UFPR, 2017). A partir disto, se pode determinar a amplitude térmica diurna, que nada mais é que a diferença entre os valores máximos e mínimos de temperatura registrados em um dia. Quanto maior for a amplitude térmica diurna de

um local, maiores serão as tensões internas geradas no sistema de revestimento cerâmico, podendo causar posteriormente o colapso do sistema por meio do deslocamento das peças cerâmicas, como já foi dito anteriormente.

É importante destacar que os valores de amplitude térmica diurna mais elevados não se registram nos locais próximos à linha do Equador, devido à elevada nebulosidade que evita o alto arrefecimento noturno. No interior dos continentes e nas regiões desérticas são registradas as maiores amplitudes térmicas.

A amplitude do ciclo diurno pode ser afetada por vários fatores:

- Amplitude de variação da altura do sol durante o dia, que é maior em latitudes baixas que em altas. De fato, nos trópicos a diferença de temperatura entre dia e noite é frequentemente maior que o contraste inverno-verão.

- A nebulosidade diminui a amplitude da variação porque, durante o dia, as nuvens bloqueiam a radiação solar, reduzindo o aquecimento, e à noite as nuvens retardam a perda de radiação pela superfície e o ar e re-irradia calor para a Terra.

- Localidades costeiras podem ter menores variações de temperatura durante o dia. Durante 24 horas o oceano se aquece tipicamente menos que 1°C. Portanto, o ar acima dele também tem pequena variação e localidades a sota-vento do oceano apresentam menor amplitude do ciclo diurno.

A variação térmica em um mesmo dia, na cidade de Porto Alegre - RS, por exemplo, pode ser muito alta, gerando gradientes de temperatura na ordem de até 50°C na superfície da fachada. Em uma pesquisa visando a avaliação da durabilidade de sistemas de revestimento cerâmico, realizados com placas cerâmicas e argamassas colantes aplicadas em substratos de concreto, através da indução de tensões de natureza térmica (CHEW, 1992), foi constatada uma redução de cerca de 20% na resistência de aderência à tração das placas, quando comparados aos sistemas que não passaram pela ação dos ciclos (VALENTINI; KAZMIERCZAK, 2016).

2.2 MECÂNICA DA FRATURA

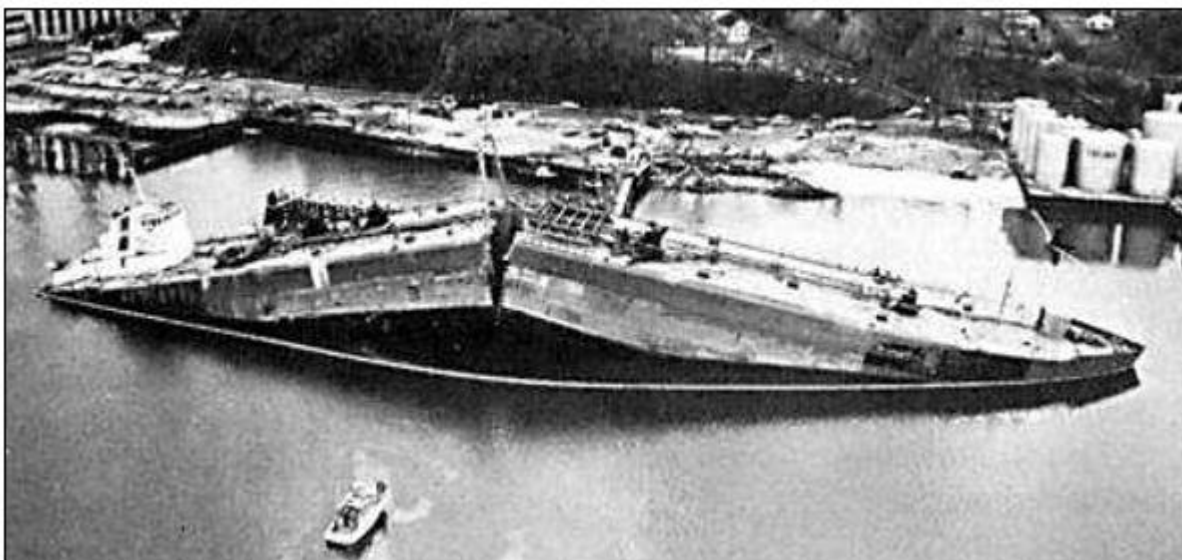
2.2.1 ASPECTO HISTÓRICO

A Mecânica da Fratura identifica propriedades do material que podem ser relacionadas ao seu comportamento mecânico, o que permite analisar a resistência e a durabilidade de um componente com trincas de formas e tamanhos diferentes. Dessa forma, a mecânica da fratura fornece subsídios para a seleção de materiais e detalhes de projeto de modo a minimizar a possibilidade de falhas relacionadas a presença de trincas.

Algumas rupturas por efeito cíclico têm causado danos materiais e humanos consideráveis ao longo dos anos, de que se conhecem muitos exemplos em aviões, trens, pontes, automóveis, etc.

No início dos anos 40, durante a segunda guerra mundial, 4694 navios do tipo Liberty foram construídos nos Estados Unidos. Dentre os navios construídos, 1289 navios (25% da frota) foram vítimas de fraturas no casco, sendo que 233 foram catastróficas, resultando na perda da embarcação. Alguns navios quebraram em duas partes em questão de segundos, sem aviso prévio (fratura frágil ao longo das juntas soldadas), como pode ser visto na Figura 8.

Figura 8 - Fratura frágil ocorrida em um navio de carga Liberty que separou o navio em duas partes em 1941.



Fonte: Anderson (2005).

2.2.2 ASPECTOS GERAIS

A mecânica da fratura tem como um dos objetivos principais prever se uma estrutura irá ou não falhar devido à presença de uma trinca. Diz-se que um elemento sofre fratura quando ocorre a separação em dois ou mais objetos devido à aplicação de uma tensão. A análise das condições de crescimento de uma fissura é feita a partir do campo de tensões existentes em sua extremidade, que é quantificada pelo fator de intensidade de tensões K . Assim, comparando-se esse valor de K com uma característica peculiar de cada material, chamada tenacidade à fratura, é possível prever se um componente fissurado irá ou não falhar quando submetido a alguma solicitação (ANDERSON, 2005).

Segundo Mandai (2010), é bem comum uma fratura ocorrer em uma estrutura aparentemente não danificada quando solicitada ciclicamente. Usualmente, isso é causado por micro falhas na estrutura de onde ocorre a nucleação das trincas. Dessa maneira, a trinca pode crescer a partir de um concentrador de tensões, diminuindo a resistência mecânica da estrutura até o seu colapso. A presença de uma trinca não condena um componente do ponto de vista estrutural, porém, caso haja algum tipo de solicitação mecânica é necessário saber quanto tempo essa trinca inicial levará até alcançar um tamanho crítico no qual o componente se tornará inseguro e falhará.

Sob o olhar da mecânica da fratura, a tolerância ao dano é uma propriedade que uma estrutura possui para suportar a presença de uma trinca de maneira segura. Esta abordagem procura considerar o campo de tensões e deformações junto a defeitos em componentes.

As técnicas da mecânica da fratura baseiam-se no:

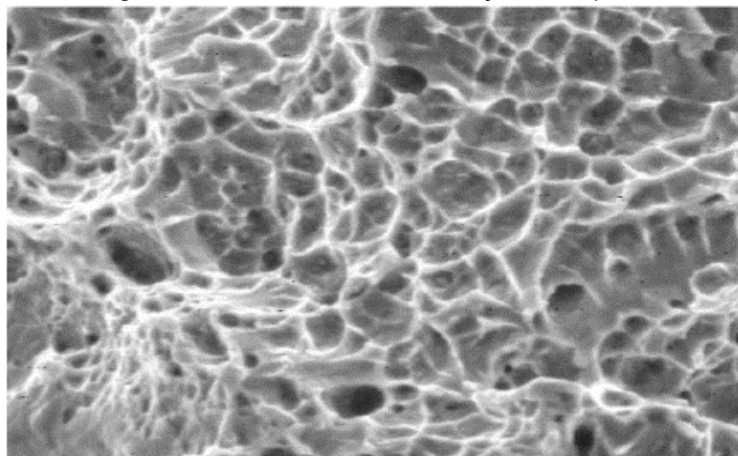
- Comportamento linear-elástico (MFLE), parâmetro representativo do campo de tensões à frente de um defeito;
- Comportamento elasto-plástico (MFEP), capacidade de deformação localizada à frente de defeitos, efeito em materiais nem sempre é facilmente previsível.

O crescimento da trinca pode acontecer basicamente de três maneiras:

Fratura dúctil: ocorre a deformação substancial do material até a falha. Primeiramente ocorre o descolamento das inclusões, que em seguida dará lugar a

micro cavidades, ilustrado na Figura 9, e o crescimento dessas micro cavidades (convalescimento de micro vazios) é que provocará a ruptura.

Figura 9 - Micro cavidades na seção de ruptura.

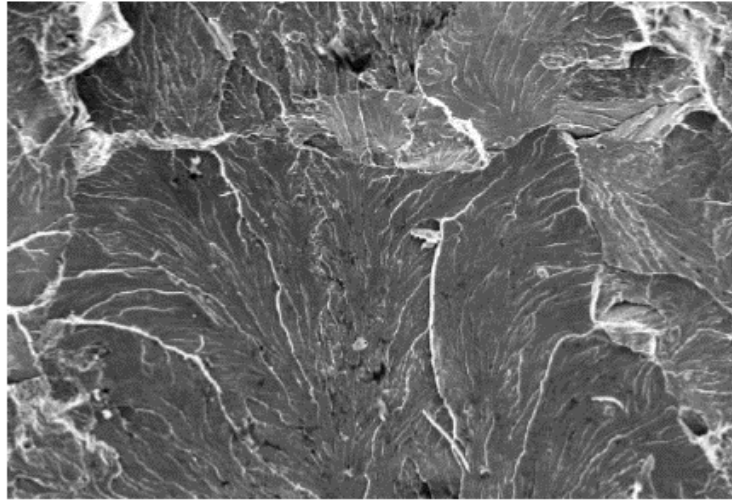


Fonte – Mandai (2010).

Fratura frágil: ocorre pouca deformação do material, envolvendo a separação dos planos cristalinos, como ilustrado na Figura 10. A fratura frágil ocorre sem qualquer deformação plástica apreciável e pela rápida propagação de uma trinca. A direção do movimento da trinca é aproximadamente perpendicular à direção de tensão de tração aplicada e produz uma superfície de fratura relativamente plana. (CALLISTER, 2008).

É relevante comentar que os materiais componentes dos elementos estruturais de uma dada construção não devem apresentar um comportamento frágil, uma vez que a deformação plástica antes da ruptura é importante para avisar e chamar atenção a respeito de determinada falha, evitando um colapso inesperado.

Figura 10 - Facetas de clivagem, indicando o sentido de propagação da trinca.

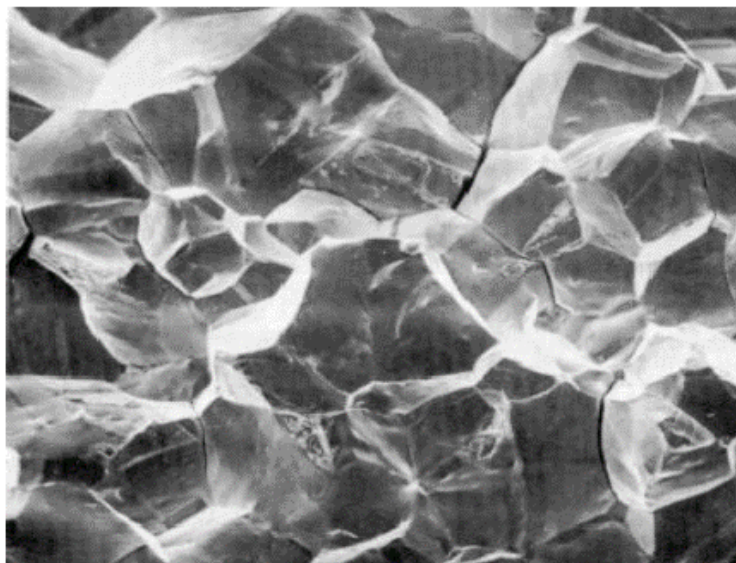


Fonte – Mandai (2010).

Fratura intergranular: ocorre a separação do material ao longo dos contornos do grão, representada pela Figura 11. E esse mecanismo é extremamente frágil, facilitado pela presença de grãos grosseiros. A superfície da fratura pode exibir uma textura granulada ou facetada, como resultado de mudanças na orientação dos planos de clivagem de um grão para o outro.

O crescimento da trinca nas cerâmicas cristalinas pode ser tanto transgranular (através dos grãos) como intergranular (ao longo do contorno dos grãos).

Figura 11 - Mecanismo de separação intergranular.



Fonte – Mandai (2010).

2.2.3 MECÂNICA DA FRATURA LINEAR ELÁSTICA (MFLE)

Nesta seção são abordados alguns conceitos da mecânica da fratura linear elástica (MFLE). Uma abordagem sobre a mecânica da fratura elasto-plástica (MFEP) não será contemplada neste trabalho, uma vez que não se aplica ao conteúdo deste estudo.

A MFLE averigua os problemas relacionados à fratura de materiais predominantemente em regime elástico ou cujo comportamento inelástico seja desprezível ou com uma atuação muito localizada.

Devido à característica inerente da fratura ocorrer em materiais frágeis, a MFLE também pode ser chamada de Mecânica da Fratura Frágil (PASTOUKWOV; VOORWALD, 1995).

Alguns conceitos teóricos são extremamente importantes no estudo da MFLE, tais como:

- **Fator de Concentração de Tensões**

As resistências à fratura medidas para a maioria dos materiais frágeis são significativamente menores do que aquelas previstas através de cálculos teóricos baseados nas energias de ligações atômicas. Segundo Callister (2008) essa discrepância é explicada pela presença de defeitos ou trincas muito pequenos, microscópicos, que sempre existem em condições normais na superfície e no interior do corpo de um material.

Na engenharia se verifica uma série de discontinuidades geométricas, como furos, entalhes, rasgos ou detalhes similares, que requerem bastante atenção tanto em sua fase de projeto quanto na sua execução, pois tais discontinuidades concentram tensões que podem ser nocivas à estrutura. Essas concentrações de tensões são geralmente associadas a falhas em componentes mecânicos. Assim, é importante conhecer as grandezas e distribuições dessas tensões e deformações. O efeito da amplificação da tensão depende da orientação e da geometria do entalhe.

O valor do fator de concentração de tensões é determinado, na maioria das vezes, da seguinte maneira:

$$K_t = \frac{\sigma_{\text{máx}}}{\sigma_n} \quad (1)$$

Onde:

K_t = Fator de concentração de tensões.

$\sigma_{\text{máx}}$ = tensão máxima

σ_n = tensão nominal

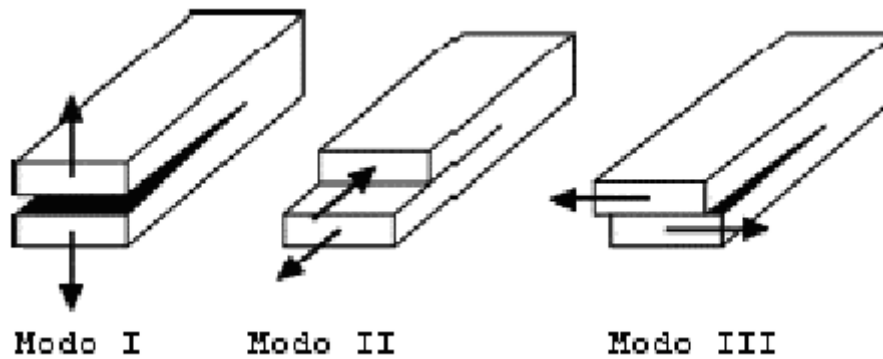
O efeito de concentração de tensões é mais evidenciado em materiais frágeis, pois em materiais dúcteis pode ocorrer uma redistribuição de tensões na região da trinca, já que as deformações plásticas ocorrerão quando as tensões equivalentes excederem o limite de escoamento do material. Callister (2008) ainda complementa que todos os materiais frágeis contêm uma população de pequenas trincas e defeitos que possuem uma variedade de tamanhos, geometrias e orientações. Quando a magnitude de uma tensão de tração na extremidade de um desses defeitos excede o valor dessa tensão crítica, ocorre a formação de uma trinca que então se propaga, o que resulta na fratura.

▪ Modos de carregamento

Um membro trincado pode ser carregado por um modo, dois, ou por uma combinação dos modos de deslocamento, ilustrados na Figura 12. O modo I é chamado de modo de abertura, ou modo de tração, com deslocamentos das superfícies da trinca na direção do plano ortogonal ao sentido de propagação da trinca. Já no modo II, também chamado de modo de deslizamento, ocorre um carregamento em cisalhamento, com deslocamentos das superfícies da trinca no plano que a contém. No modo III, carregamento em cisalhamento (rasgamento), ocorre deslocamento das superfícies das trincas no plano da trinca, promovendo um empenamento relativo entre as duas partes divididas pela trinca. A maior parte dos problemas de engenharia relacionados a propagação de trincas envolve o Modo I. Para cada modo de carregamento existe um fator de intensidade de tensão

associado, de tal forma que os fatores de intensidade de tensão K_I , K_{II} e K_{III} estão associados aos modos I, II e III.

Figura 12 - Diferentes modos de carregamento de uma trinca.



Fonte – Mandai (2010).

▪ Tenacidade à fratura

A tenacidade à fratura, K_{Ic} , de um material pode ser considerada como uma propriedade que caracteriza sua resistência ao crescimento de uma trinca. Esta propriedade é uma maneira quantitativa de expressar a resistência à fratura frágil de um material quando uma trinca está presente. Caso um material possua um alto valor de tenacidade à fratura este terá características de material dúctil. Um baixo valor de tenacidade à fratura caracteriza um material frágil. Os materiais frágeis como as argamassas colantes por exemplo, devido ao seu baixo valor de tenacidade são vulneráveis a falhas de grande proporção e prejuízo.

O valor de K_{Ic} também é conhecido como tenacidade à fratura sob estado plano de deformações. O mesmo valor de K_{Ic} pode ser determinado testando corpos de prova do mesmo material, porém com diferentes geometrias e sob combinações críticas de tamanhos e formas de trinca.

A tenacidade à fratura em deformação plana (K_{Ic}) depende de muitos fatores, sendo os de maior influência: a temperatura, a taxa de deformação e a

microestrutura. A magnitude de K_{Ic} diminui com o aumento da taxa de deformação e a diminuição da temperatura segundo Callister (2008).

2.2.4 MECÂNICA DA FRATURA E REVESTIMENTOS CERÂMICOS

O processo de degradação da colagem durante toda a fase de carregamento até a ruptura total tem sido investigado por Chaboche *et al.* (2001). Seus modelos têm origem no estudo de Yongli Mi *et al.* (1998), da representação da degradação interlaminar aos materiais compósitos, sendo posteriormente adaptados à problemática da colagem estrutural.

O fenômeno físico representado nos estudos citados é exatamente o mesmo que se deseja estudar no caso das placas cerâmicas coladas com argamassa colante: a aderência entre os substratos. Na literatura não há registros sobre uma adequação de um modelo matemático que possa representar o comportamento das placas cerâmicas aderidas, por exemplo, com a incorporação de elementos de interface, como já foi proposto por Champaney e Valoroso (2004). Tal modelo foi utilizado para a avaliação do comportamento de colagens do tipo alumínio – epoxy, prevendo um comportamento do tipo exponencial para a interface adesiva. A implementação desse modelo foi feita no programa de elementos finitos CAST3M (DE BARROS, 2005).

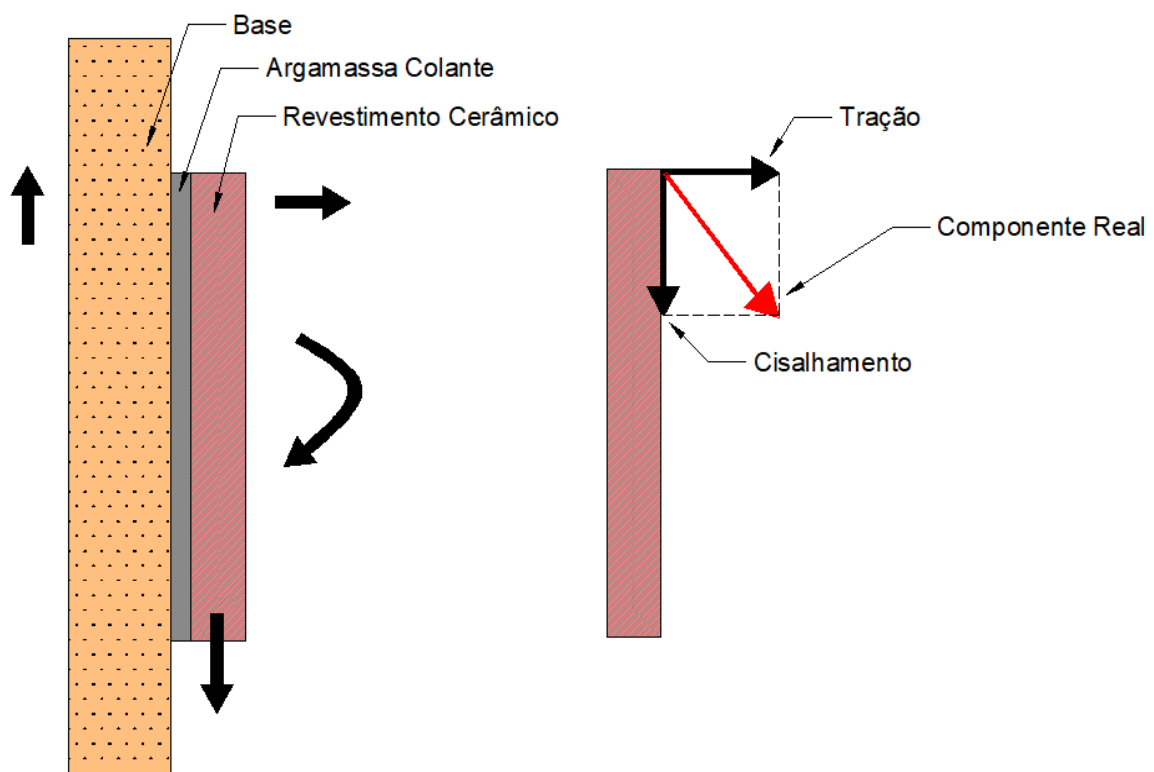
Os parâmetros necessários para o modelo de interface referente à adesão de revestimentos cerâmicos podem ser obtidos através de ensaios clássicos da mecânica da fratura. Esses ensaios são baseados nos modos de propagação da fissura definidos na mecânica da ruptura, observado na secção 2.2.3.

Na presente pesquisa foi utilizado o modo de propagação de fissura tipo III como método de avaliação da aderência das peças cerâmicas coladas com argamassa colante. Este ensaio experimental também fornece um parâmetro qualitativo, qual seja o tipo de dano observado em cada interface. Como visto, estes danos podem ser adesivos, quando a fissura se propaga na interface entre a cerâmica e a argamassa, sem haver transferência de material adesivo para o substrato que, no caso das cerâmicas, é o tardo. Outro tipo de dano observado é o coesivo. Neste último, parte do material colante fica aderido ao tardo das peças. No

dano tipo misto, acontece a combinação dos danos adesivo e coesivo. Segundo Rêgo (2008), no caso das fachadas revestidas com material cerâmico o principal dano que se observa é o do tipo adesivo.

É importante frisar que os ensaios de avaliação de aderência de revestimentos cerâmicos feitos na maioria dos países do mundo são obtidos com esforços de solicitação só tipo tração direta. Contudo, as solicitações termomecânicas às quais estão sujeitas as fachadas, induzem esforços mistos (cisalhamento e tração) às peças cerâmicas (Figura 13).

Figura 13 - Esquema simplificado dos esforços de fachadas.



Fonte: autora.

Rêgo (2008) ainda coloca que se permite a existência de 90% de superfície aderida, quando se avalia a integridade das fachadas, contudo o efeito da ausência de 10% de material adesivo na aderência das peças cerâmicas não é levado em consideração como elemento concentrador de tensões, podendo reduzir significativamente a aderência dos elementos cerâmicos nas fachadas. Na Figura

14, se pode observar esta ausência de material adesivo na placa cerâmica, configurando uma falha na extensão de aderência que pode vir a se tornar altamente danosa para a integridade do revestimento ao longo dos anos.

Assim sendo, o uso de ensaios de modo misto seria mais representativo das condições existentes em fachadas.

Figura 14 - Placa cerâmica indicando falha no espalhamento da argamassa colante sobre o tardo.



Fonte: autora.

CAPÍTULO 3

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 ASPECTOS GERAIS

O presente estudo, de caráter experimental, foi desenvolvido a partir da confecção de corpos de prova prismáticos (4 x 16)cm, onde duas placas cerâmicas foram coladas paralelamente com argamassa colante industrializada, utilizados para avaliação do comportamento sob esforços simultâneos de tração e cisalhamento em modo misto (Mixed Mode Flexure – MMF).

A fim de simular condições reais observadas em campo, foram adotadas as seguintes variáveis:

- Tipo de argamassa colante: AC II e AC III;
- Espessura da argamassa: 2mm, 4mm e 7mm;
- Tamanho da falha de preenchimento da argamassa colante: 0mm (referência), 5mm, 10mm e 20mm.

A Tabela 2 apresenta uma descrição das variáveis analisadas que totalizaram 24 famílias de estudo. Para cada família foram confeccionados 5 corpos de prova, que resultam em 120 amostras ensaiadas.

Para uma melhor compreensão dos resultados, foram também efetuados ensaios de caracterização dos materiais como se segue:

- Placas cerâmicas – Absorção de água e perfilometria;
- Argamassa colante –Tempo em aberto e resistência de aderência.

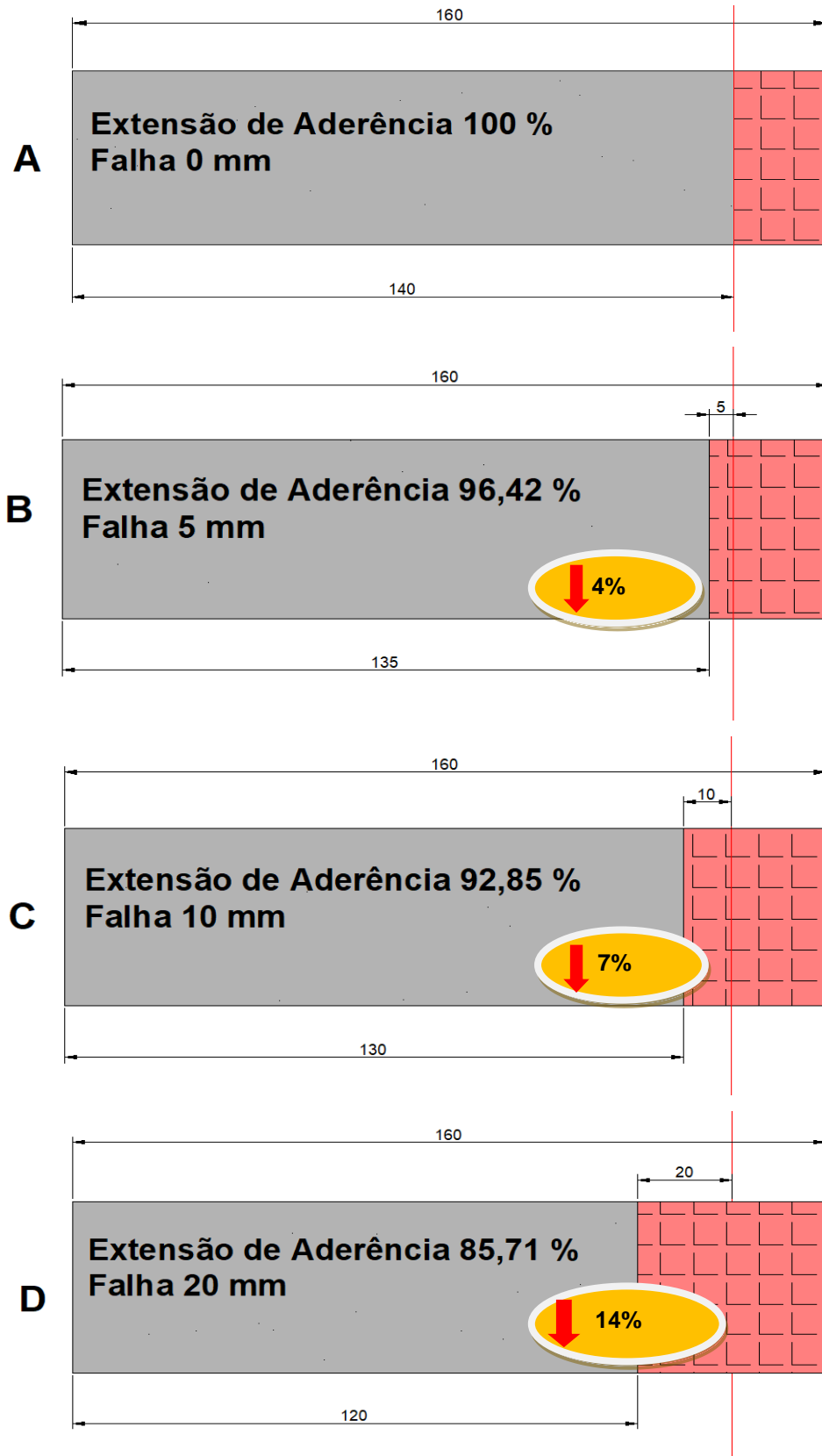
Tabela 2 - Variáveis consideradas no experimento.

Variáveis			Identificação das famílias
Tamanho da falha	Tipo de AC	Espessura da AC	
0 mm (referência)	AC II	2 mm	AC II 2-0
		4 mm	AC II 4-0
		7 mm	AC II 7-0
	AC III	2 mm	AC III 2-0
		4 mm	AC III 4-0
		7 mm	AC III 7-0
5 mm	AC II	2 mm	AC II 2-5
		4 mm	AC II 4-5
		7 mm	AC II 7-5
	AC III	2 mm	AC III 2-5
		4 mm	AC III 4-5
		7 mm	AC III 7-5
10 mm	AC II	2 mm	AC II 2-10
		4 mm	AC II 4-10
		7 mm	AC II 7-10
	AC III	2 mm	AC III 2-10
		4 mm	AC III 4-10
		7 mm	AC III 7-10
20 mm	AC II	2 mm	AC II 2-20
		4 mm	AC II 4-20
		7 mm	AC II 7-20
	AC III	2 mm	AC III 2-20
		4 mm	AC III 4-20
		7 mm	AC III 7-20

Fonte: autora.

No que se refere ao tamanho das falhas, é fundamental destacar que esse problema reflete as falhas tão comumente verificadas na execução de revestimentos cerâmicos, especialmente em fachadas. Por isso, a extensão de aderência das amostras nesta pesquisa apresenta-se de quatro maneiras distintas. A Figura 15 (A) apresenta a condição sem falhas induzidas, a (B) com falha induzida de 5 mm, (C) falha induzida de 10 mm e (D) falha induzida de 20 mm.

Figura 15 - Extensão de aderência nos corpos de prova.



Fonte: autora.

3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

3.2.1 PLACA CERÂMICA

Para avaliação da aderência, a investigação das características do tardo da placa é um item importante. Para o presente estudo foram realizados ensaios para determinação da absorção de água, conforme a NBR 13818 (ABNT, 1997) ANEXO B, e de perfilometria, de acordo com a NBR ISO 4287 (ABNT, 2002).

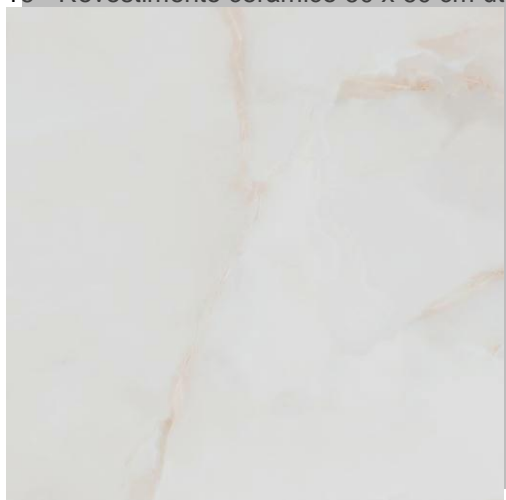
Nesta pesquisa foi utilizado um único tipo de revestimento cerâmico (semi-grés), cuja imagem pode ser vista na Figura 16 e algumas de suas características estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Características do revestimento cerâmico.

Formato	60 x 60 cm
Espessura	8,5 mm
Classe de atrito	I
Classe de absorção de água:	BIlb
Resistência à abrasão:	3

Fonte: Eliane (2017)

Figura 16 - Revestimento cerâmico 60 x 60 cm utilizado.



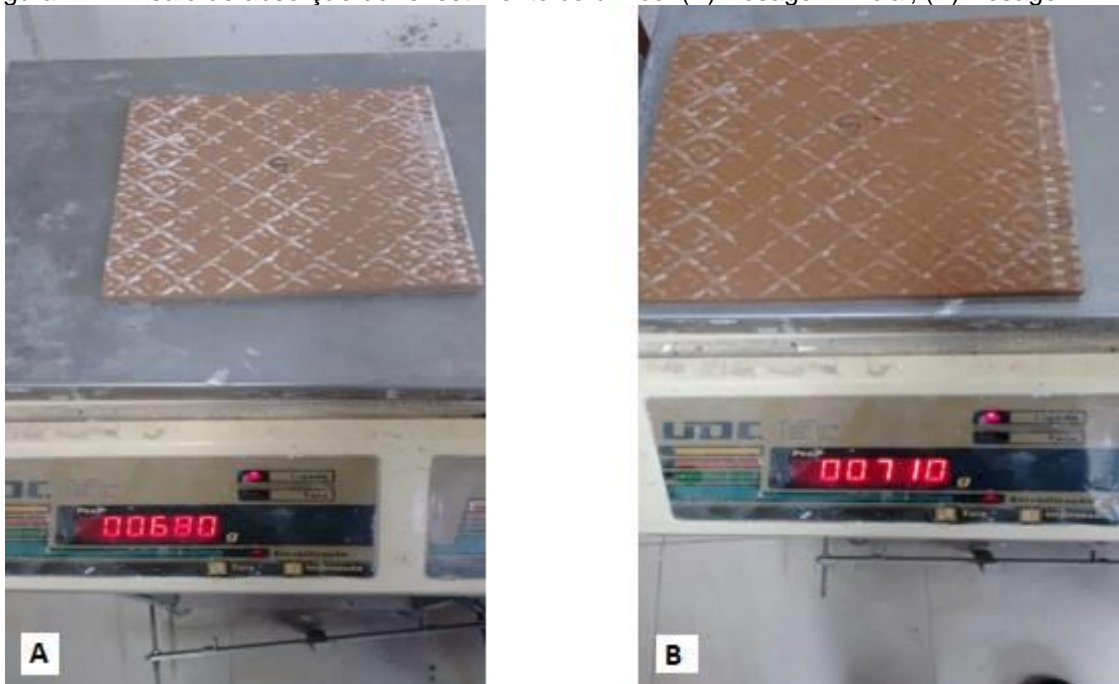
Fonte: Eliane (2017).

3.2.1.1 DETERMINAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ÁGUA

O ensaio de absorção foi realizado conforme as diretrizes da NBR 13818 (ABNT, 1997). Inicialmente as amostras foram secas na estufa à temperatura de $(110 \pm 5)^\circ \text{C}$ até que atingissem massa constante. Em temperatura ambiente, as amostras foram individualmente pesadas para determinação do peso seco. Logo em seguida, todas as amostras foram colocadas em um tanque de água em temperatura ambiente, fornecida pela companhia de abastecimento de água do Estado da Paraíba, onde permaneceram por 24 horas. Após a retirada das placas cerâmicas do tanque de água, cada uma foi enxugada com uma camurça ligeiramente úmida para retirada do excesso de água e finalmente pesadas para verificação do peso após a saturação.

A Figura 17 mostra a pesagem inicial (seca) e final (após saturação em água por 24 horas) de uma das 9 amostras ensaiadas.

Figura 17 - Ensaio de absorção do revestimento cerâmico. (A) Pesagem inicial; (B) Pesagem final.



Fonte: autora.

3.2.1.2 PERFILOMETRIA

Nesta pesquisa foi realizada a perfilometria dos tarдозes do revestimento cerâmico em três condições distintas, sendo elas:

- *Condição 1* - Tardoz limpo (condições de fábrica);
- *Condição 2* - Tardoz com argamassa colante tipo II – Peça fragmentada após a ruptura no ensaio MMF.
- *Condição 3* - Tardoz com argamassa colante tipo III – Peça fragmentada após a ruptura no ensaio MMF.

A Figura 18 mostra um exemplo do fragmento do revestimento cerâmico que foi utilizado nas condições 2 e 3 anteriormente descritas.

Figura 18 - Fragmento cerâmico para ensaio perfilométrico.



Fonte: autora.

Este ensaio foi realizado no Laboratório Integrado de Biomateriais (LABIO) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) e o equipamento utilizado foi perfilômetro óptico 3D modelo Talysurf CCI mostrado na Figura 19.

Figura 19 - Perfilômetro óptico.



Fonte: Talyor Hobson (2017).

O objetivo do ensaio perfilométrico no presente estudo, é trazer dois pontos de vista distintos com relação a forma de ruptura do corpo de prova quando submetido ao ensaio em modo misto.

O primeiro ponto de vista refere-se a uma visão macroscópica de análise. Após atingir o limite de ruptura, a placa cerâmica não suportando mais a carga que lhe está sendo aplicada, quebra e desprende-se da argamassa na qual estava colada. Desta maneira, observa-se que a ruptura se deu de forma predominantemente adesiva, uma vez que, a cerâmica se desprende “limpa”, ou seja, quase não há argamassa colante no tardoz após a finalização do ensaio. Contudo, o ensaio perfilométrico pode mostrar que do ponto de vista microscópico, há uma significativa mudança no perfil do tardoz da cerâmica antes e após o ensaio, indicando que parte da argamassa ficou “presa” nos poros da cerâmica, sendo rompida após o recebimento da carga, evidenciando nesta outra perspectiva, uma adesão coesiva. Com isto, pode-se entender que o estudo de aderência na interface requer um aprofundamento em escala microscópica para melhor entendimento e avanço do tema, por sua vez, neste estudo não serão abordadas análises neste tipo de escala.

3.2.2 ARGAMASSA COLANTE INDUSTRIALIZADA

Neste estudo foram usados dois tipos de argamassa colante industrializada. As informações da Tabela 4 foram retiradas do site oficial do fabricante, que foi o mesmo para as duas argamassas.

Tabela 4 - Indicações de uso de duas argamassas colantes.

AC II	AC III
Indicações	Indicações
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Assentamento de peças em fachadas e áreas externas. ▪ Possui alta adesão, flexibilidade e retenção de água, suportando as influências das intempéries (ação de sol, vento e chuva) e mudanças de temperaturas que os ambientes estão sujeitos. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Porcelanatos convencionais e de grandes formatos, cerâmicas e pastilhas. ▪ Pisos e paredes. ▪ Áreas internas e externas. ▪ Fachadas de áreas residenciais, comerciais e industriais. ▪ Alta adesão e alta performance. ▪ Flexível.

Fonte: PortoKoll (2017).

3.2.2.1 DETERMINAÇÃO DO TEMPO EM ABERTO

Consiste no maior intervalo de tempo no qual uma placa cerâmica pode ser assentada sobre a pasta de argamassa colante nas condições controladas de laboratório segundo a NBR 14081 (ABNT, 2012).

A perda de resistência de aderência das placas assentadas depois de excedido o tempo em aberto é relacionada com a formação de uma película superficial que interfere na adesão inicial da argamassa colante. A formação de “película” na superfície da argamassa colante foi estudada por Póvoas (1999), que mostrou que a película, na verdade, é resultado da dessecação superficial causada pela evaporação e sucção de água da argamassa.

A velocidade de formação dessa película e, conseqüentemente, o tempo em aberto, dependem, dentre outros fatores, da quantidade de água e da quantidade de polímeros adicionados à argamassa colante, além de condições ambientais como velocidade do vento, temperatura, umidade relativa do ar e radiação (PÓVOAS *et al.*, 2005). Um tempo em aberto adequado permite ao assentador trabalhar em condições adversas de obra, incluindo alta temperatura, baixa umidade ou substrato muito porosos. Caso o tempo em aberto seja excedido, a argamassa colante deve ser descartada.

Conforme procedimento descrito na NBR 14081-2 (ABNT, 2012), na execução do ensaio da determinação do tempo em aberto, a aparelhagem utilizada

foi o aderímetro, peças metálicas não deformáveis sob carga de ensaio e massas-padrão de material sólido e rígido ($2,00 \pm 0,01$) kg.

Inicialmente a argamassa colante é estendida no substrato padrão já imprimado, na direção longitudinal, e após 20 minutos dez placas de azulejo branco (absorção de água de 15 ± 3 %) são posicionadas. Logo após a colocação da décima placa cada uma recebe a massa padrão por 30s, conforme Figura 20 e, passados 28 dias, são realizados os ensaios de aderência à tração direta (Figura 21) cujos valores devem resultar superiores a 0,5 MPa, sob pena da argamassa ser considerada reprovada.

Figura 20 - Colocação da massa padrão de material não deformável sobre os azulejos.



Fonte: autora.

Figura 21 - Ensaio de arrancamento.



Fonte: autora.

Os dados dos ensaios de determinação do tempo em aberto são lançados na equação:

$$f_t = T/A \quad (2)$$

Onde:

f_t - tensão de ruptura, arredondada à segunda decimal, expressa em megapascals (MPa);

T - força de ruptura, expressa em newtons (N);

A - área de cada placa cerâmica/porcelanato, expressa em milímetros quadrados (mm^2), considerada igual a 2500 mm^2 .

Em seguida calcula-se a tensão média de ruptura por tração das placas correspondentes a cada série assentada, sem arredondamento, desconsiderando os resultados com rupturas dos tipos S, P e F, ou seja, ruptura do substrato (S), ruptura da placa cerâmica (P) e ruptura por falha na colagem da peça metálica (F).

Para médias iguais e superiores a $0,5 \text{ MPa}$, todos os resultados que se distanciaram 20% da média são descartados. Com os resultados remanescentes, calcula-se a média final que foi arredondada ao décimo mais próximo. É importante

dizer que a média final não pode ser calculada com menos de 5 resultados. Uma vez determinada, esta será a tensão de ruptura do ensaio.

3.2.2.2 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA

No ensaio que determina a resistência de aderência à tração, as argamassas preparadas, analogamente ao ensaio da determinação do tempo em aberto, são estendidas sobre os substratos padrão as argamassas AC II e AC III separadamente e, transcorridos 5 minutos desta operação, dez placas cerâmicas são posicionadas sobre os cordões e carregadas com a massa padrão por 30 s. A cura realizada neste ensaio foi normal, onde o conjunto durante 28 dias foi submetido as condições ambientais de laboratório.

Os ensaios de determinação do tempo em aberto e resistência de aderência à tração direta foram realizados no Laboratório de Ensaios Tecnológicos em Materiais da Construção Civil – LETMACC do SENAI PERNAMBUCO.

3.3 ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE FISSURA

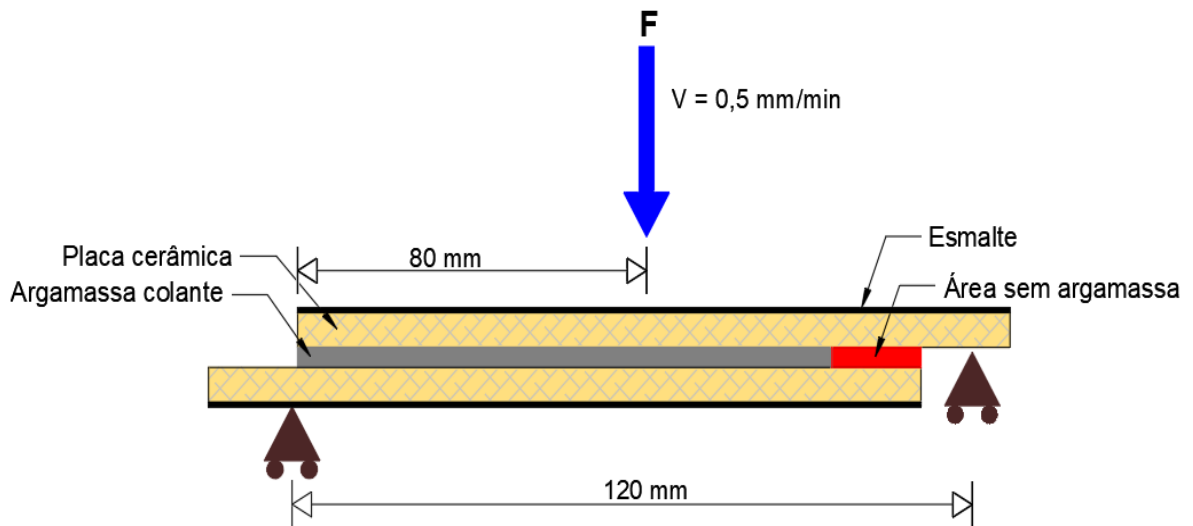
Foi utilizado o ensaio mecânico em modo misto (MMF), conforme revisão da literatura (seção 2.2) para a realização dos ensaios de aderência. O teste está esquematizado na Figura 22 e o ensaio está apresentado na Figura 23.

O ensaio MMF, aplicado a juntas adesivas, baseia-se na aplicação de uma força na metade do vão de um corpo de prova formado por duas placas cerâmicas paralelas colados com um determinado adesivo, onde o substrato superior é mais comprido que o inferior. Desta forma, na extremidade onde se encontra localizada a pré-fenda, o apoio é apenas realizado pelo substrato superior (SOARES, 2015).

A pré-fenda é criada ainda na fase de preparação dos corpos de prova é essencial para uma propagação de fenda mais controlada.

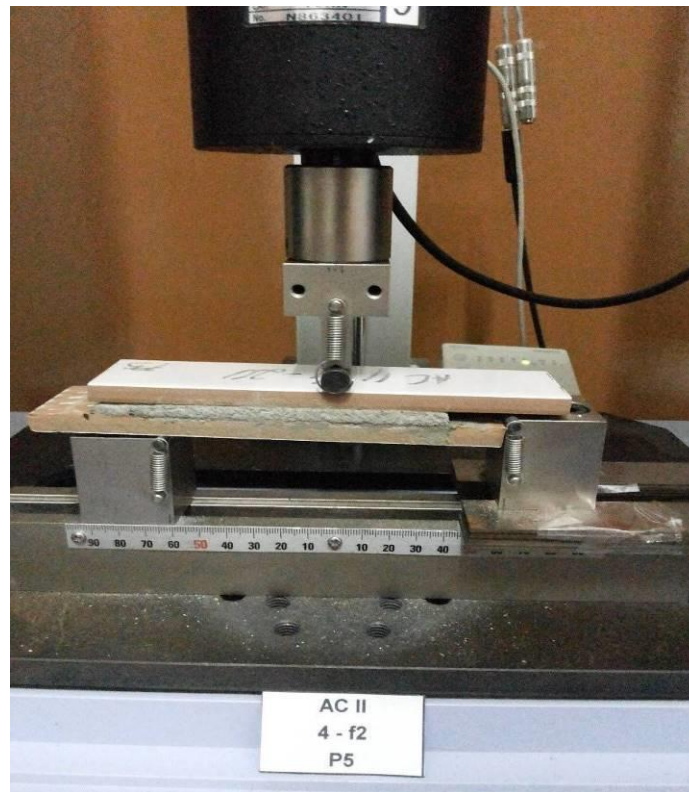
Relativamente à geometria dos corpos de prova associados ao ensaio MMF, esta pode apresentar algumas variações. Pode variar a espessura dos substratos (podendo até mesmo um dos substratos ter espessura superior) e do adesivo, assim como o comprimento e largura dos substratos. Na presente pesquisa por sua vez, as dimensões do substratos eram fixas, variando apenas a espessura do adesivo utilizado (argamassa colante) e o tamanho da falha induzida. Vale salientar também que a geometria deste corpo de prova favorece o aparecimento de tensões de tração diretas à medida que a força é aplicada, mas também proporciona uma tensão cisalhante induzida ao se propagar a fissura na interface entre a placa cerâmica e a argamassa colante.

Figura 22 - Desenho esquemático ensaio MMF.



Fonte: autora.

Figura 23 - Ensaio MMF.



Fonte: autora.

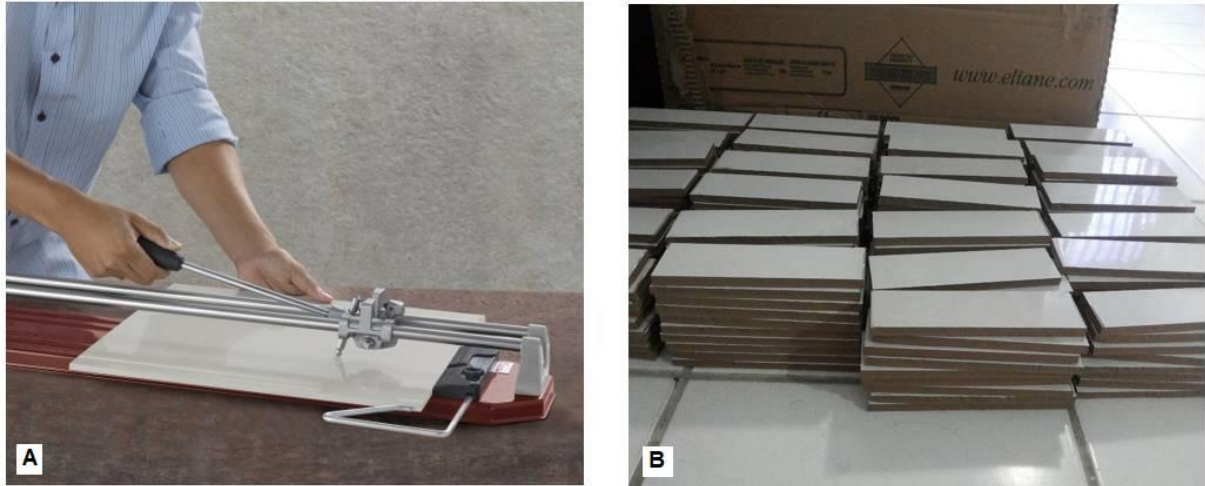
Os ensaios mecânicos de propagação de fissuras em modo misto realizados nesta pesquisa foram conduzidos no laboratório de solidificação rápida da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), através do equipamento de ensaios universais da Shimadzu Servopulser, com velocidade de aplicação de 0,5 mm/s e célula de carga com capacidade máxima de 10 KN.

3.3.1 PRODUÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DO ENSAIO MMF

Para a confecção dos corpos de prova utilizados no ensaio mecânico em modo misto, inicialmente foram feitos os cortes na cerâmica para ajustá-la ao tamanho desejado, uma vez que a cerâmica utilizada nesta pesquisa possuía as dimensões de (60 x 60)cm, e o tamanho desejado da cerâmica para os corpos de prova seriam de (16 x 4)cm. Para isto, utilizou-se o cortador profissional indicado

para cortar pisos cerâmicos de até 10 mm de espessura, mostrado na Figura 24A. As cerâmicas cortadas em pedaços de (16 x 4)cm estão mostradas na Figura 24B.

Figura 24 - (A) Cortador profissional; (B) Cerâmicas cortadas na dimensão desejada.

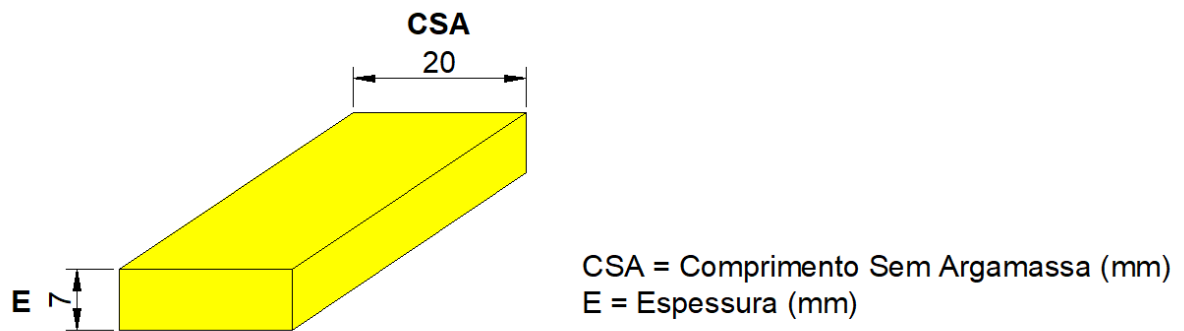


Fonte: (A) Cortag; (B) autora.

Para que a espessura da argamassa no corpo de prova fosse controlada, foram confeccionados espaçadores de material emborrachado EVA (acetato-vinilo de etileno). Estes espaçadores também foram utilizados para delimitar a área que não receberia argamassa. Logo, foram confeccionados nove tipos de espaçadores, tendo, três tipos diferentes de espessura (2, 4 e 7 mm) e três tipos diferentes de largura (5, 10 e 20 mm) que caracterizariam a área que ficaria sem argamassa no corpo de prova. É importante dizer que manter a falha de colagem no início do corpo de prova ao invés de falhas distribuídas ao longo da área de contato (simulando uma condição real), foi uma decisão tomada para que fosse garantida a propagação da primeira fissura pelo método MMF, além de simplificar o sistema, sendo esta uma variável complexa.

A Figura 25 identifica um exemplo de espaçador que têm 7 mm de espessura e 20 mm de largura. Na imagem seguinte (Figura 26) é mostrada a imagem real dos espaçadores produzidos.

Figura 25 - Exemplo de espaçador emborrachado.



Fonte: autora.

Figura 26 - Espaçadores confeccionados.



Fonte: autora.

A argamassa foi produzida manualmente conforme as instruções do fabricante, e a água utilizada na mistura foi a fornecida pela concessionária abastecedora de água do Estado de Pernambuco, sendo utilizados 4,2 e 4,6 litros de água para cada 20 quilos de AC II e AC III respectivamente.

A Figura 27 mostra os acessórios utilizados na produção da pasta.

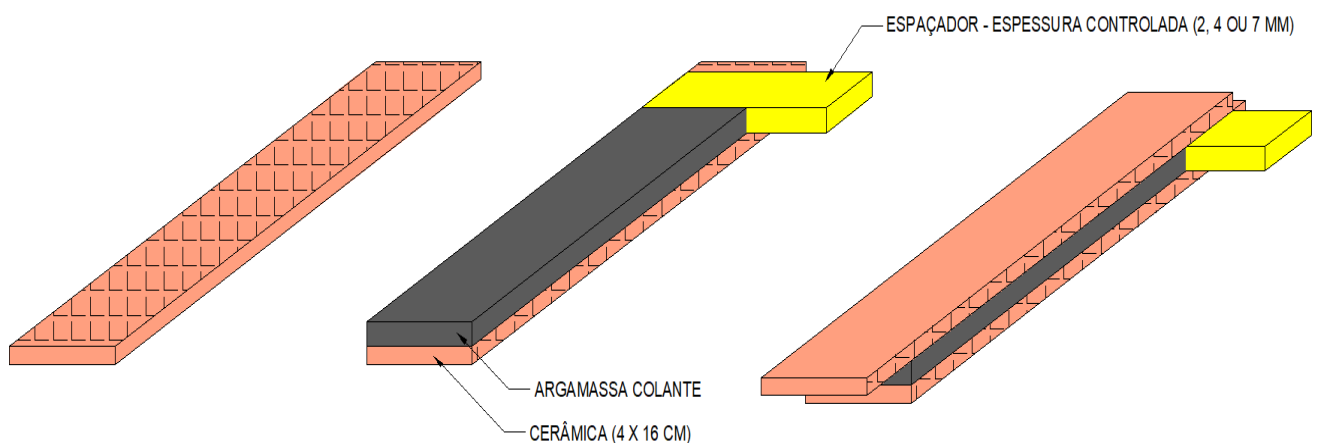
Figura 27 - Produção da pasta de argamassa.



Fonte: autora.

A Figura 28 mostra um desenho esquemático de como os espaçadores foram posicionados nos corpos de prova de modo a obter-se a configuração desejada, respeitando-se a espessura do colchão de argamassa e área onde desejava-se que não houvesse material adesivo.

Figura 28 - Esquema dos corpos de prova produzidos.



Fonte: autora.

A identificação de cada corpo de prova foi feita na face superior da cerâmica seguindo-se a seguinte nomenclatura (Quadro 1):

Quadro 1 - Nomenclatura de identificação dos corpos de prova.

ACT E-F Px

Fonte: autora.

Sendo:

AC: Argamassa Colante;

T: Tipo de argamassa utilizada (II ou III);

E: Espessura da argamassa;

F: Tamanho da falha de contato;

P x: Número do corpo de prova.

A Figura 29 mostra os 120 corpos de prova que foram confeccionados, os quais foram curados por 28 dias em regime de cura normal (condições de laboratório, com temperatura média de 22°C e umidade relativa de 90%).

Figura 29 - Corpos de prova do ensaio MMF.



Fonte: autora.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esse capítulo apresenta os resultados obtidos nos experimentos de laboratório e as suas discussões mais importantes.

4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1 PLACA CERÂMICA

4.1.1.1 ENSAIO DE ABSORÇÃO

A Tabela 5 mostra os resultados do ensaio de absorção do revestimento cerâmico utilizado nesta pesquisa, realizado no laboratório de materiais de construção civil da Universidade Federal da Paraíba, apresentando uma absorção média de 3,5%, calculada a partir da média aritmética dos valores encontrados nas nove amostras ensaiadas. A NBR 13818 (ABNT, 1997) classifica os revestimentos cerâmicos, de acordo com a sua absorção de água, em cinco grupos distintos (Tabela 6). Quanto ao método de fabricação, são três grupos principais (Tabela 7). Deste modo, verifica-se que a placa cerâmica utilizada no presente estudo, classifica-se como BIIa.

Tabela 5 - Resultados ensaio de absorção.

Peça (20x20 cm)	Peso Seco (g)	Peso Saturado (g)	ABS (%)
01	685	710	3,6%
02	675	705	4,4%
03	665	685	3,0%
04	685	705	2,9%
05	680	710	4,4%
06	670	705	5,2%
07	630	645	2,3%
08	625	645	3,2%
09	630	650	3,1%
MÉDIA ABS:			3,5%

Fonte: autora.

Tabela 6 - Grupos de absorção de água.

Grupos	Absorção de água (%)	Produto
la	$0 < \text{Abs} \leq 0,5$	Porcelanato
lb	$0,5 < \text{Abs} \leq 3,0$	Grês
IIa	$3,0 < \text{Abs} \leq 6,0$	Semi - Grês
IIb	$6,0 < \text{Abs} \leq 10,0$	Semi - Poroso
III	Abs acima de 10,0	Poroso

Fonte: adaptado NBR 13818 (ABNT, 1997).

Tabela 7 - Classificação das cerâmicas pelo método de fabricação.

Grupo	Método de Fabricação
A	Extrudadas
B	Prensadas
C	Outros

Fonte: adaptado NBR 13818 (ABNT, 1997).

4.1.1.2 PERFILOMETRIA

Classificação das cerâmicas pelo método de fabricação.

A Tabela 8 apresenta os resultados da rugosidade média (Ra) do tardo do revestimento cerâmico nas três condições estabelecidas:

- Condição 1: placa cerâmica sem argamassa;
- Condição 2: placa cerâmica com AC II;
- Condição 3: placa cerâmica com AC III.

As leituras do perfil foram feitas em três direções distintas: horizontal, vertical e diagonal.

Tabela 8 - Resultados do ensaio perfilométrico da placa cerâmica.

	Condição 1	Condição 2			Condição 3		
	Referência	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Leitura Horizontal	3,900	1,990	1,410	1,550	0,655	1,320	1,160
	6,430	2,260	0,745	1,940	0,891	0,735	0,962
	3,990	1,890	1,020	1,220	0,844	0,842	0,996
Média	4,773	1,558			0,934		
Leitura Vertical	6,790	1,960	1,650	2,020	0,686	0,992	1,100
	5,160	1,880	1,580	1,130	0,781	1,090	0,651
	5,120	1,630	1,080	1,630	0,590	0,770	0,944
Média	5,690	1,618			0,845		
Leitura Diagonal	3,730	2,220	1,450	1,220	0,794	1,010	0,787
	4,580	1,870	1,050	1,180	0,814	1,010	0,970
Média	4,155	1,498			0,898		
Média Geral (μm)	4,873	1,558			0,892		

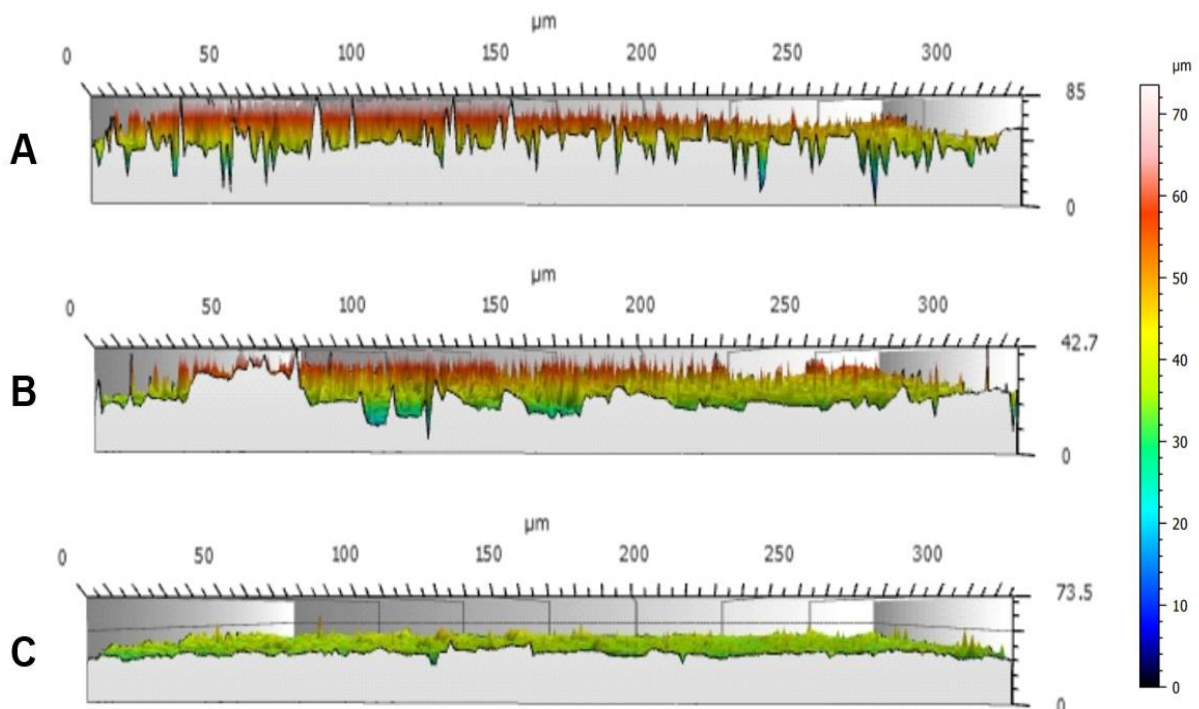
Fonte: autora.

Para a realização do teste foram selecionadas peças cerâmicas cuja ruptura do ensaio mecânico em modo misto ocorreu na interface tardo - argamassa colante, com o intuito de verificar o grau de preenchimento dos poros, o que denota ancoragem física (ou mecânica). Os resultados obtidos apontaram maior rugosidade superficial média para o caso das placas sem argamassa (Figura 30), como era esperado pelo seu método fabril.

Cabe destacar que o valor médio encontrado do parâmetro Ra (4,87 μm) se mostrou compatível com os dados obtidos na pesquisa de Parras *et al.* (2006) onde foi encontrado o valor de Ra de 6,47 μm para cerâmicas prensadas. É importante dizer que o valor de rugosidade média encontrado por Parras *et al.* (2006) foi superior, ou seja, a cerâmica era ainda mais rugosa, visto que esta ainda não havia passado pelo processo de queima, ao contrário da cerâmica utilizada na presente pesquisa.

Comparando as amostras impregnadas com argamassa, observa-se menor valor de rugosidade superficial (Ra = 0,892 μm) para a condição 3, com AC III, do que na condição 2, com AC II (Ra = 1,558 μm), o que pode indicar uma melhor eficiência no intertravamento das argamassas tipo AC III, que reflete também na maior resistência de aderência encontrada com esse material.

Figura 30 - Perfil revestimento cerâmico (A) Condição 1; (B) Condição 2; (C) Condição 3.



Fonte: autora.

4.1.2 ARGAMASSA COLANTE

Conforme anteriormente comentado, para caracterização das argamassas colantes foi realizado ensaio em laboratório, como descrito pela NBR 14081 (ABNT, 2012). Os valores encontrados devem atender ao estabelecido no Quadro 2.

Quadro 2 - Requisitos para argamassas colantes - critérios fundamentais.

Requisito		Método de Ensaio	Unidade	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	Cura Normal	ABNT NBR 14081-4	MPa	≥ 0,5	≥ 0,5	≥ 1,0
	Cura Submersa		MPa	≥ 0,5	≥ 0,5	≥ 1,0
	Cura em Estufa		MPa	-	≥ 0,5	≥ 1,0

Fonte: NBR 14081 (ABNT, 2012).

4.1.2.1 TEMPO EM ABERTO

Na Tabela 9 se pode verificar os resultados da resistência de aderência à tração com tempo em aberto com argamassa colante tipo II com ensaio de laboratório executado conforme a NBR 14081 (ABNT, 2012). Das dez amostras ensaiadas, duas foram descartadas pois se desviaram mais do que 20% da média global do ensaio. O resultado mostrou que a argamassa apresentou desempenho satisfatório com relação ao tempo em aberto, superando os valores estabelecidos na referida norma. Os modos de ruptura ocorreram entre as interfaces substrato-argamassa e argamassa-placa cerâmica.

Tabela 9 - Resultados AC II - Tempo em aberto.

1ª Determinação da Resistência de Aderência à Tração - Tempo em Aberto								
Placa	Carga (N)	Mpa	S	S/A	A	A/P	P	F
1	2721,60	1,09	0	10	0	90	0	0
2	2589,74	1,04	0	0	0	100	0	0
3	2423,55	0,97	0	10	0	90	0	0
4	2258,04	0,90	0	60	0	40	0	0
5	1994,33	0,80	0	80	0	20	0	0
6	1786,24	0,71	0	80	0	20	0	0
7	2250,49	0,90	0	80	0	20	0	0
8	2115,20	0,85	0	70	0	30	0	0
9	2190,05	0,88	0	10	0	90	0	0
10	2139,23	0,86	0	10	0	90	0	0
Média Final:		0,9	U95±	0,39	Resultados excluídos da média final			
Dados da Aplicação: 09/11/2017			Data da Ruptura: 07/11/2017					
Vel.Vento(m/s): 0			Temperatura(°C): 21,5			Umidade(%): 61,8		

Tempo em Aberto: **≥ 20 min**

Fonte: autora.

Os resultados de tempo em aberto referentes à argamassa colante tipo III estão expostos na Tabela 10 e mostram que a argamassa ensaiada também atendeu aos critérios de desempenho mínimos estipulados pela norma brasileira. As rupturas aconteceram predominantemente na região argamassa-placa, mas também aconteceu na interface substrato-argamassa. Apenas um resultado foi descartado do cálculo da média final.

Tabela 10 - Resultados ACIII - Tempo em aberto.

1ª Determinação da Resistência de Aderência à Tração - Tempo em Aberto								
Placa	Carga (N)	Mpa	S	S/A	A	A/P	P	F
1	2203,79	0,88	0	0	0	100	0	0
2	2958,53	1,18	0	0	0	100	0	0
3	2936,55	1,17	0	0	0	100	0	0
4	2819,12	1,13	0	10	0	90	0	0
5	2142,67	0,86	0	70	0	30	0	0
6	2218,90	0,89	0	70	0	30	0	0
7	2950,97	1,18	0	0	0	100	0	0
8	2922,13	1,17	0	0	0	100	0	0
9	2797,83	1,12	0	0	0	100	0	0
10	2067,12	0,83	0	0	0	100	0	0
Média Final:		1,1	U95±	0,43	Resultados excluídos da média final			
Dados da Aplicação: 09/10/2017			Data da Ruptura: 07/11/2017					
Vel.Vento(m/s): 0			Temperatura(°C): 21,0			Umidade(%): 61,8		

Tempo em Aberto: ≥ 20 min

Fonte: autora.

Os resultados das argamassas AC II e AC III utilizadas nesta pesquisa mostraram que ambas as argamassas apresentaram resultados satisfatórios, com tempo em aberto superior a 20 minutos, sendo a resistência de aderência à tração maior que 0,5 MPa. Observou-se, também, que o resultado do ensaio realizado com a argamassa AC III obteve valor de resistência de aderência à tração superior ao ensaio realizado com a argamassa AC II, como já era esperado.

4.1.2.2 RESISTÊNCIA DE ADERÊNCIA À TRAÇÃO

A Tabela 11 apresenta os resultados de resistência de aderência à tração sob regime de cura normal aos 28 obtidos para a argamassa AC II. Todas as rupturas deste ensaio aconteceram na interface argamassa-placa.

Tabela 11 - Resultados AC II - Resistência de aderência à tração direta.

1ª Determinação da Resistência de Aderência à tração - Cura Normal								
Placa	Carga (N)	Mpa	S	S/A	A	A/P	P	F
1	2578,07	1,03	0	0	0	100	0	0
2	2187,99	0,88	0	0	0	100	0	0
3	2421,49	0,97	0	0	0	100	0	0
4	1998,45	0,80	0	0	0	100	0	0
5	2407,75	0,96	0	0	0	100	0	0
6	2150,22	0,86	0	0	0	100	0	0
7	2370,67	0,95	0	0	0	100	0	0
8	1843,93	0,74	0	0	0	100	0	0
9	2668,03	1,07	0	0	0	100	0	0
10	2882,30	1,15	0	0	0	100	0	0
Média Final:		0,9	U95±	0,24			Resultados excluídos da média final	
Dados da Aplicação: 09/10/2017			Data da Ruptura: 07/11/2017					
Vel.Vento(m/s): 0			Temperatura(°C): 21,8			Umidade(%): 61,5		

Fonte: autora.

A argamassa colante AC III atingiu média global superior a 1 MPa (mínimo estabelecido pela NBR 14081 (ABNT, 2012), com 100% das rupturas na interface argamassa-placa, como mostra a Tabela 12.

Tabela 12 - Resultados AC III - Resistência de aderência à tração direta.

1ª Determinação da Resistência de Aderência à tração - Cura Normal								
Placa	Carga (N)	Mpa	S	S/A	A	A/P	P	F
1	2939,99	1,18	0	0	0	100	0	0
2	2637,13	1,05	0	0	0	100	0	0
3	3350,66	1,34	0	0	0	100	0	0
4	3044,37	1,22	0	0	0	100	0	0
5	3251,08	1,30	0	0	0	100	0	0
6	3258,64	1,30	0	0	0	100	0	0
7	2775,85	1,11	0	0	0	100	0	0
8	2874,74	1,15	0	0	0	100	0	0
9	3500,38	1,40	0	0	0	100	0	0
10	3196,14	1,28	0	0	0	100	0	0
Média Final:		1,2	U95±	0,23			Resultados excluídos da média final	
Dados da Aplicação: 09/10/2017			Data da Ruptura: 07/11/2017					
Vel.Vento(m/s): 0			Temperatura(°C): 21,0			Umidade(%): 61,8		

Fonte: autora.

Assim como no ensaio de tempo em aberto, os valores das resistências de aderência à tração foram maiores na argamassa AC III, confirmando que a aderência mecânica e química desta tende a ser maior do que na argamassa AC II.

4.2 ENSAIO MECÂNICO DE PROPAGAÇÃO DAS FISSURAS EM MODO MISTO (MMF)

Para uma melhor compreensão dos resultados que serão mostrados a seguir, um gráfico modelo (Gráfico 2) será usado para exemplificar cada estágio da curva, sendo:






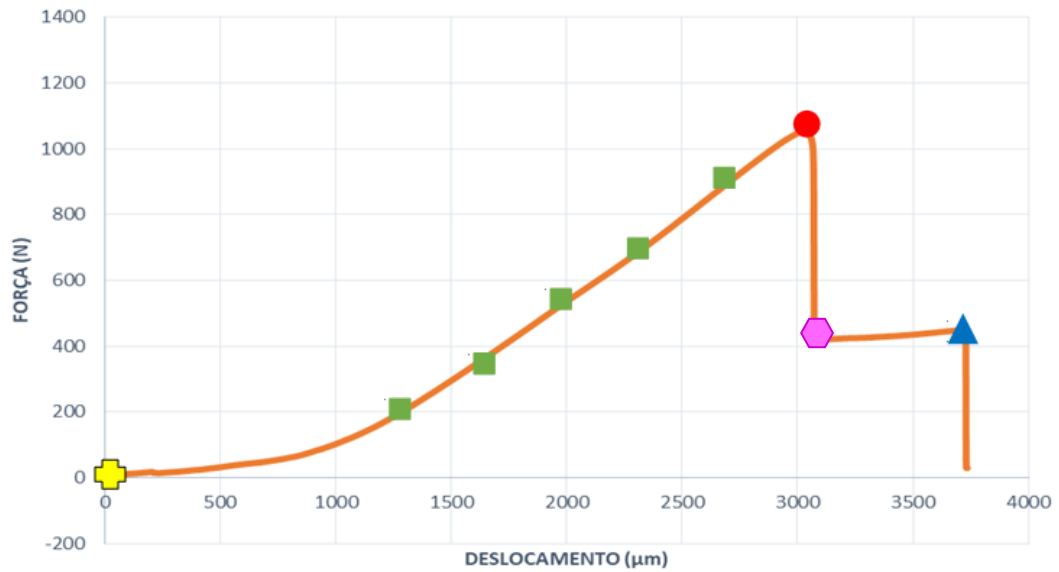
-  Estágio inicial em que a célula de carga da máquina progressivamente começa a imprimir uma força sobre o corpo de prova;
-  Região que mostra o aumento da força aplicada e o deslocamento do corpo de prova acompanhando o sentido da força;
-  Estágio em que a ligação entre a argamassa e o revestimento cerâmico é rompida, propagando a macro fissura que faz cair bruscamente a força aplicada. Esse valor indica a maior capacidade mecânica do sistema, quando solicitado por esforços simultâneos de tração e cisalhamento.
-  Momento em que se inicia a transferência de carga para a placa cerâmica.
-  Colapso da placa cerâmica (final do ensaio).

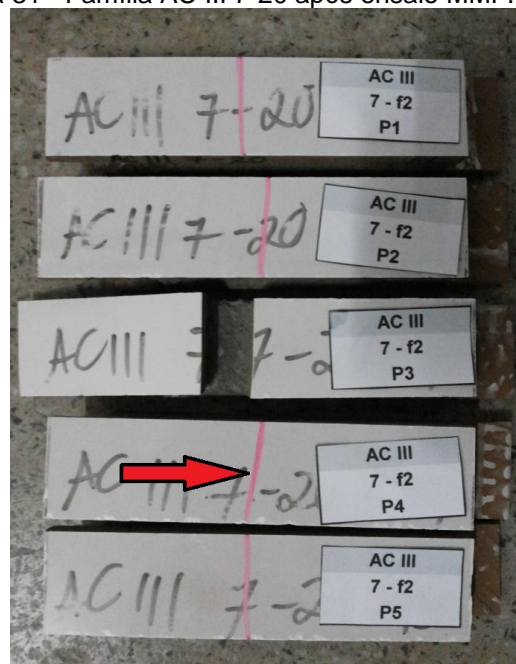
Gráfico 2 - Estágios da curva de propagação da fissura.



Fonte: autora.

É importante dizer que mesmo no estágio representado pelo triângulo azul, a placa cerâmica ainda se mantém ligada à argamassa colante, com exceção de alguns corpos de prova onde se consegue verificar o deslocamento de uma das partes fraturadas como mostrado na figura x. A linha rosa identificada na imagem foi desenhada de modo a ressaltar o local onde se verificou a quebra da placa cerâmica.

Figura 31 - Família AC III 7-20 após ensaio MMF.



Fonte: autora.

Para um melhor entendimento dos dados encontrados no experimento, nesse tópico serão apresentados, em cada página, o gráfico das curvas mais representativas de cada família em função do deslocamento obtido no ensaio mecânico em modo misto (MMF), acompanhado pelo gráfico indicativo das cargas de ruptura com os quatro tipos de extensões de falha.

4.2.1 INFLUÊNCIA DA EXTENSÃO DE FALHA

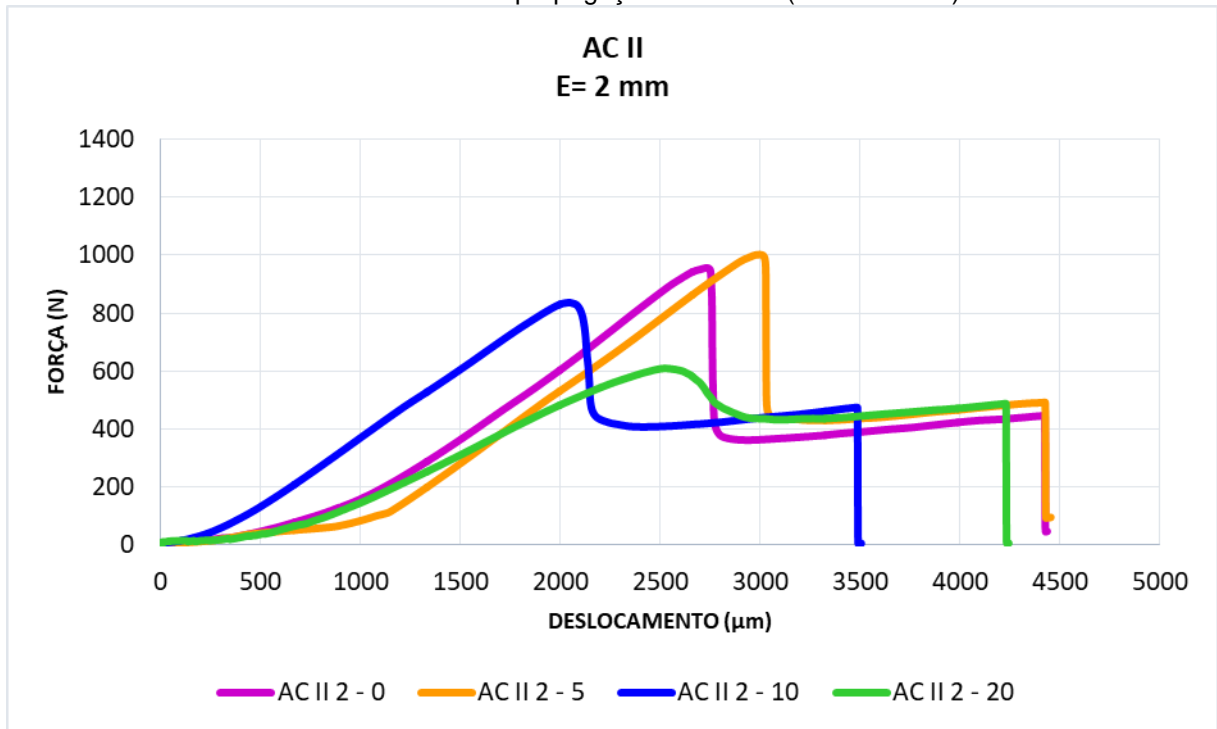
De uma maneira geral, percebe-se que os maiores valores de carga máxima são verificados nas amostras sem falhas, seguido daquelas com 5mm, 10mm, 20mm, nessa ordem. Tal comportamento evidencia a influência da extensão de contato da argamassa na aderência, como se esperava. Interessante notar, contudo, que as diferenças se tornam mais expressivas a partir de falhas com 10mm, que correspondem a uma perda de contato de 7,15%.

Outro aspecto interessante verificado são os maiores valores de carga encontrados com a AC III, em comparação com a AC II, o que será objeto de discussão no item 4.2.2.

Os resultados podem ser observados nos Gráficos 3 a 14.

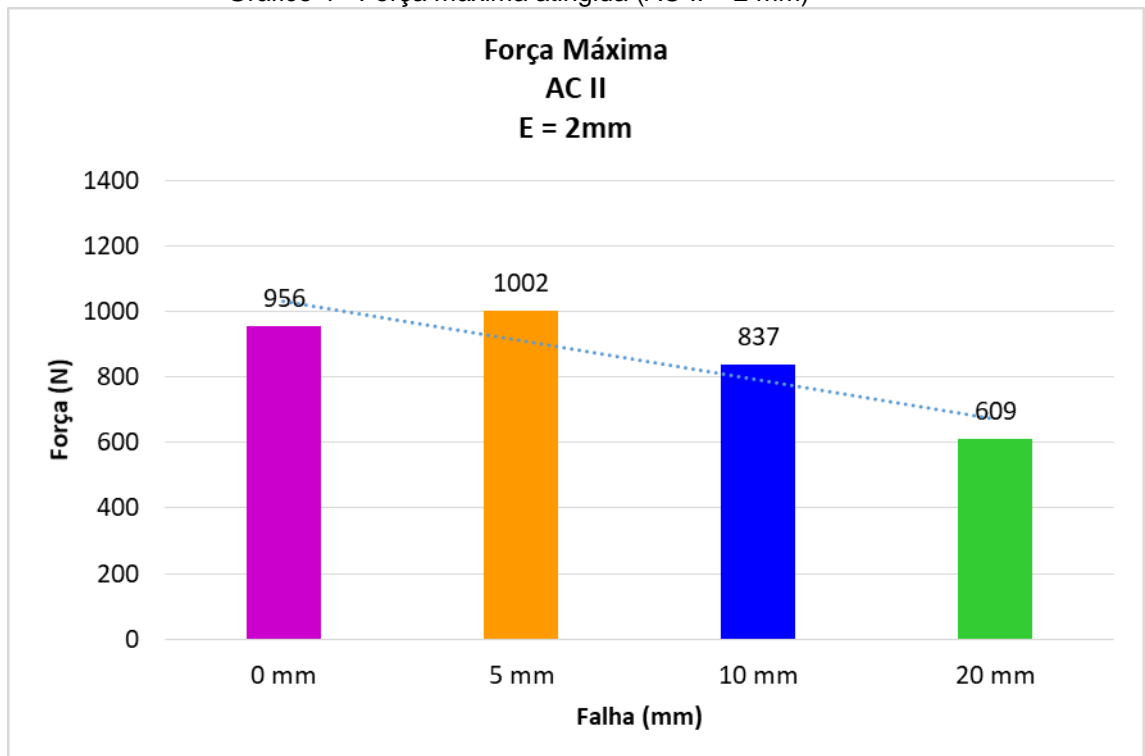
4.2.1.1 ACII – ESPESSURA 2 mm

Gráfico 3 - Curvas de propagação da fissura (AC II – 2 mm).



Fonte: autora.

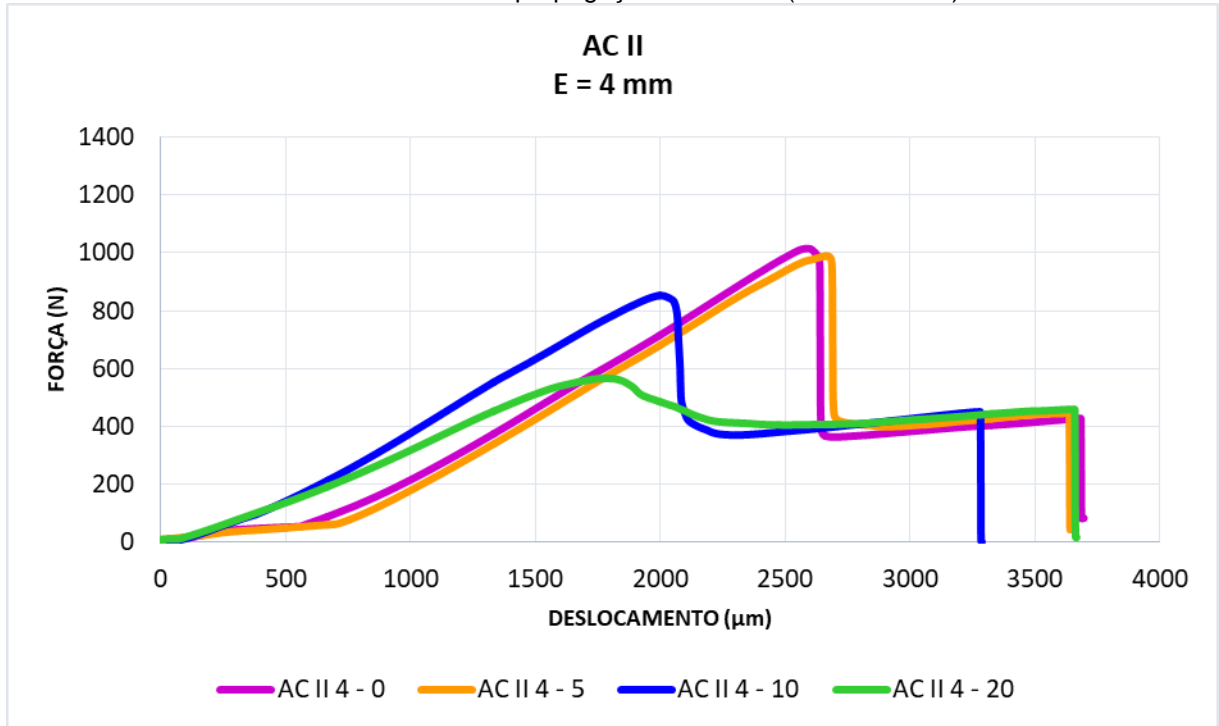
Gráfico 4 - Força máxima atingida (AC II – 2 mm)



Fonte: autora.

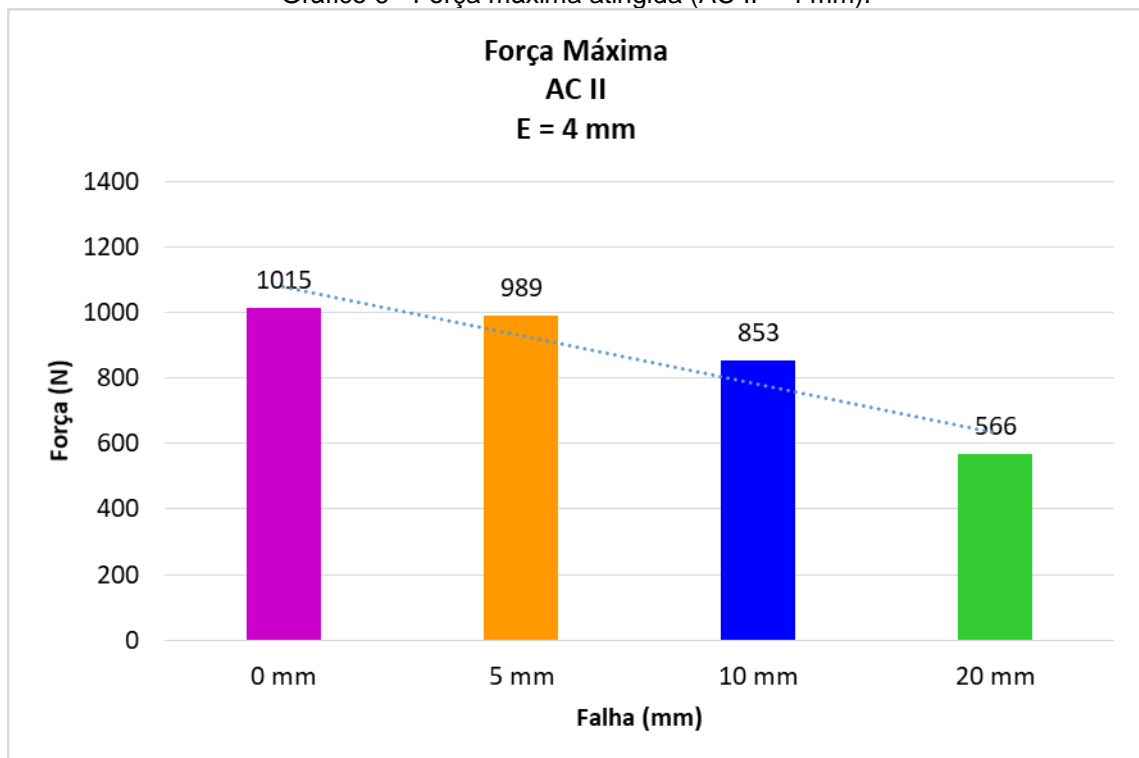
4.2.1.2 ACII – ESPESSURA 4 mm

Gráfico 5 - Curvas de propagação da fissura (AC II – 4 mm).



Fonte: autora.

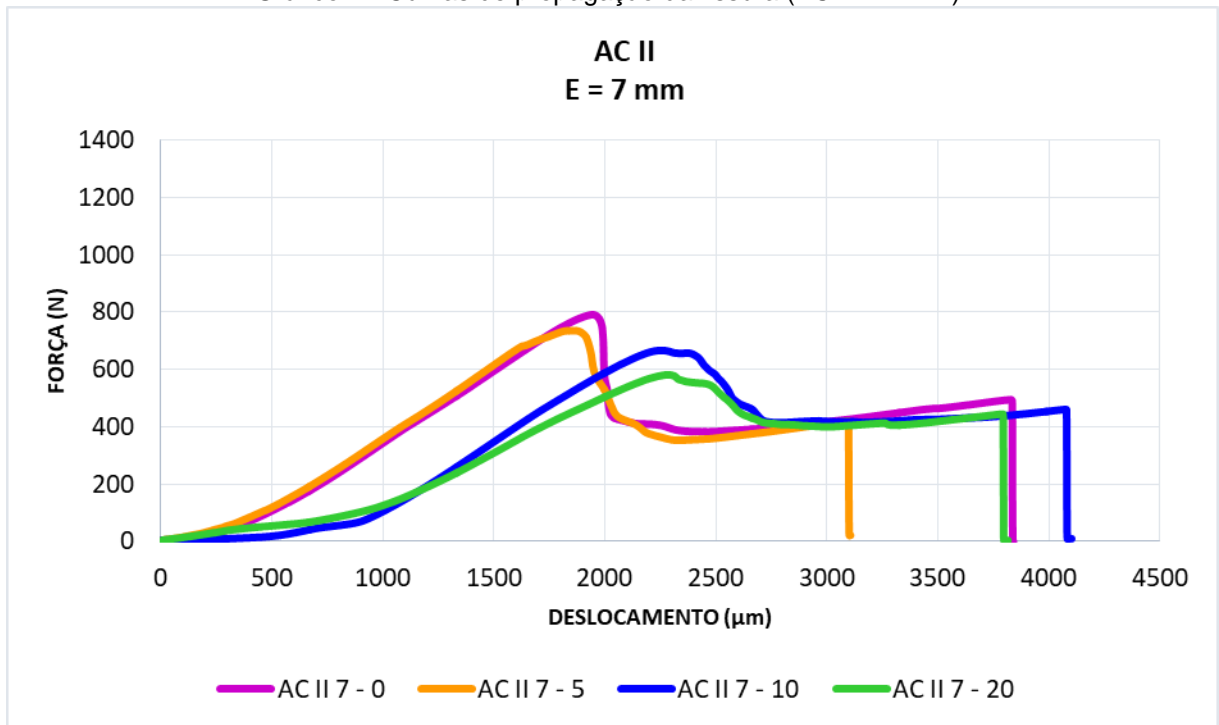
Gráfico 6 - Força máxima atingida (AC II – 4 mm).



Fonte: autora.

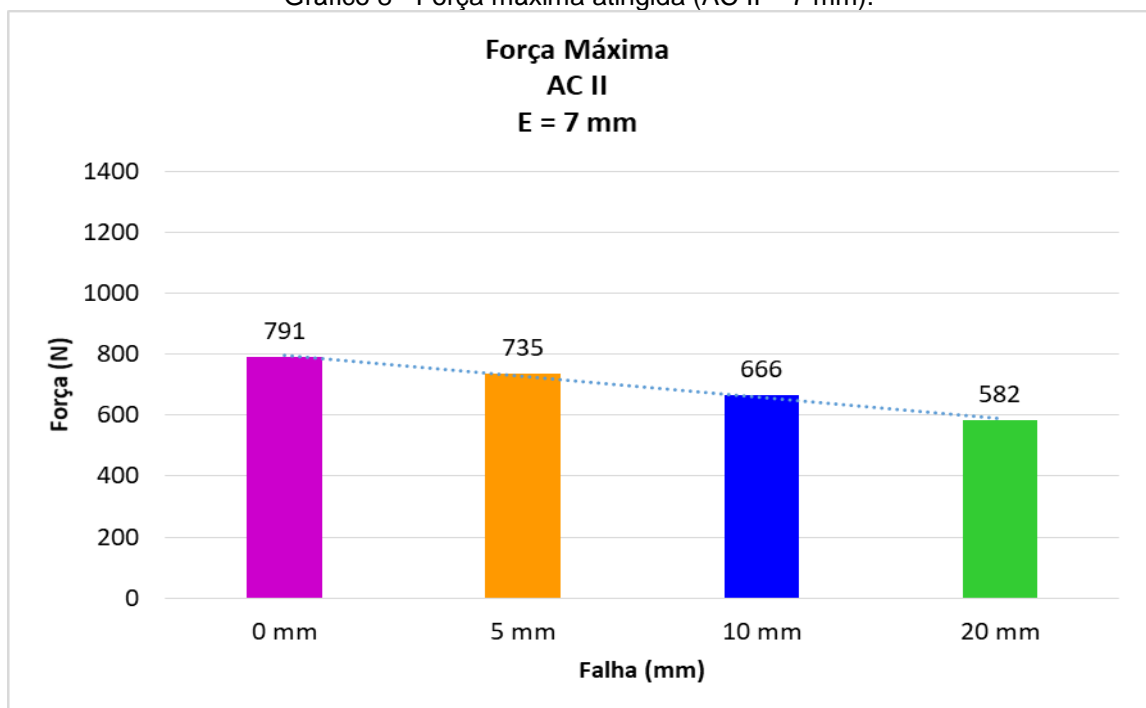
4.2.1.3 ACII – ESPESSURA 7 mm

Gráfico 7 - Curvas de propagação da fissura (AC II – 7 mm).



Fonte: autora.

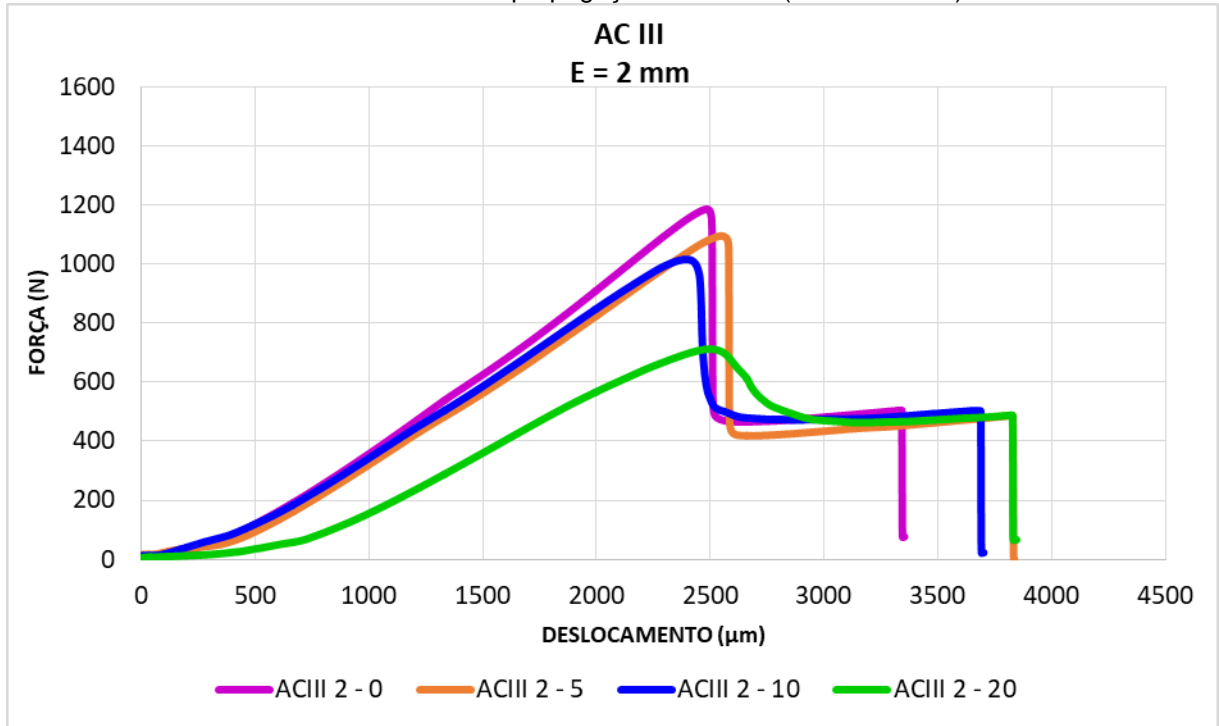
Gráfico 8 - Força máxima atingida (AC II – 7 mm).



Fonte: autora.

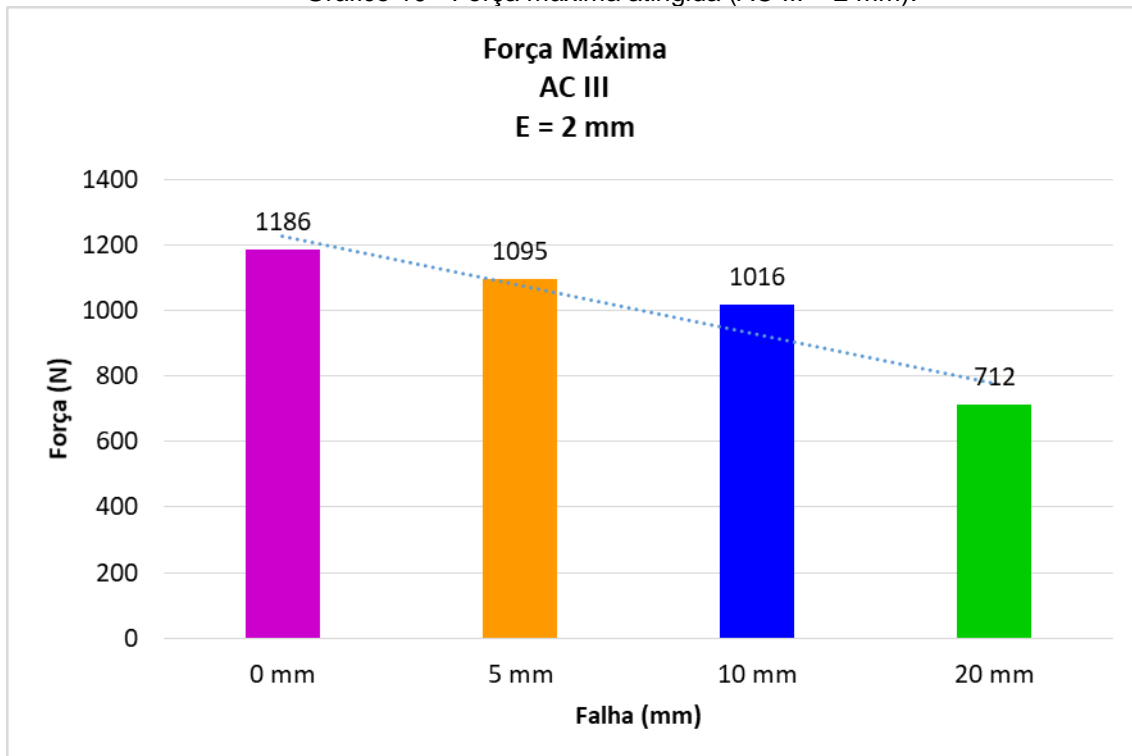
4.2.1.4 ACIII – ESPESSURA 2 mm

Gráfico 9 - Curvas de propagação da fissura (AC III – 2 mm).



Fonte: autora.

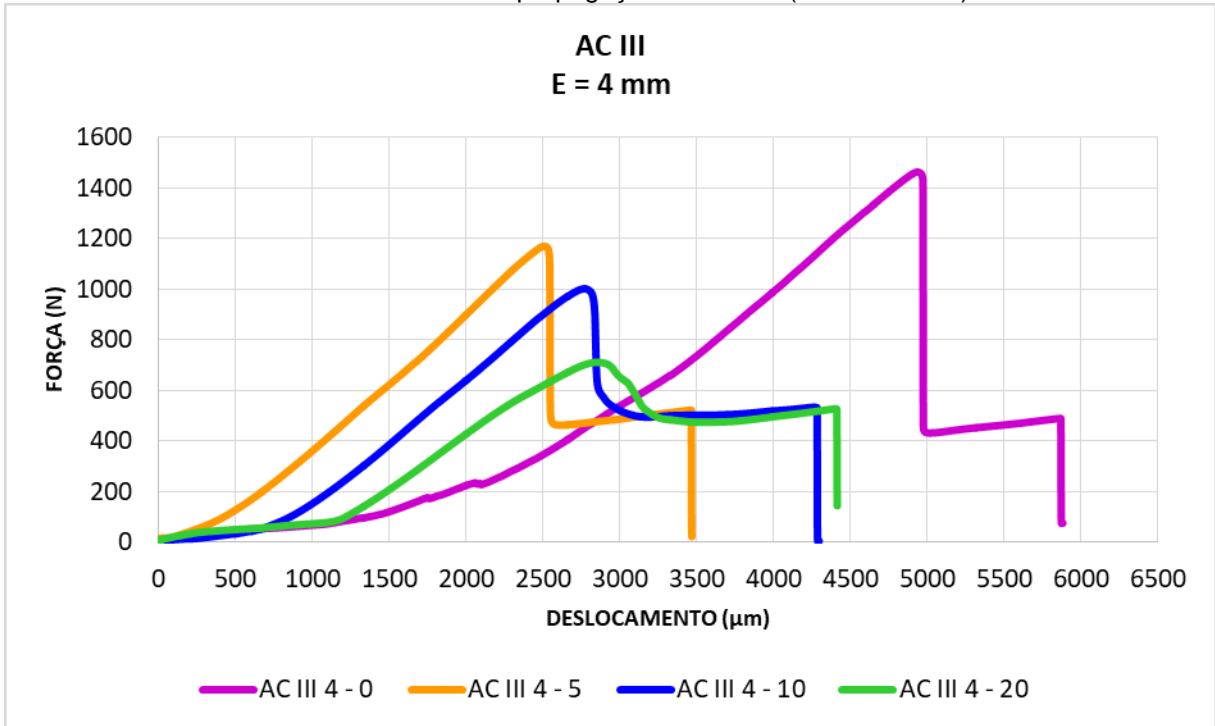
Gráfico 10 - Força máxima atingida (AC III – 2 mm).



Fonte: autora.

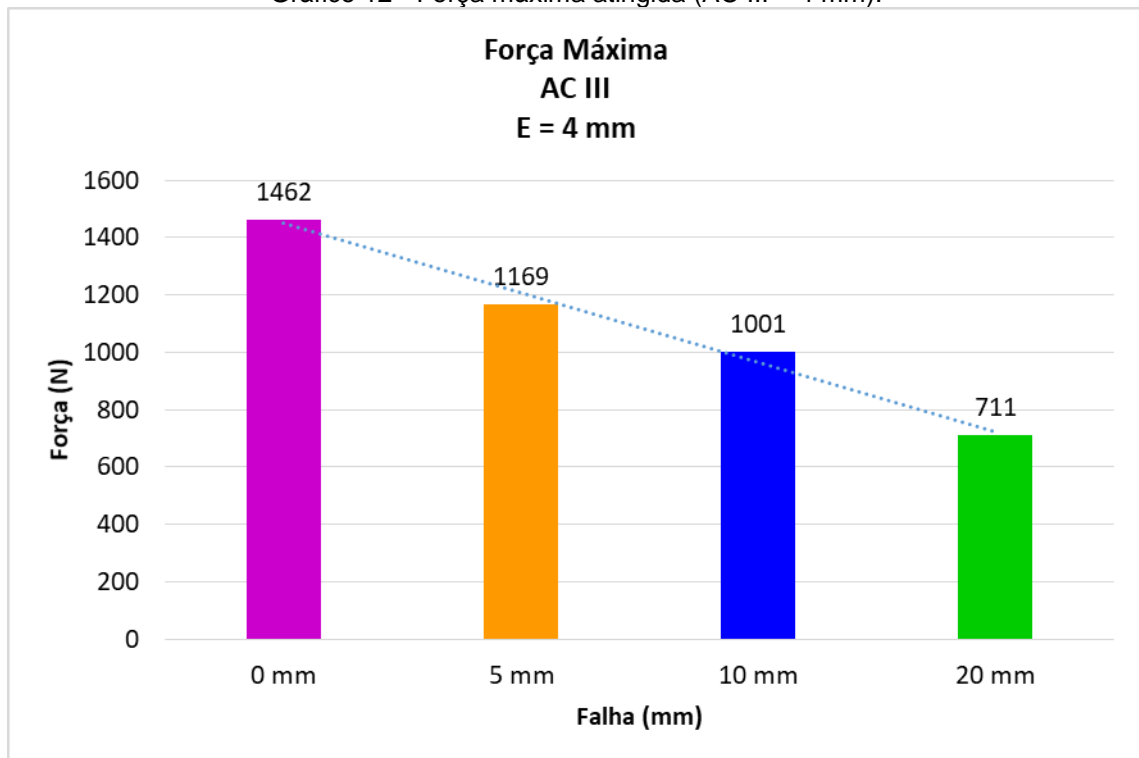
4.2.1.5 ACIII – ESPESSURA 4 mm

Gráfico 11 - Curvas de propagação da fissura (AC III – 4 mm).



Fonte: autora.

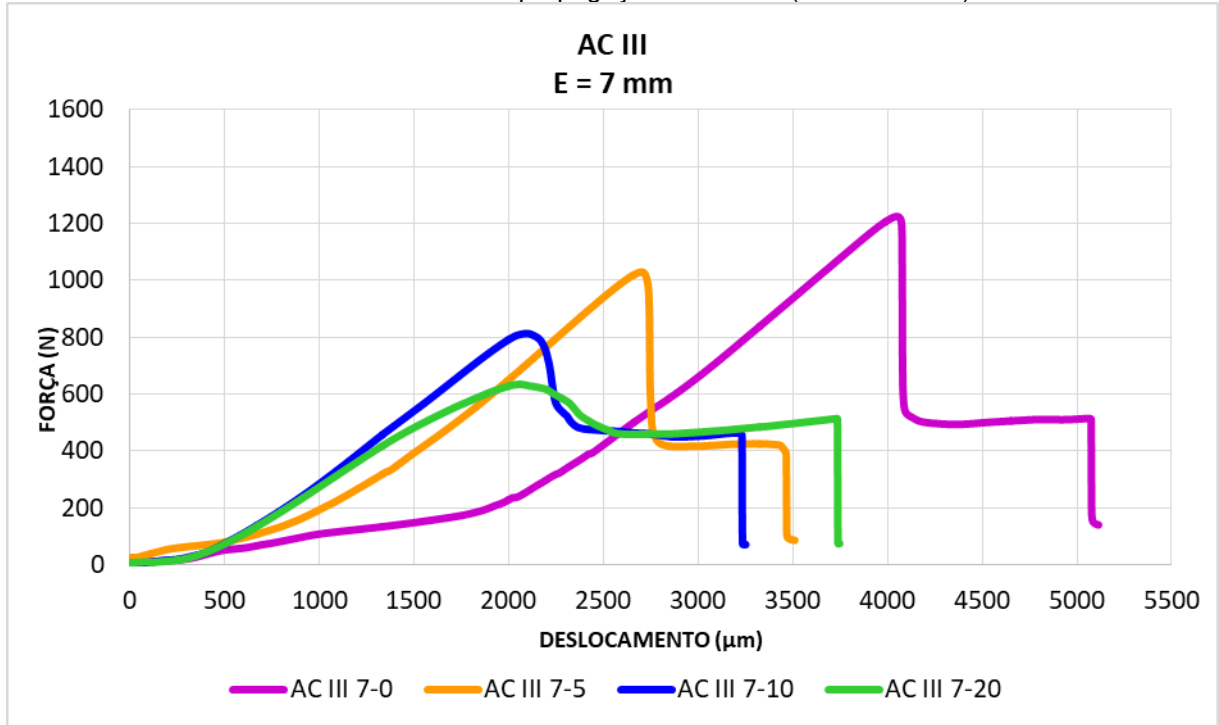
Gráfico 12 - Força máxima atingida (AC III – 4 mm).



Fonte: autora.

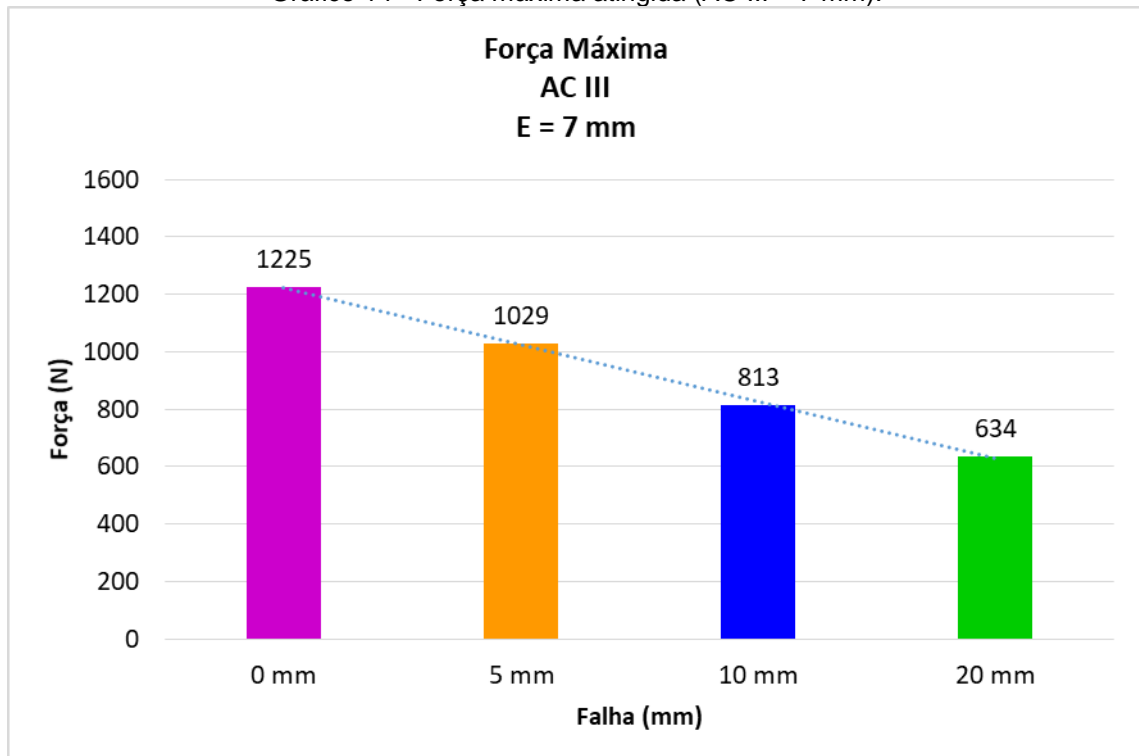
4.2.1.6 ACIII – ESPESSURA 7 mm

Gráfico 13 - Curvas de propagação da fissura (AC III – 7 mm).



Fonte: autora.

Gráfico 14 - Força máxima atingida (AC III – 7 mm).



Fonte: autora.

A Tabela 13 e a Tabela 14 mostram os percentuais de aumento ou diminuição da resistência de aderência para cada extensão de aderência analisada. Na primeira tabela observa-se que a resistência de aderência diminuiu até 44,2% quando diminuiu-se 14,29% da área de contato da argamassa com a cerâmica, em outras palavras, quando induziu-se uma falha de 20 mm.

Nos corpos de prova confeccionados com argamassa AC III, a redução da aderência foi ainda mais brusca, atingindo valores de até 51,4%. Em todos os casos, a maior redução da aderência entre a argamassa colante e a cerâmica se deu quando a falha induzida foi maior, neste caso 20 mm.

Tabela 13 - AC II Aumento ou diminuição da resistência em função da extensão de aderência.

AC II							
Falha	Perda de Área	E = 2 mm		E = 4 mm		E = 7 mm	
		R (N)	% aumento/diminuição da resistência	R (N)	% aumento/diminuição da resistência	R (N)	% aumento/diminuição da resistência
0 mm	0	956,10	<i>referência</i>	1014,78	<i>referência</i>	791,09	<i>referência</i>
5 mm	3,58%	1054,51	10,3%	988,97	-2,5%	816,18	3,2%
10 mm	7,15%	930,92	-2,6%	852,54	-16,0%	666,30	-15,8%
20 mm	14,29%	609,12	-36,3%	566,07	-44,2%	638,66	-19,3%

Fonte: autora.

Tabela 14 - AC III Aumento ou diminuição da resistência em função da extensão de aderência.

AC III							
Falha	Perda de Área	E = 2 mm		E = 4 mm		E = 7 mm	
		R (N)	% aumento/diminuição da resistência	R (N)	% aumento/diminuição da resistência	R (N)	% aumento/diminuição da resistência
0 mm	0	1185,74	<i>referência</i>	1461,87	<i>referência</i>	1224,54	<i>referência</i>
5 mm	3,58%	1095,14	-7,6%	1168,96	-20,0%	1029,43	-15,9%
10 mm	7,15%	1015,74	-14,3%	1001,21	-31,5%	813,07	-33,6%
20 mm	14,29%	711,83	-40,0%	710,65	-51,4%	634,19	-48,2%

Fonte: autora.

Os gráficos 15 e 16 mostram uma projeção linear baseada nos dados das tabelas 13 e 14, onde se verifica a perda da resistência de aderência em função da perda de área nas falhas de colagem das placas cerâmicas.

Gráfico 15 - Projeção linear de perda de resistência em função da perda de área de contato na argamassa AC II.

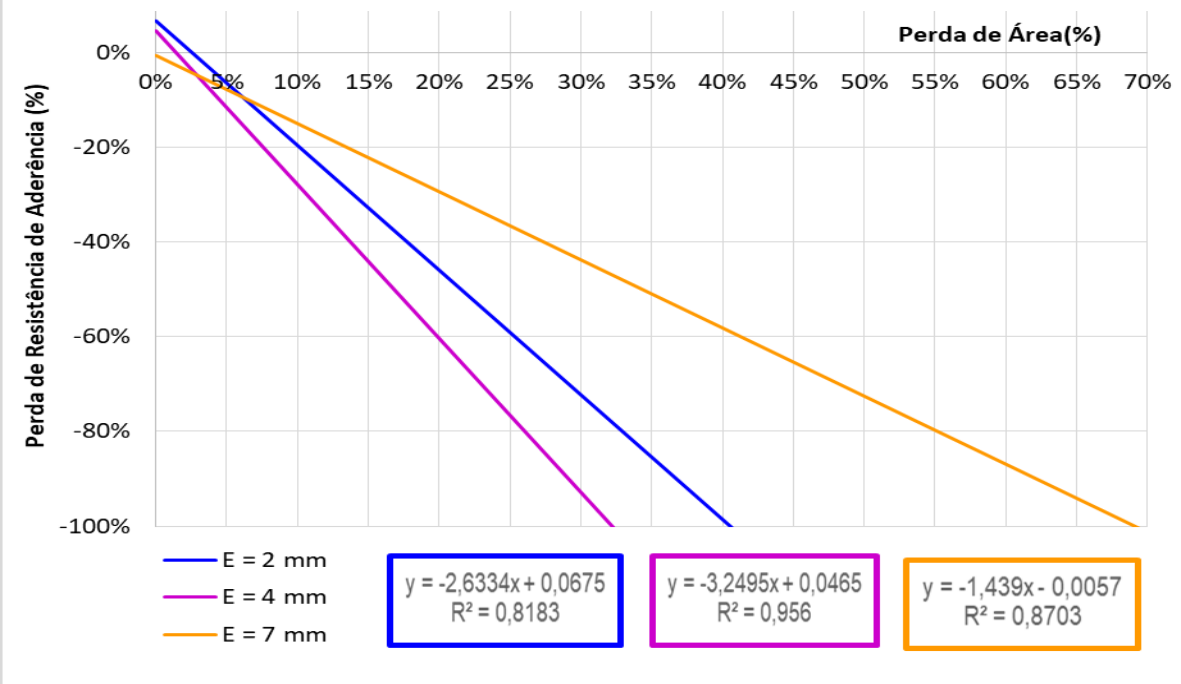
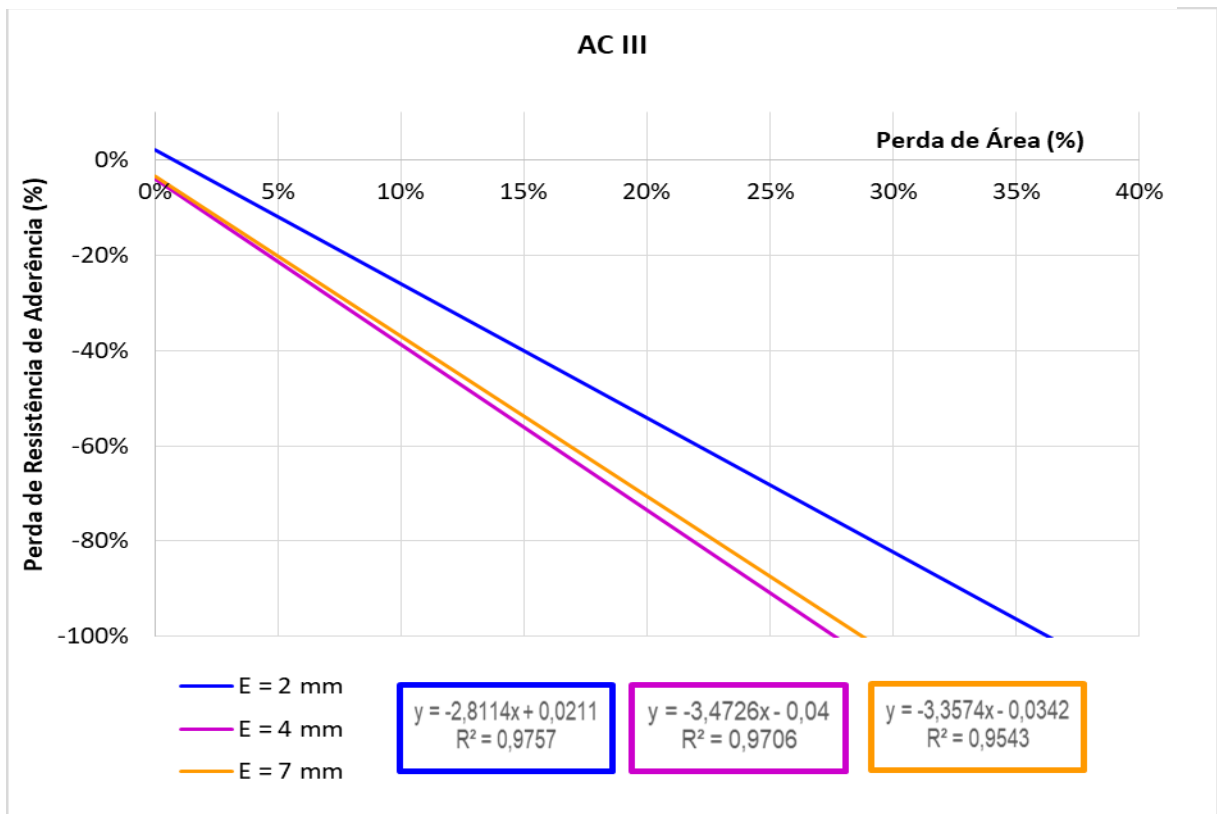


Gráfico 16 - Projeção linear de perda de resistência em função da perda de área de contato na argamassa AC III.



Os resultados indicam que a perda da resistência de aderência cresce de forma progressiva com a redução de área de contato da argamassa colante com a placa cerâmica. Esses dados reforçam a necessidade de se controlar de forma incisiva o percentual de falhas que ocorrem durante a execução do revestimento cerâmico, bem como atesta a assertividade da atualização da NBR 13755 (ABNT, 2017) ou recomendar esse item de verificações e controle durante a execução do sistema.

4.2.2 INFLUÊNCIA DA ARGAMASSA COLANTE

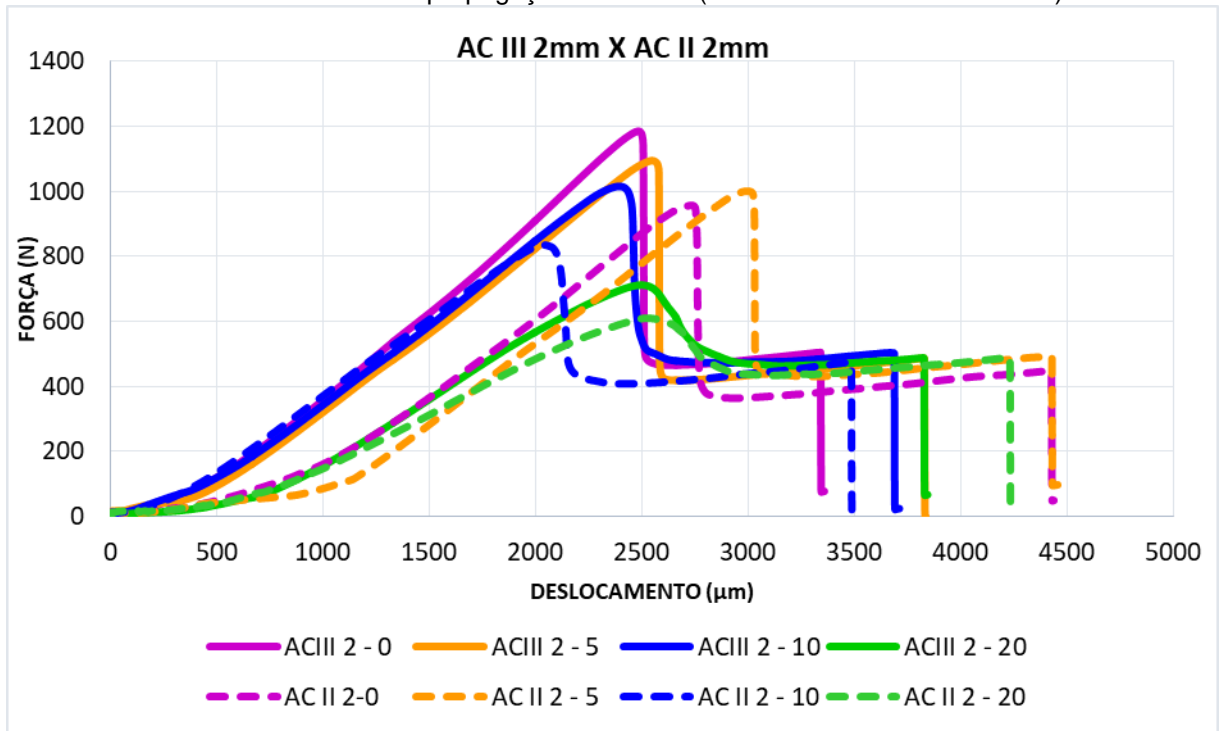
Nesse tópico é efetuada a discussão da influência do tipo de argamassa colante no comportamento mecânico do sistema de revestimento, submetido a esforços simultâneos de tração e cisalhamento. Para uma melhor visualização, os dados estão agrupados com apresentação conjunta da curva força *versus* deslocamento de ambos os tipos de argamassa colante, para cada espessura, acompanhada do gráfico indicativo das cargas máximas encontradas, com informação do ganho percentual obtido (Gráfico 17 ao 22), acompanhados das imagens da área calculada sob a curva para obtenção da tenacidade (Figura 30 a 32). As Tabelas 15 a 17 mostram os valores da tenacidade encontrados e a diferença percentual entre os valores das argamassas AC II e AC III.

Em seguida, a fim de permitir uma avaliação complementar analítica comparativa, foi calculado o valor da energia necessária para a ruptura da aderência na interface entre a argamassa colante e o tardo das placas cerâmicas, a partir da área situada sob a curva tensão x deformação obtida no ensaio mecânico em modo misto (MMF), apresentada no Gráfico 23.

Os valores observados reforçam o conceito consagrado de que o tipo de argamassa colante resulta em um ganho expressivo na aderência do sistema, com valores que podem alcançar até 34,51% de carga máxima, e 48,11% de tenacidade. Esses resultados, portanto, reforçam a importância do tipo de argamassa colante, e a assertividade da atualização da NBR 13755 (ABNT, 2017), que recomenda o uso de argamassa colante AC III para os revestimentos cerâmicos de fachada, exceto em algumas situações especiais.

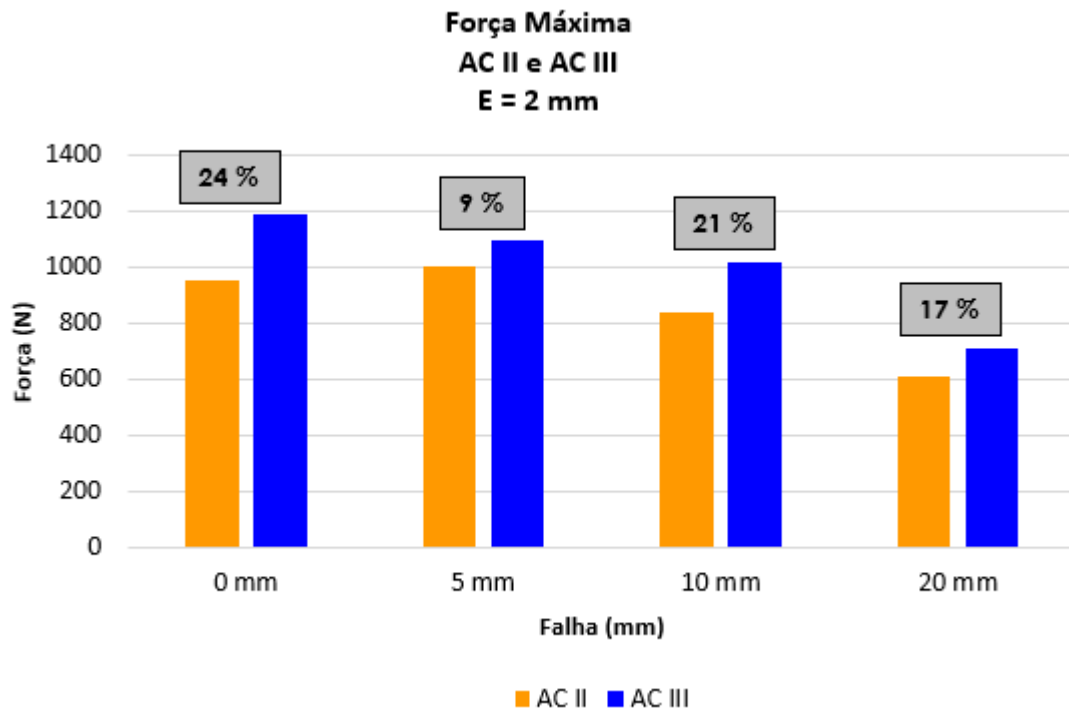
4.2.2.1 AC III 2 mm X AC II 2 mm

Gráfico 17 - Curvas de propagação da fissura (AC III – 2 mm x AC II – 2 mm).



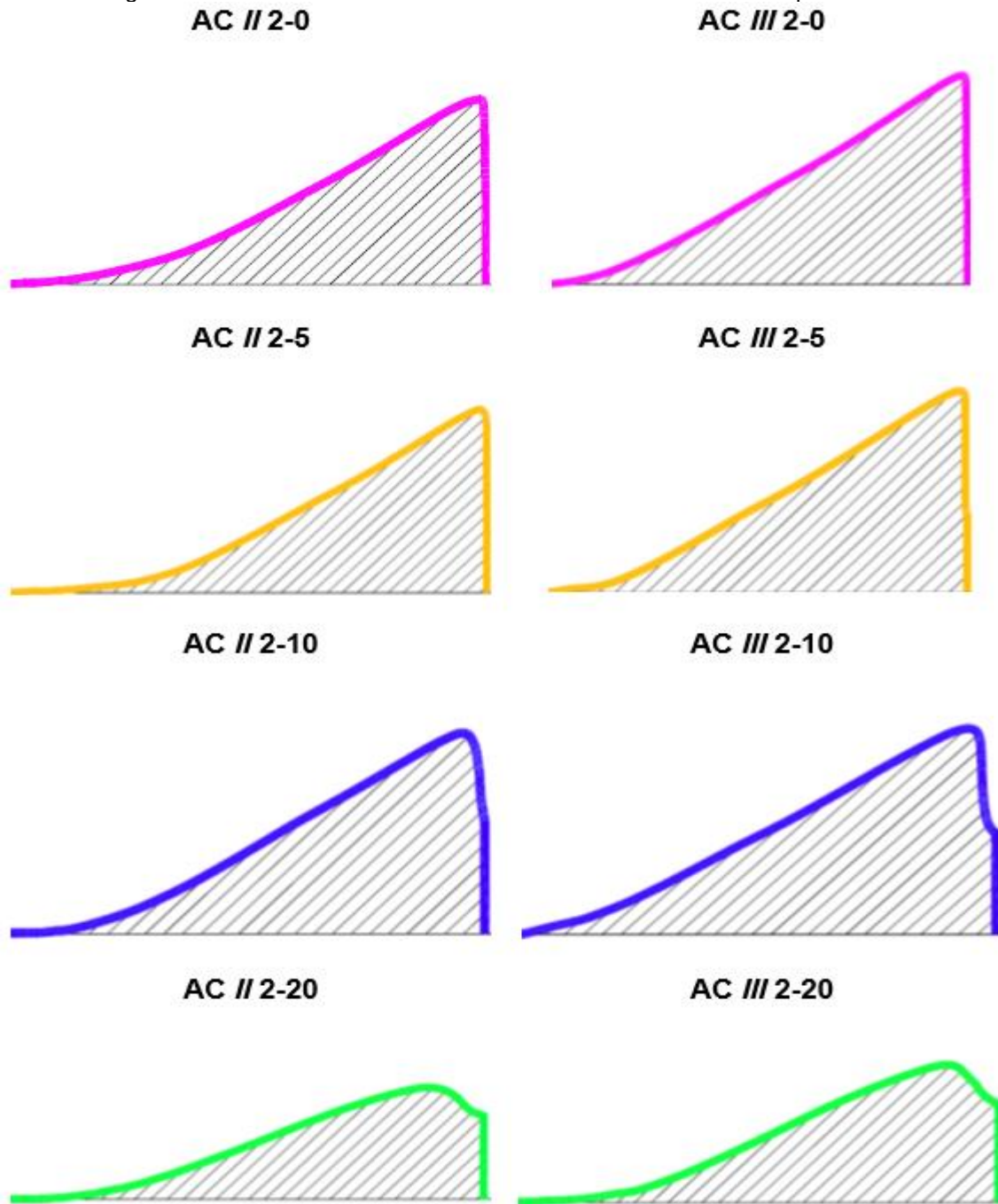
Fonte: autora.

Gráfico 18 - Força máxima atingida (AC III – 2 mm x AC II – 2 mm).



Fonte: autora.

Figura 32 - Tenacidade calculada através da área sob a curva. Espessura = 2mm.



Fonte: autora

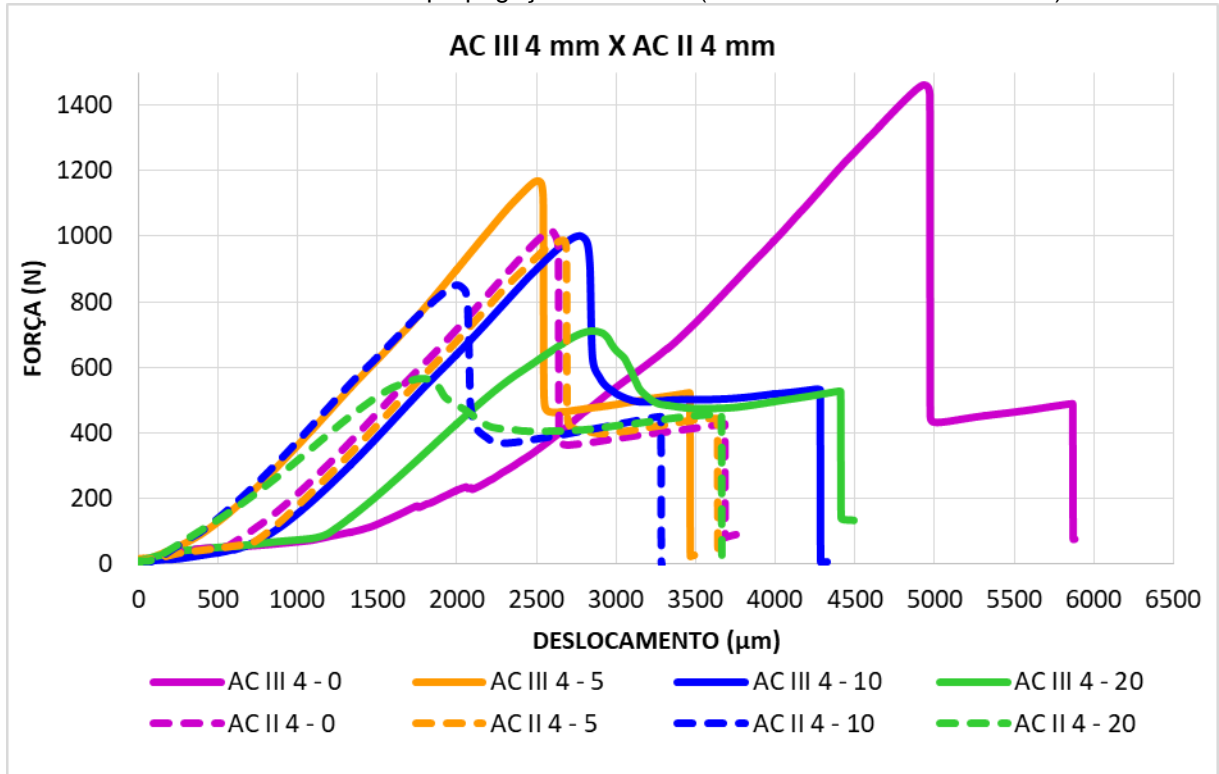
Tabela 15 - Tenacidade E=2mm

FAMÍLIA	AC II TENACIDADE (N/mm)	AC III TENACIDADE (N/mm)	DIFERENÇA PERCENTUAL
2-0	85,3	107,4	→ 26%
2-5	98,5	101,8	→ 3%
2-10	82,5	98,2	→ 19%
2-20	67,6	74,9	→ 11%

Fonte: autora.

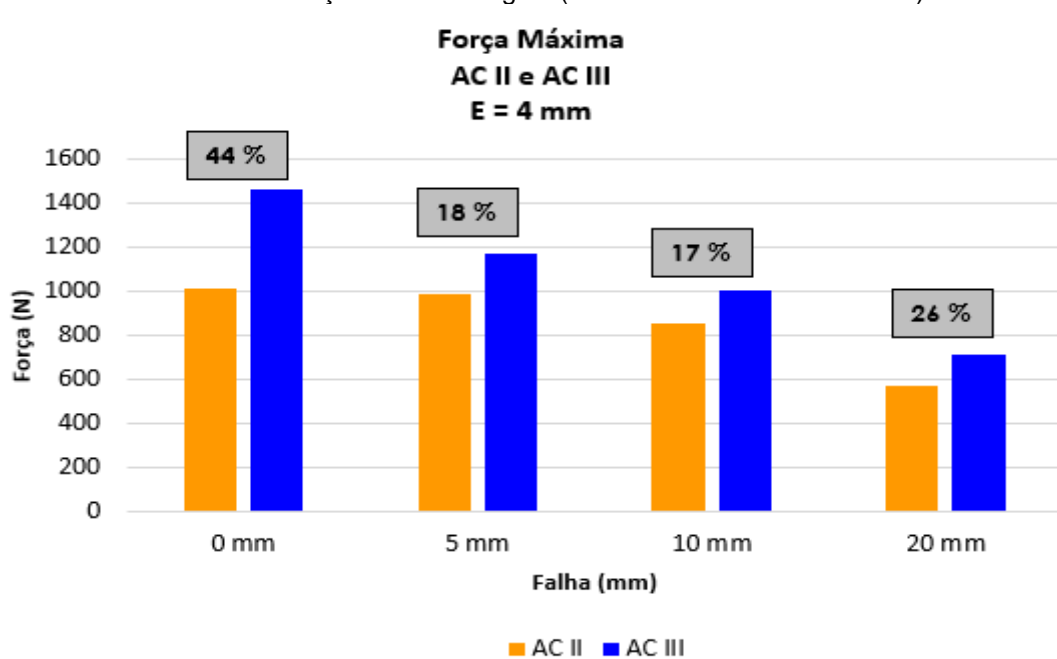
4.2.2.2 AC III 4 mm X AC II 4 mm

Gráfico 19 - Curvas de propagação da fissura (AC III – 4 mm x AC II – 4 mm).



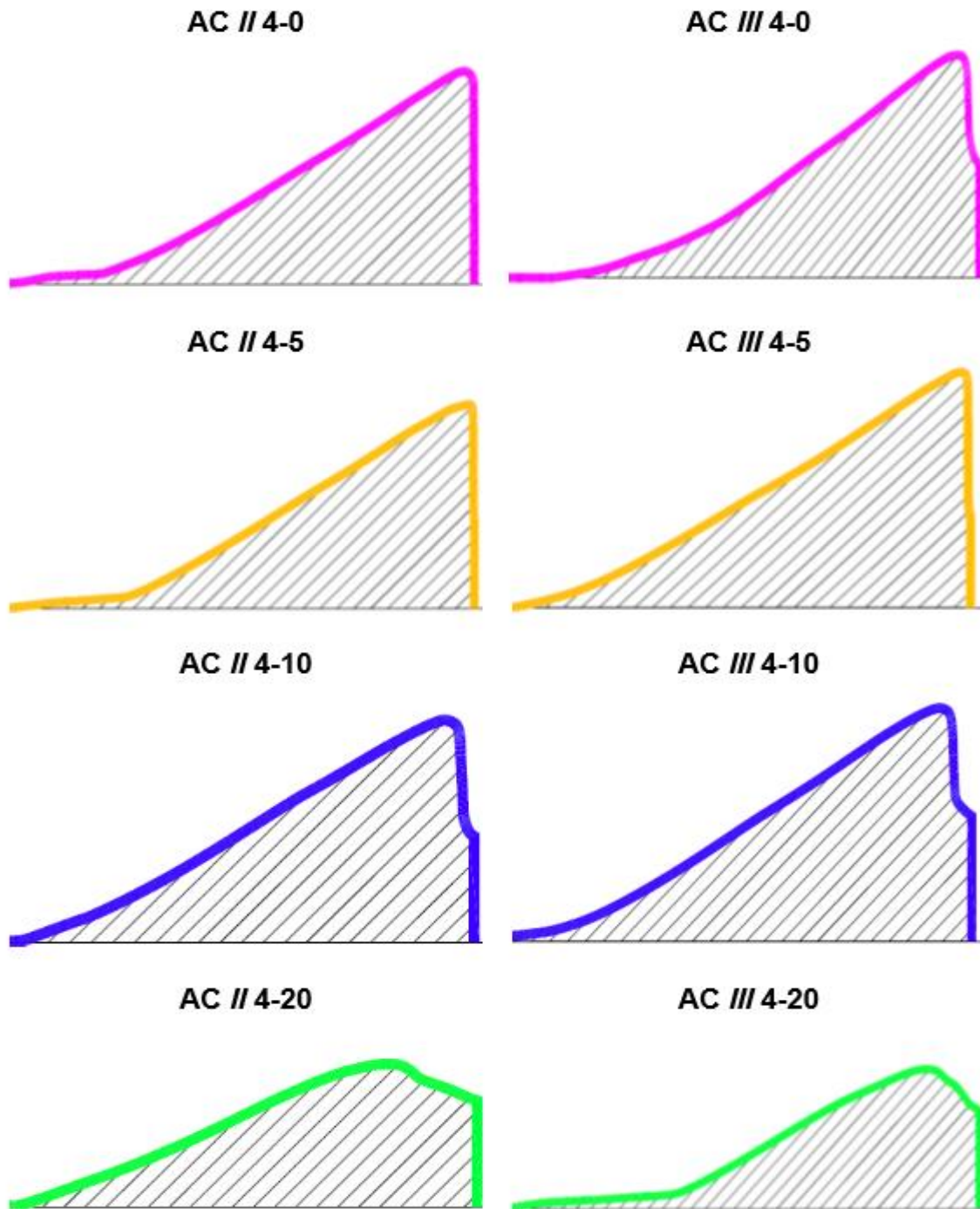
Fonte: autora.

Gráfico 20 - Força máxima atingida (AC III – 4 mm x AC II – 4 mm).



Fonte: autora.

Figura 33 - Tenacidade calculada através da área sob a curva. Espessura = 4mm.



Fonte: autora.

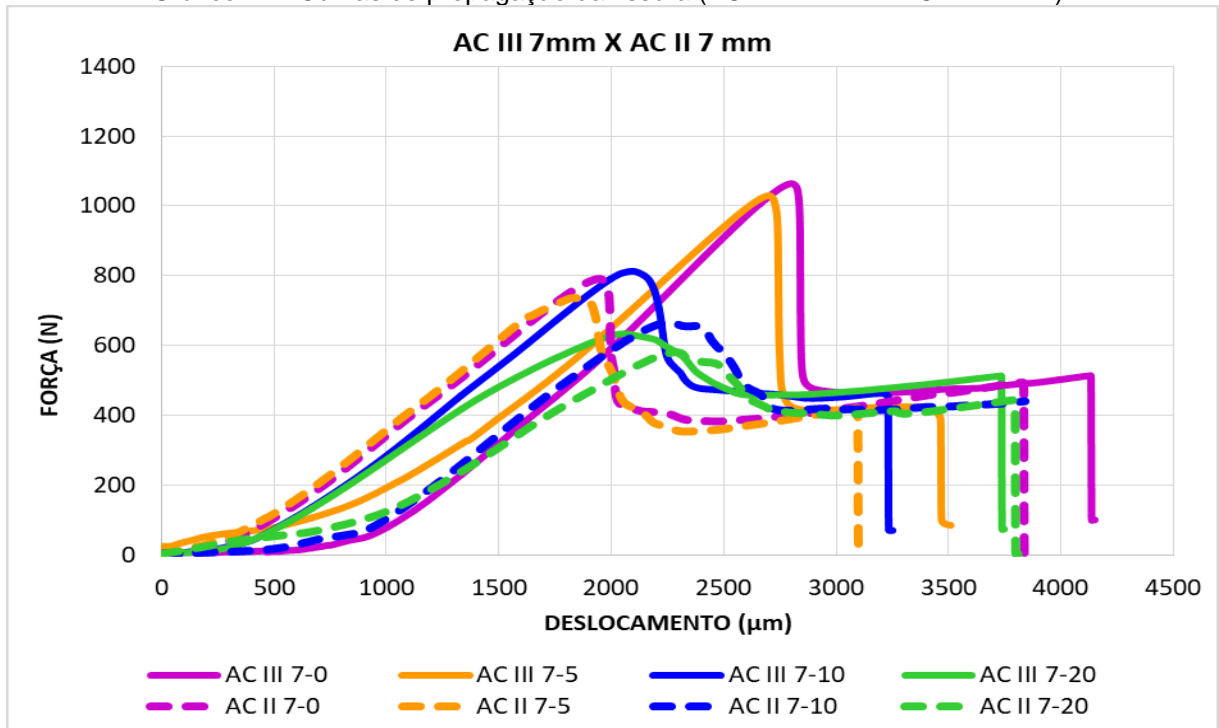
Tabela 16 - Tenacidade E=4mm.

FAMÍLIA	AC II TENACIDADE (N/mm)	AC III TENACIDADE (N/mm)	DIFERENÇA PERCENTUAL
4-0	90,4	106,5	→ 18%
4-5	87,9	109,4	→ 24%
4-10	72,0	98,9	→ 37%
4-20	57,3	80,0	→ 40%

Fonte: autora.

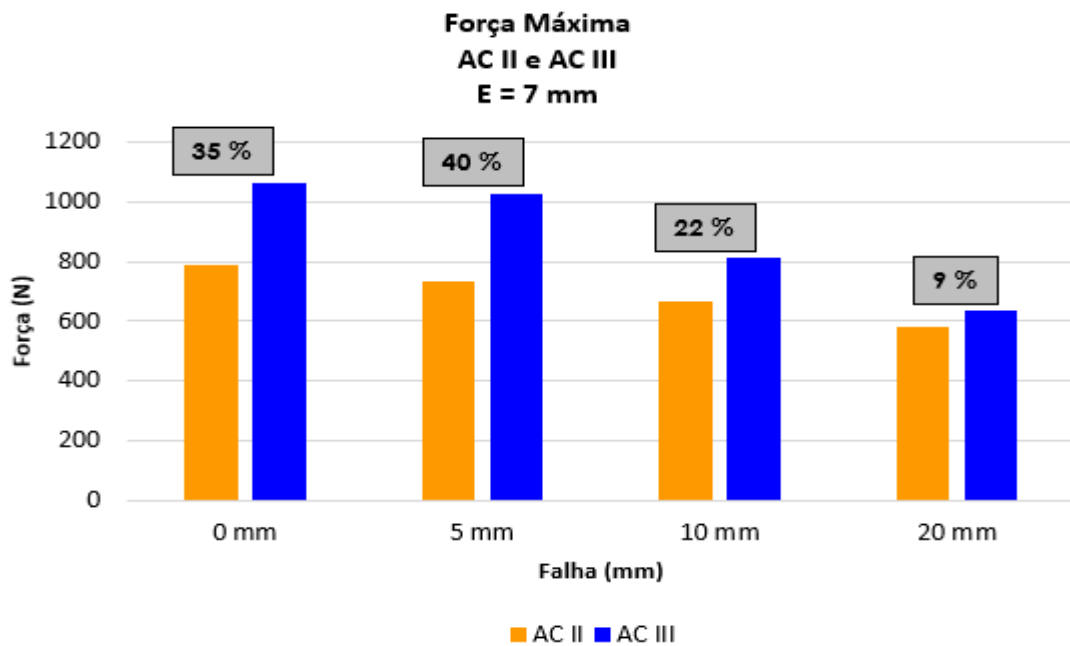
4.2.2.3 AC III 7 mm X AC II 7 mm

Gráfico 21 - Curvas de propagação da fissura (AC III – 7 mm x AC II – 7 mm).



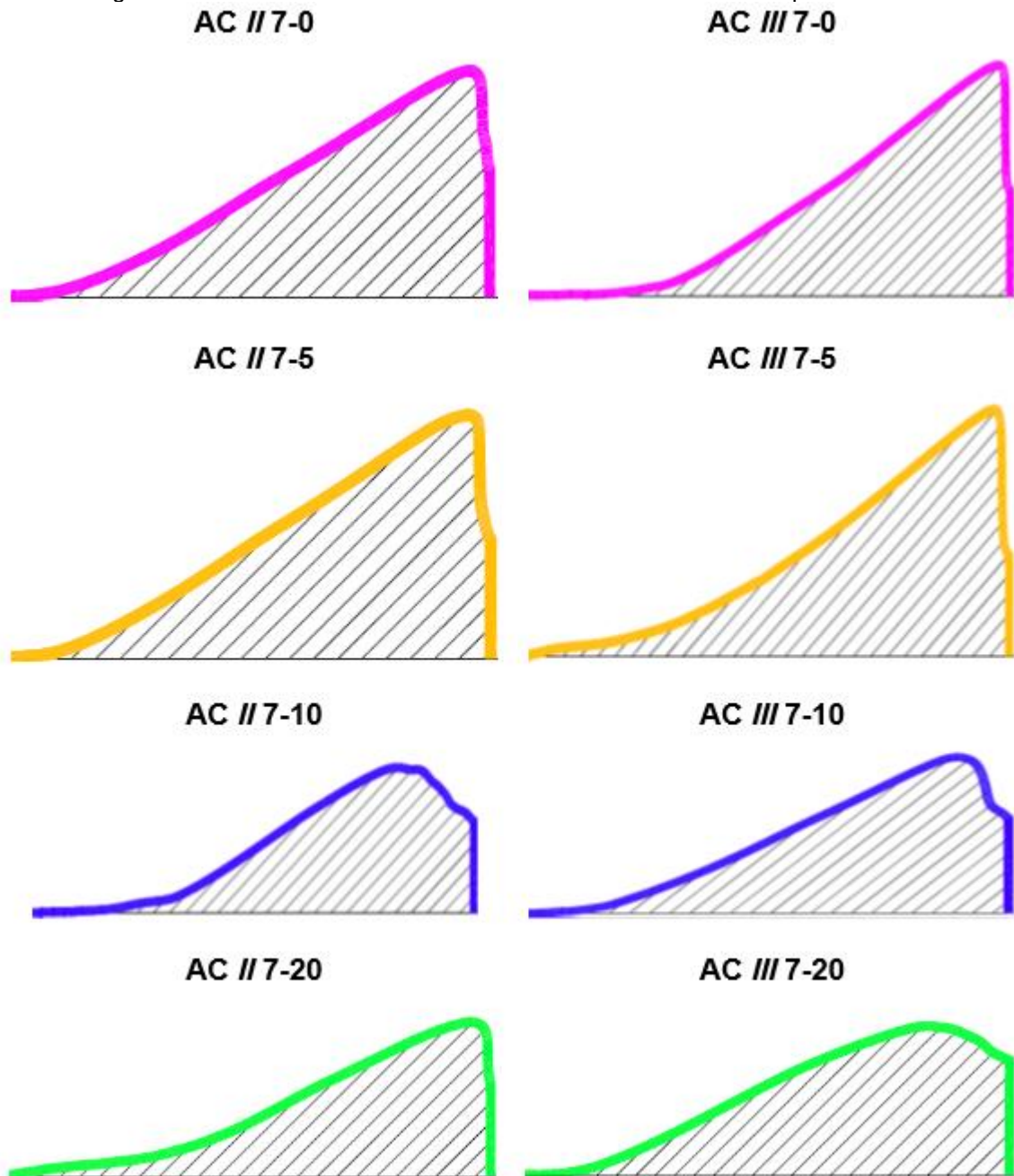
Fonte: autora.

Gráfico 22 - Força máxima atingida (AC III – 7 mm x AC II – 7 mm).



Fonte: autora.

Figura 34 - Tenacidade calculada através da área sob a curva. Espessura = 7mm.



Fonte: autora.

Tabela 17 - Tenacidade E= 7mm.

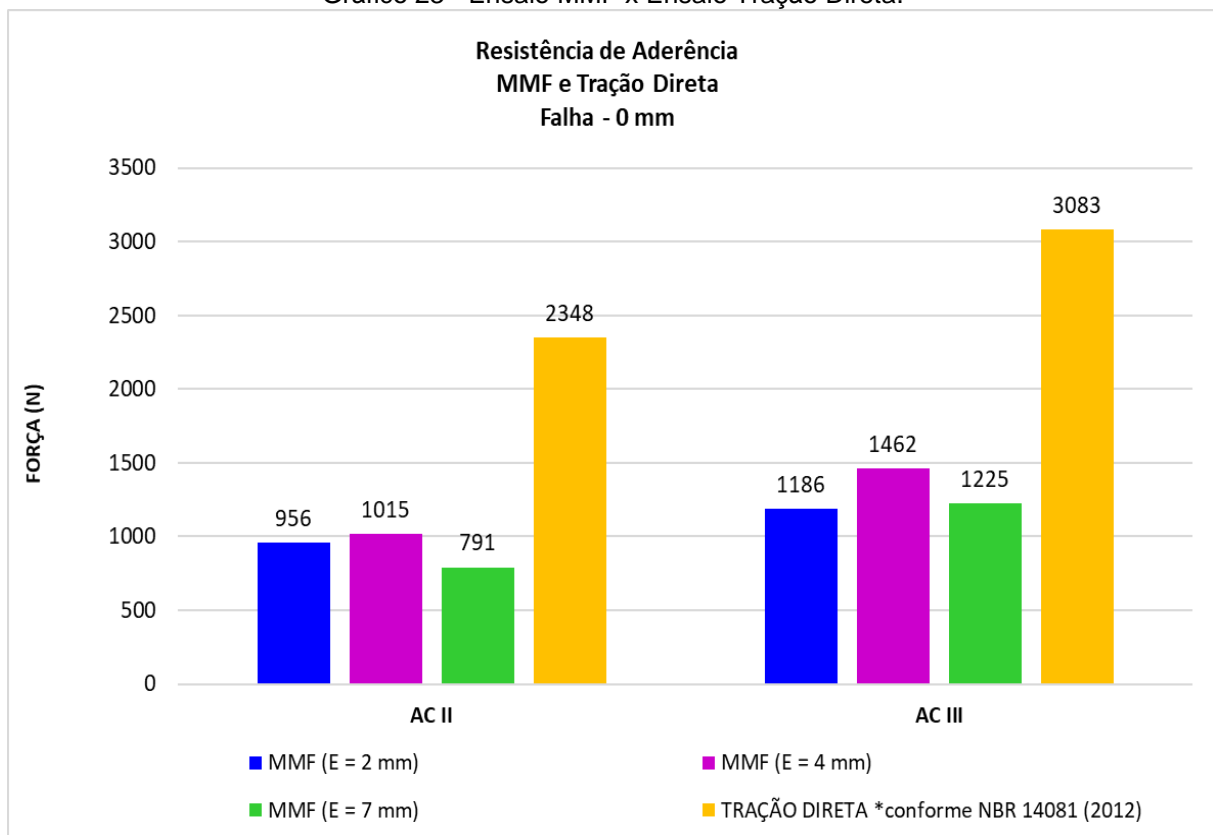
FAMÍLIA	AC II TENACIDADE (N/mm)	AC III TENACIDADE (N/mm)	DIFERENÇA PERCENTUAL
7-0	60,0	88,4	→ 47%
7-5	60,9	90,2	→ 48%
7-10	65,6	72,1	→ 10%
7-20	53,3	68,7	→ 29%

Fonte: autora.

É importante dizer que o valor numérico da tenacidade foi obtido a partir do cálculo da área sob a curva das amostras ensaiadas. Para tal, utilizou-se inicialmente o software AutoCAD Civil 3D para definição da curva, ou seja, para que as coordenadas em números fossem visualizadas em forma de desenho. Uma vez definida, a curva foi transportada para o software AutoCAD 2D que possibilitou a medição da área.

Por fim, outra análise interessante quanto ao tipo de argamassa colante trata da comparação entre os valores de carga máxima encontrados, sem falhas, nas três diferentes espessuras estudadas, com o resultado de resistência de aderência à tração direta (RATD) efetuado em laboratório (Gráfico 23). Em todos os casos foi constatada uma perda de capacidade mecânica de 66% e 61% (AC II e AC III, respectivamente) da argamassa colante quando submetida ao ensaio de carregamento misto, quando comparado com a tração direta. Esse comportamento reforça a necessidade de conhecer de forma mais detalhada a capacidade mecânica da argamassa colante quando submetida a esforços mistos de tração e cisalhamento.

Gráfico 23 - Ensaio MMF x Ensaio Tração Direta.



4.2.3 INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DA ARGAMASSA COLANTE

Para essa avaliação também são apresentados os gráficos de tensão *versus* deformação obtidos no ensaio mecânico em modo misto (MMF), acompanhados do gráfico de barras com as cargas máximas, para os dois tipos de argamassa colante e as diferentes falhas de contato estudadas.

Nos grupos cujo adesivo foi a argamassa AC II, percebe-se uma tendência de melhor desempenho dos sistemas em que a argamassa tem 4 mm de espessura. O acréscimo da espessura da argamassa acarretou no decréscimo da aderência do conjunto, fato este já evidenciado por outros pesquisadores anteriormente, tais como Nascimento (2013) para adesivos poliméricos e Rêgo (2008) para adesivos cimentícios. O mesmo fato observado nas argamassas AC II com falha de 20 mm verifica-se na argamassa AC III. Os resultados das forças máximas atingidas são numericamente muito próximos, inferindo que para este tipo de CP, à medida que a falha crescia, a espessura de argamassa não exercia mais um fator de influência significativo.

Os Gráficos 24 a 31 mostram uma comparação do comportamento entre o tipo de falha e a espessura do adesivo, quando utilizada a argamassa AC II. Uma característica que foi predominante entre os grupos apresentados é o fato de que as amostras com a maior espessura de argamassa (7 mm) alcançaram os menores valores de resistência de aderência, com exceção do grupo com falha de 20 mm onde a variação da espessura não indicou uma mudança significativa no comportamento das curvas e nos seus valores.

Nos grupos cujo adesivo foi a argamassa AC III, representados pelos Gráficos 32 a 39), percebe-se uma tendência de melhor desempenho dos sistemas em que a argamassa tem 4 mm de espessura. O acréscimo da espessura da argamassa acarretou no decréscimo da aderência do conjunto, fato este já evidenciado por outros pesquisadores anteriormente, tais como Rêgo (2008) e Nascimento (2013). O mesmo fato observado nas argamassas AC II com falha de 20 mm verifica-se na argamassa AC III. Os resultados das forças máximas atingidas são numericamente muito próximos, inferindo que para este tipo de CP, à medida que a falha crescia, a espessura de argamassa não exercia mais um fator de influência significativo.

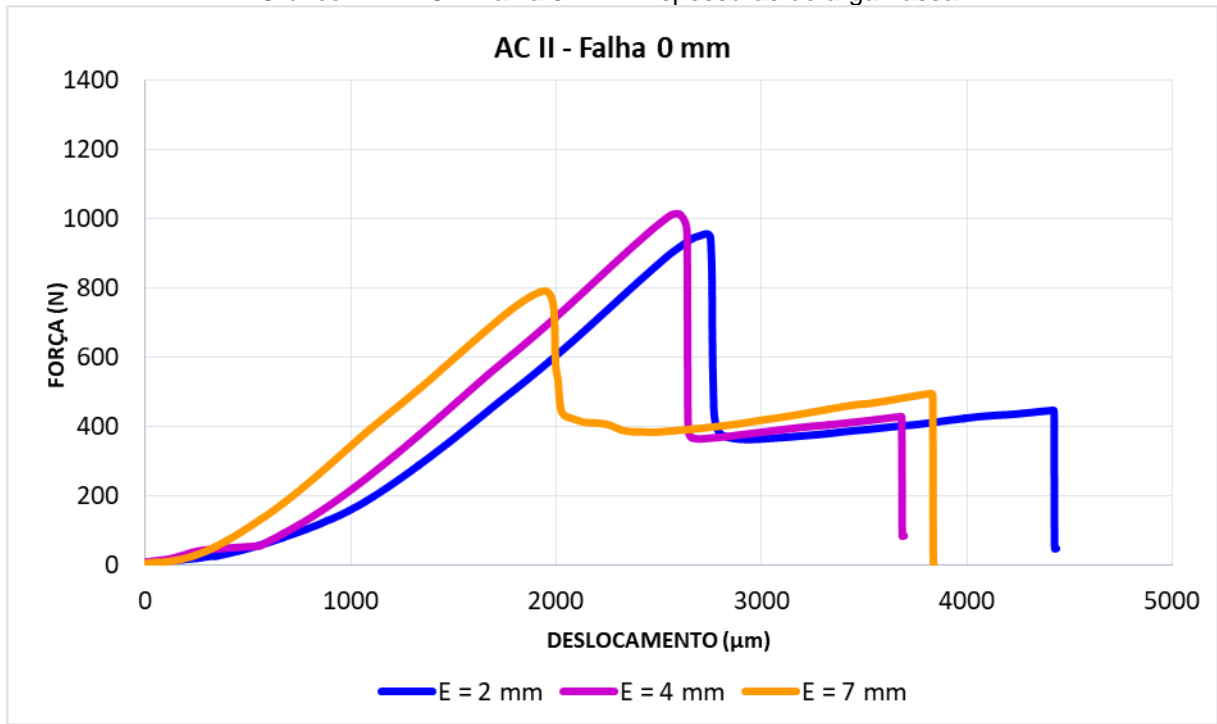
Em testes experimentais que foram realizados anteriormente e cujos resultados não estão apresentados nesta pesquisa, utilizou-se uma falha de 40 mm, mas constatou-se que o corpo de prova nas dimensões estabelecidas neste projeto (16 cm x 4 cm), não apresentou comportamento satisfatório no ensaio de modo misto (MMF), uma vez que a ausência mais acentuada da argamassa nessa condição deixava um espaço vazio muito pronunciado no corpo de prova, assim, a medida que a carga pontual era aplicada, apenas a cerâmica absorvia o esforço e rompia prematuramente antes da obtenção da curva (força x deslocamento), em virtude desta experiência, o máximo comprimento de falha utilizado nesta pesquisa foi 20 mm.

De uma maneira geral, os resultados encontrados apresentaram uma tendência de comportamento mecânico inferior das amostras com espessura de 7mm (maior espessura utilizada no presente estudo). Gleich *et al.* (2001) *apud* Nascimento (2013) propõe uma explicação baseada nas tensões interfaciais. O autor demonstrou que as tensões normais e de cisalhamento nas interfaces e junto às extremidades da zona de sobreposição aumentam com o aumento da espessura, ao contrário do que sucede com as mesmas componentes de tensão no plano médio do adesivo. As amostras com menores espessuras de adesivo apresentaram uma distribuição mais uniforme para ambas as componentes de tensão, ao passo que as de maior espessura evidenciaram um aumento pronunciado junto das interfaces. Assim, esses autores concluíram que a maior probabilidade de defeitos internos nas amostras com maior espessura do adesivo não pode ser considerada como explicação exclusiva para o fenômeno, embora possa contribuir para ele.

No Brasil, Rêgo (2008) considerou a influência da temperatura na aderência de materiais cerâmicos de diferentes cores colados com argamassa colante industrializada sob modo misto de tensões e constatou que em temperatura elevada, o aumento da espessura promoveu reduções da resistência de aderência superiores a 35% e 40% para os sistemas com porcelanato e cerâmica semi-porosa (BIIb) colados com argamassas cimentícias, respectivamente.

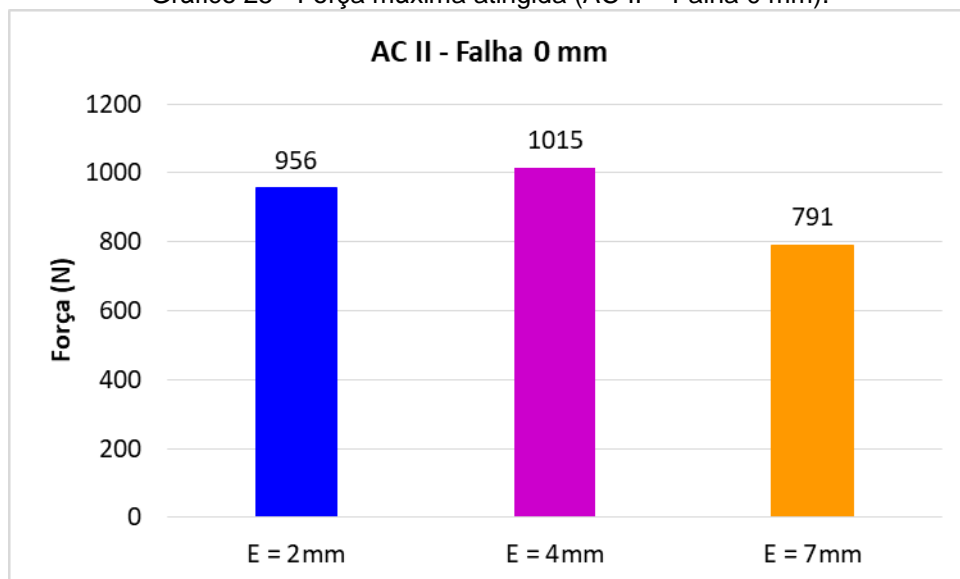
4.2.3.1 AC II – FALHA 0 mm

Gráfico 24 – AC II Falha 0 mm - Espessuras de argamassa.



Fonte: autora.

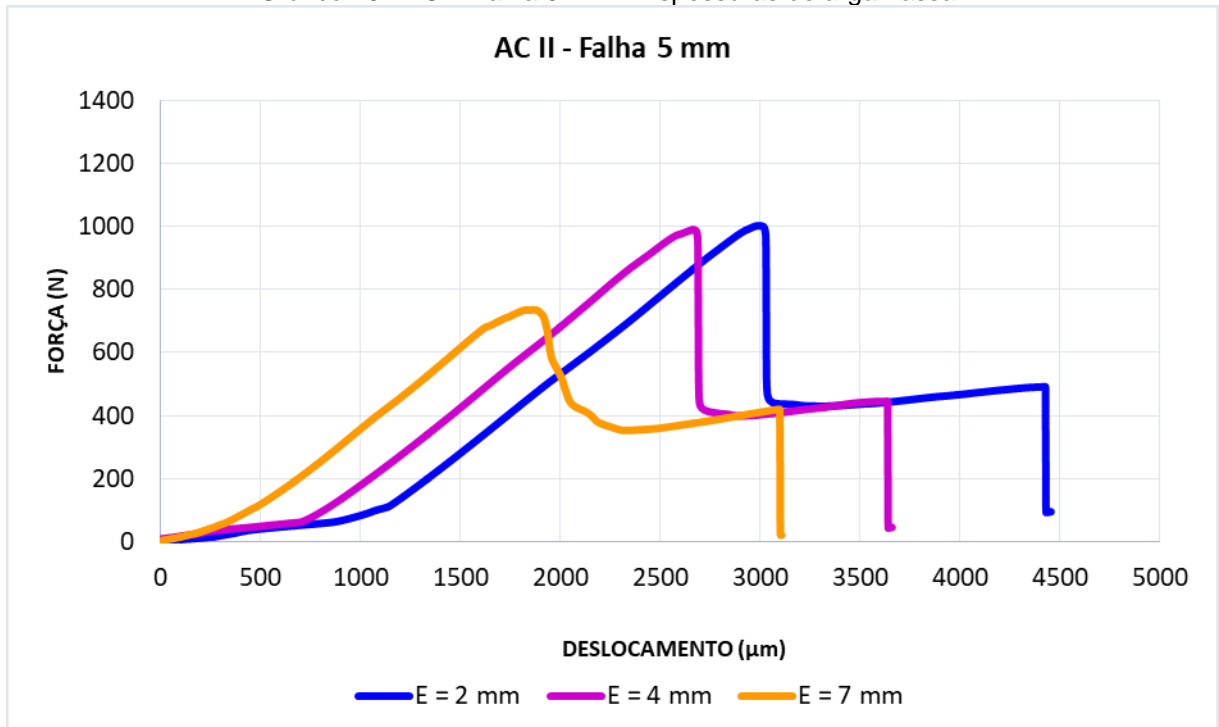
Gráfico 25 - Força máxima atingida (AC II – Falha 0 mm).



Fonte: autora.

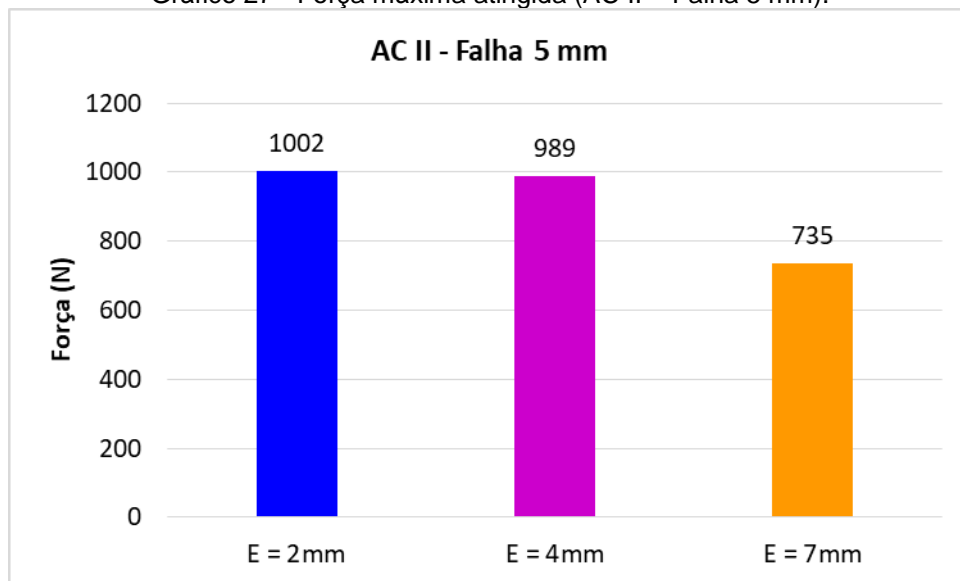
4.2.3.2 AC II – FALHA 5 mm

Gráfico 26 - AC II Falha 5 mm x Espessuras de argamassa.



Fonte: autora.

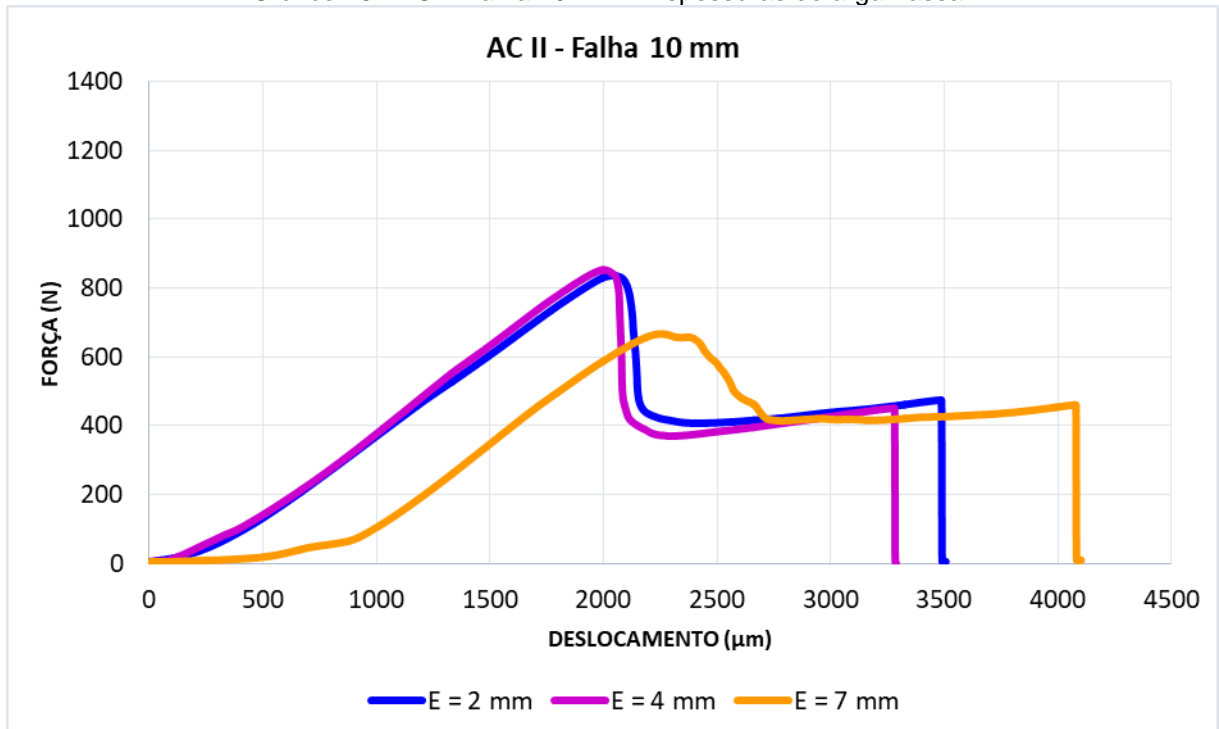
Gráfico 27 - Força máxima atingida (AC II – Falha 5 mm).



Fonte: autora.

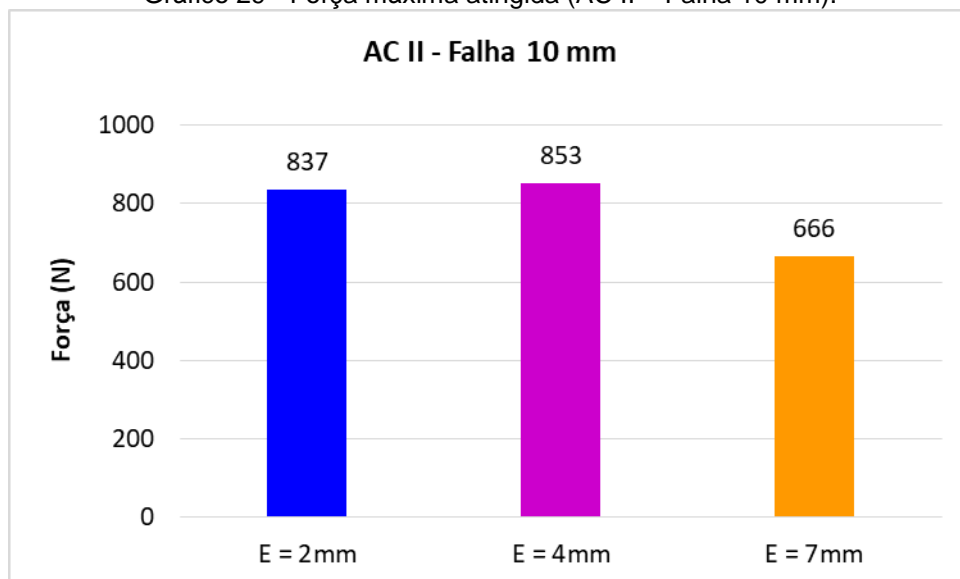
4.2.3.3 AC II – FALHA 10 mm

Gráfico 28 - AC II Falha 10 mm x Espessuras de argamassa.



Fonte: autora.

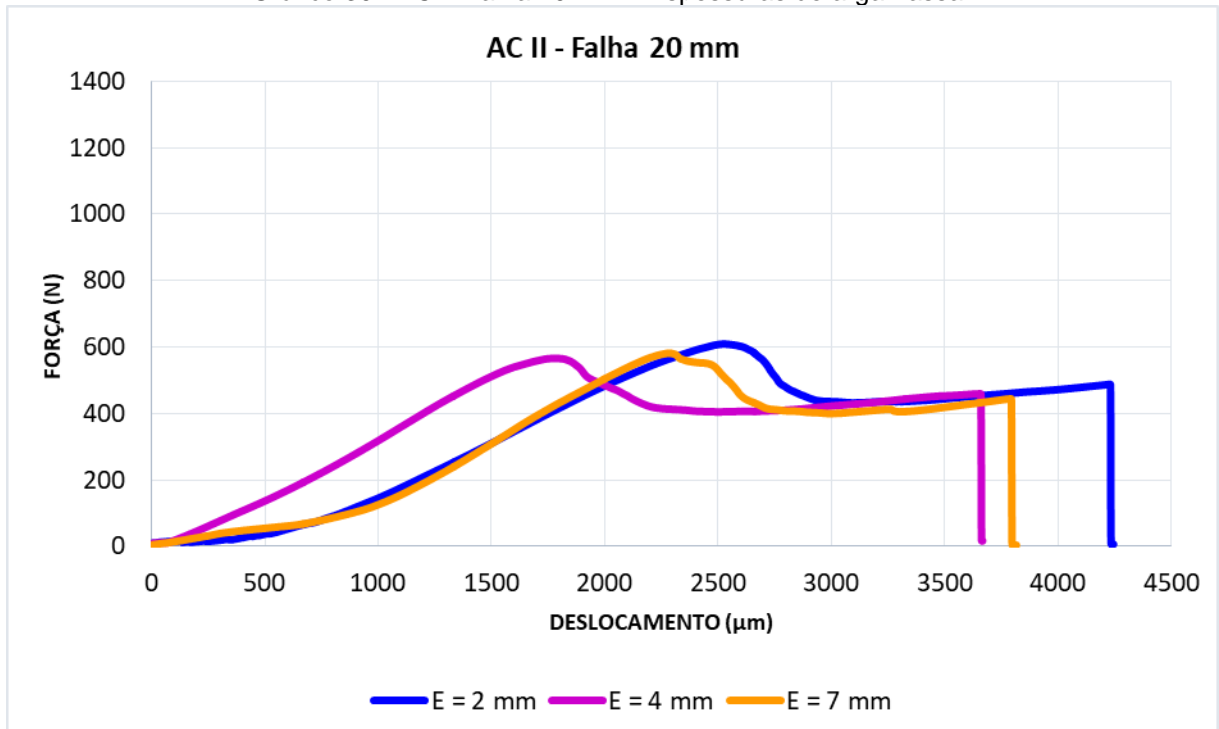
Gráfico 29 - Força máxima atingida (AC II – Falha 10 mm).



Fonte: autora.

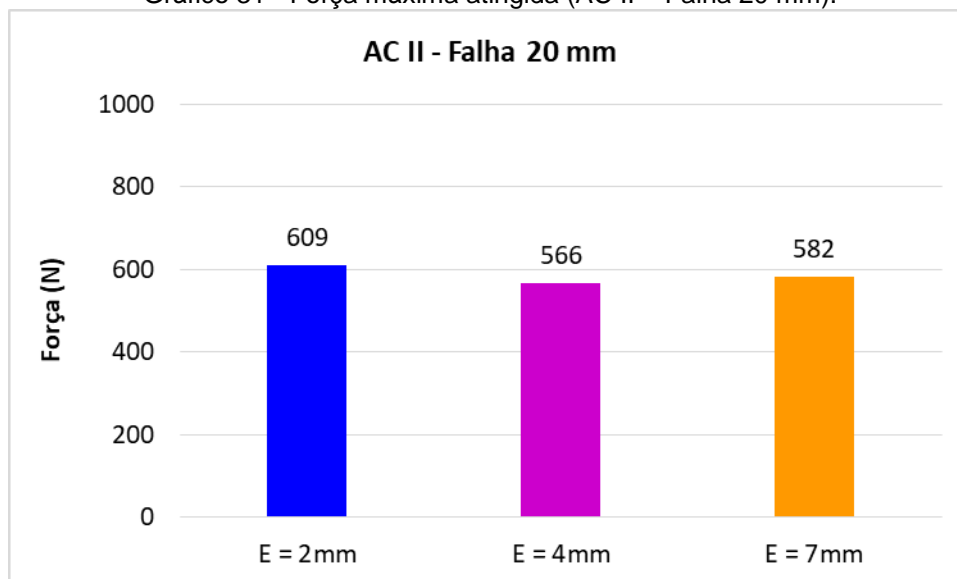
4.2.3.4 AC II – FALHA 20 mm

Gráfico 30 - AC II Falha 20 mm x Espessuras de argamassa.



Fonte: autora.

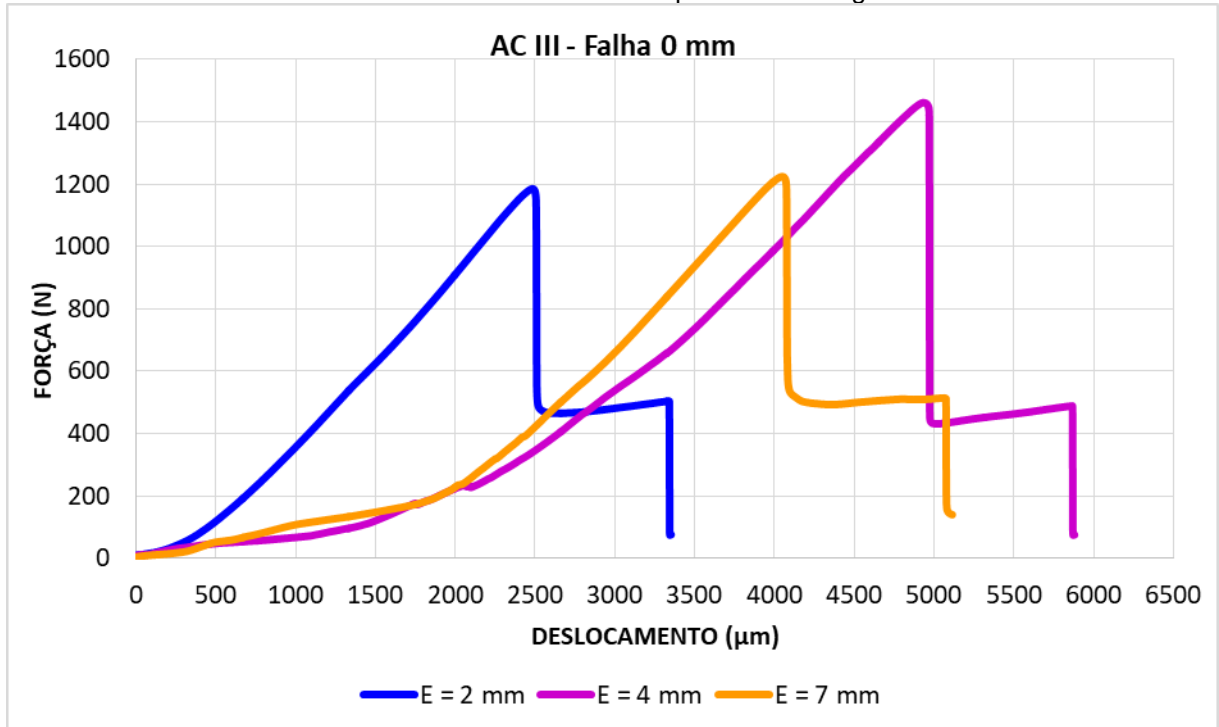
Gráfico 31 - Força máxima atingida (AC II – Falha 20 mm).



Fonte: autora.

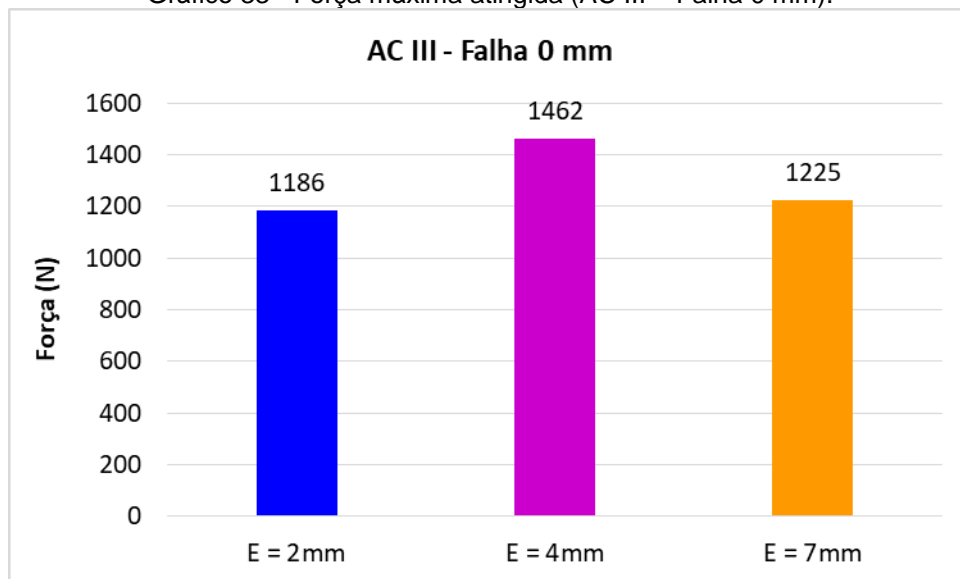
4.2.3.5 AC III – FALHA 0 mm

Gráfico 32 - AC III Falha 0 mm x Espessuras de argamassa.



Fonte: autora.

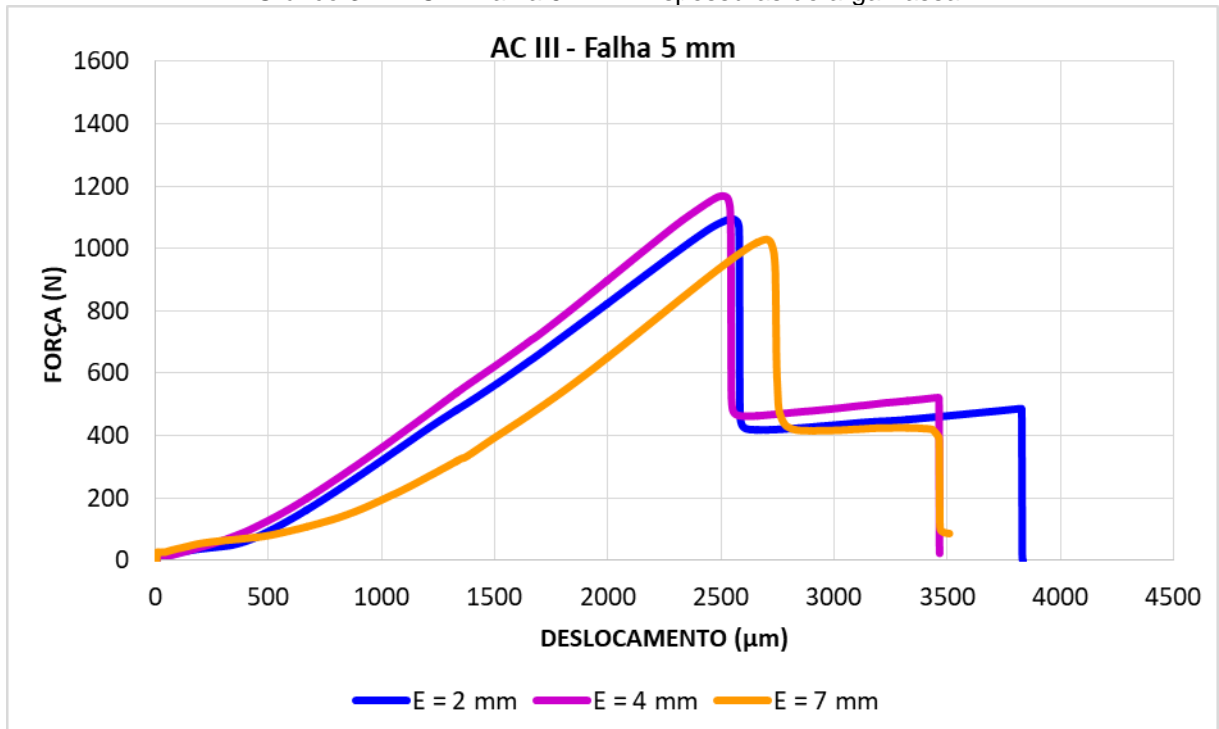
Gráfico 33 - Força máxima atingida (AC III – Falha 0 mm).



Fonte: autora.

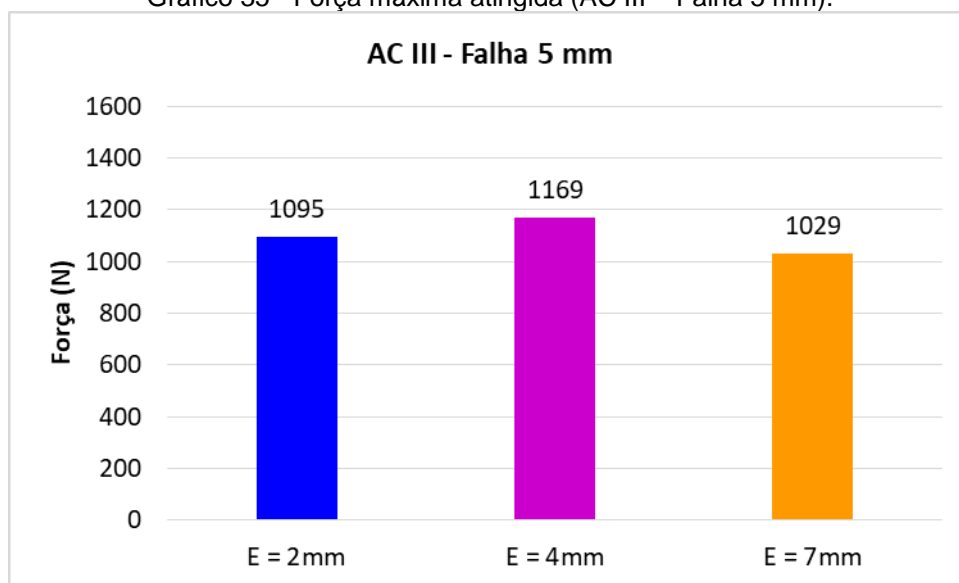
4.2.3.6 AC III – FALHA 5 mm

Gráfico 34 - AC III Falha 5 mm x Espessuras de argamassa.



Fonte: autora.

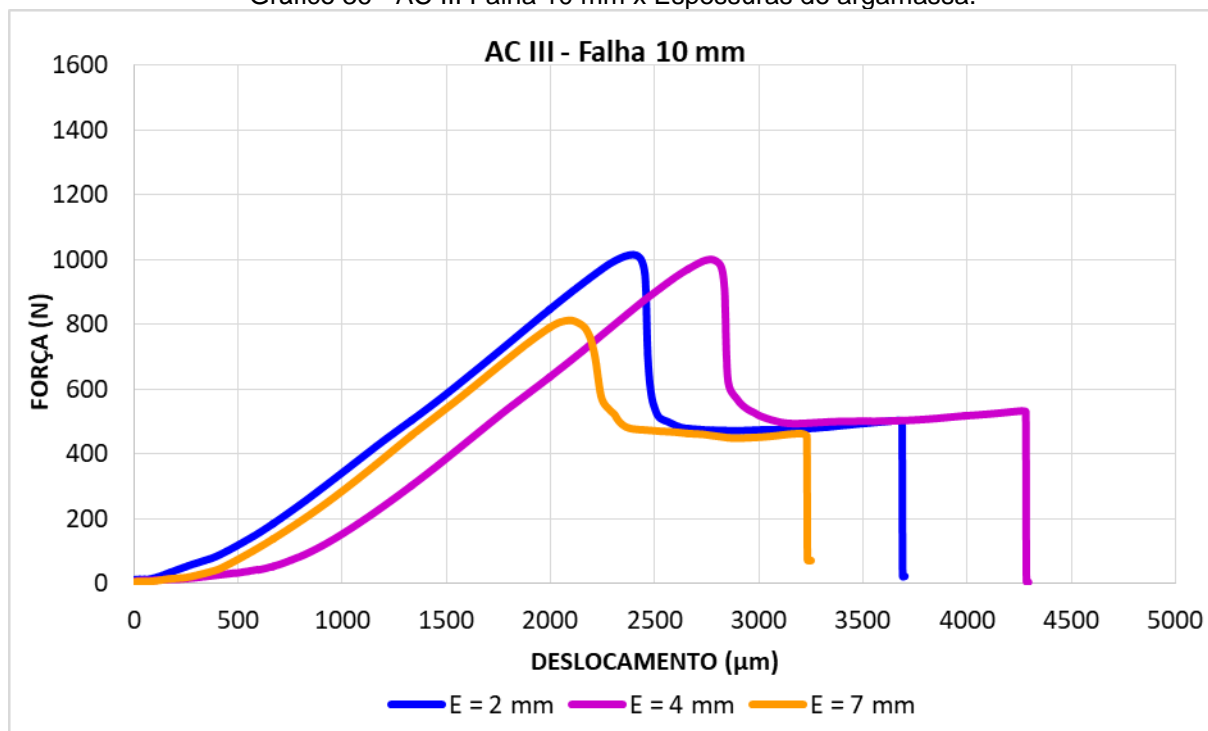
Gráfico 35 - Força máxima atingida (AC III – Falha 5 mm).



Fonte: autora.

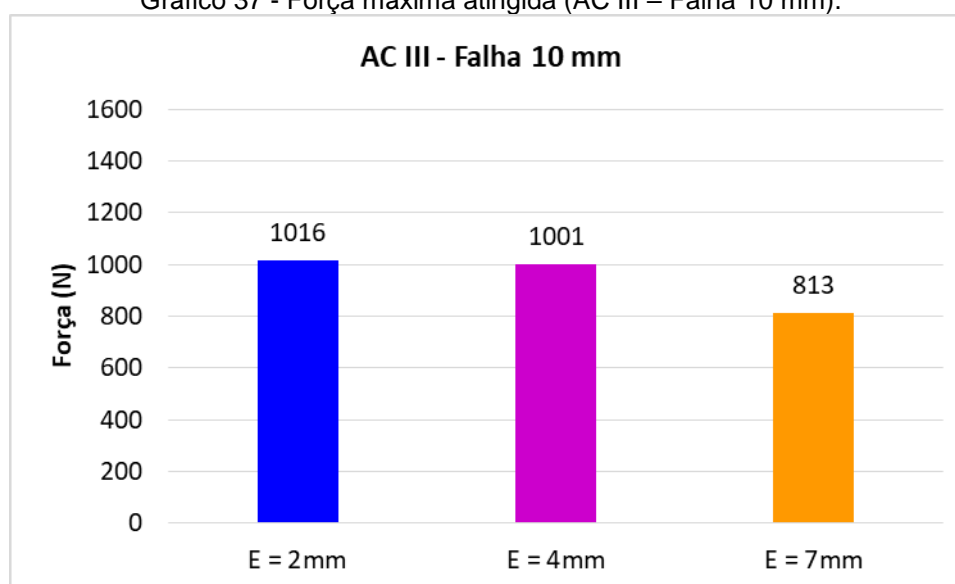
4.2.3.7 AC III – FALHA 10 mm

Gráfico 36 - AC III Falha 10 mm x Espessuras de argamassa.



Fonte: autora.

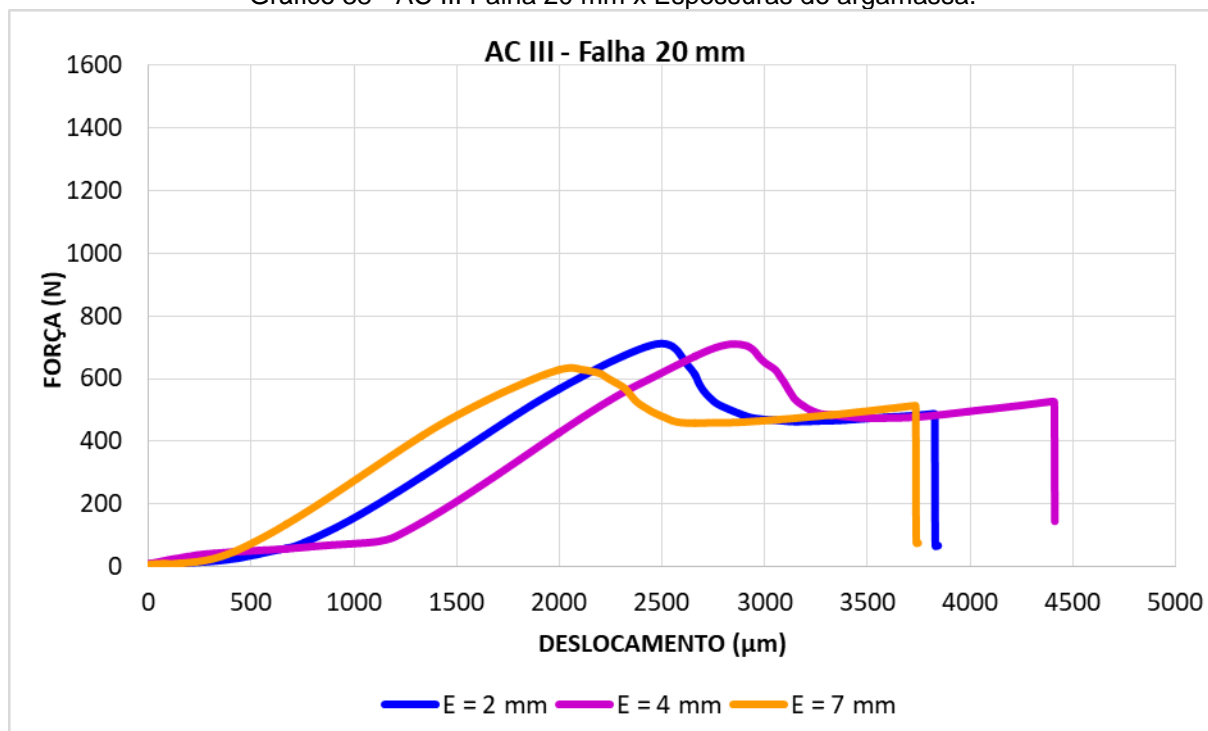
Gráfico 37 - Força máxima atingida (AC III – Falha 10 mm).



Fonte: autora.

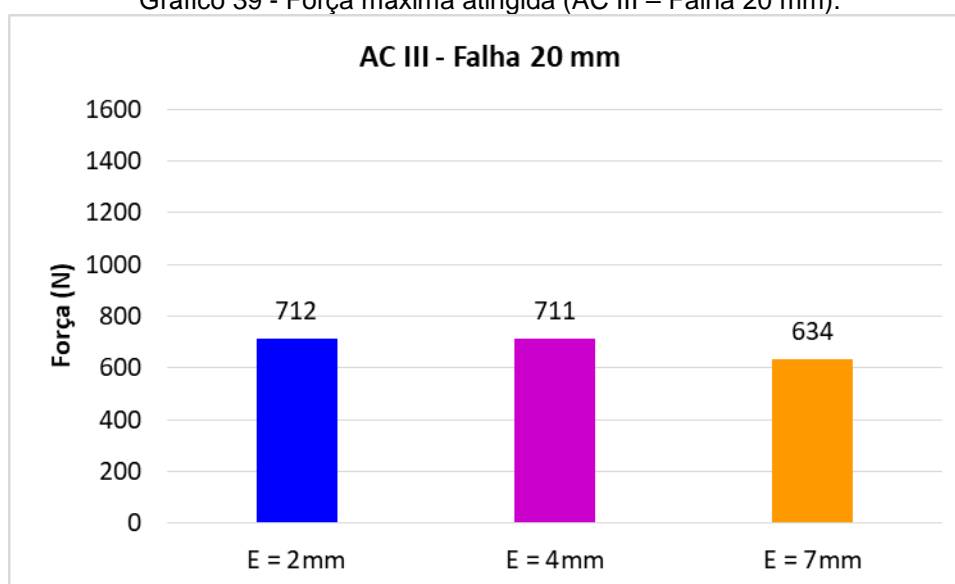
4.2.3.8 AC III – FALHA 20 mm

Gráfico 38 - AC III Falha 20 mm x Espessuras de argamassa.



Fonte: autora.

Gráfico 39 - Força máxima atingida (AC III – Falha 20 mm).



Fonte: autora.

4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Em virtude do número elevado de variáveis, suas naturezas quantitativas e qualitativas e suas interações, as análises de efeitos isolados torna-se bastante complexa. Importante se faz, portanto, a realização da significância estatística multivariável, incluindo todos os parâmetros do planejamento experimental e avaliando a significância estatística desses parâmetros e suas interações na força de aderência dos sistemas colados (RÊGO, 2008).

O teste da significância estatística das diferentes variáveis nos parâmetros medidos foi baseado na análise de variância. Para tanto, utilizou-se o software Origin®, onde os valores de todas as variáveis são correlacionados (em pares) de modo a se encontrar a combinação de maior significância, sendo por fim representado em forma de polinômio. Em todos os testes realizados, foram considerados significativos os resultados com avaliação do nível de significância dos parâmetros.

Sendo os parâmetros utilizados e suas unidades:

F: Força de adesão no modo misto MMF (N);

Esp: Espessura do adesivo colante (mm);

T. trinca: Tamanho da trinca ou falha (mm);

Class.Ades: Classe do adesivo AC II (-1) e AC III (+1).

A força máxima de propagação da trinca (F) pode ser descrita da seguinte equação:

$$F = 1211,38 - 33,16.Esp - 20,76.T.trinca + 80,96. Class.Ades \quad (3)$$

$$F = \frac{1211,38}{(\mp 31,41)} - \frac{33,16.esp}{(\mp 5,84)} - \frac{20,76T.trinca}{(\mp 1,62)} + \frac{80,96.Class.Ades}{(\mp 12,00)}$$

Neste modelo se observa que a espessura e a trinca atuam negativamente (sinais negativos dos parâmetros) enquanto que o tipo de adesivo contribui positivamente ao valor da força de aderência. A variável espessura impactou mais negativamente do que a espessura da trinca.

O coeficiente de Fisher (80,72) indica que a qualidade do modelo global é significativo.

Com relação à tenacidade (E) têm-se:

$$E = 111 - 4,09.Esp - 1,24T.trinca + 8,97.Class.Ades \quad (4)$$

$$Energia \left(\frac{N}{mm^2} \right) = \frac{111}{(\mp 3,86)} - \frac{4,09.esp}{(\mp 0,72)} - \frac{1,24T.trinca}{(\mp 0,20)} + \frac{8,97.Class.Ades}{(\mp 1,47)}$$

Coeficiente de Fisher 36,11 e R² 0,84.

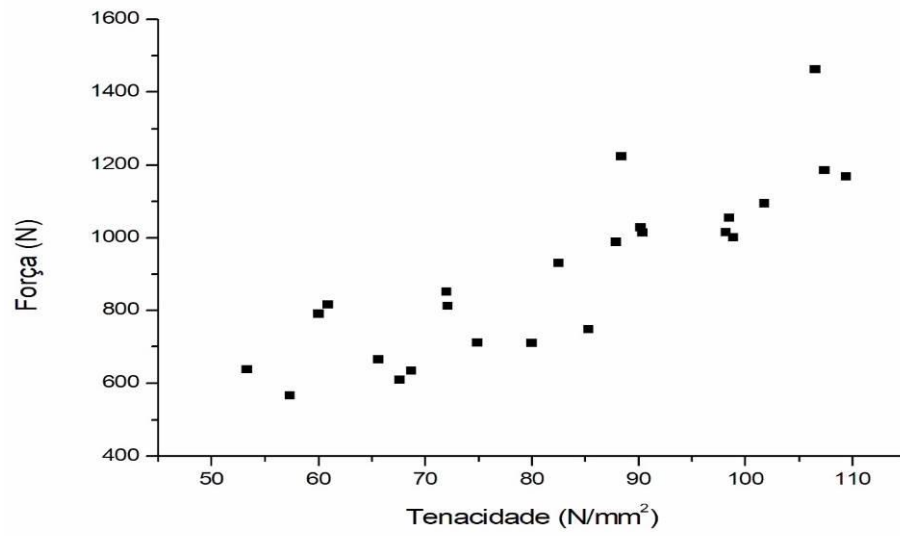
Em ambas equações (Força e Tenacidade) observa-se a mesma tendência de que a espessura e o tamanho da trinca influenciam negativamente a resistência de aderência do conjunto submetido ao modo misto de tensões. Da mesma maneira que o tipo do adesivo (AC II ou AC III) teve uma atuação positiva na análise.

Entende-se também que os coeficientes de correlação podem ser melhorados substituindo-se a variável qualitativa (Class. Ades) por uma grandeza quantitativa, por exemplo, o coeficiente 8,97 que está associado ao parâmetro do tipo de argamassa, cujos valores qualitativos são -1 e +1, pode ser mais significativo se este parâmetro for substituído por algum dado quantitativo que esteja relacionado à aderência, como talvez o teor de algum componente químico presente na cola, perspectiva esta que não foi abordada nesta pesquisa.

É importante dizer que neste caso, a energia (E) refere-se à capacidade elástica pré-dano enquanto que a força de ruptura (F) se refere a energia necessária para a propagação de uma trinca de dado tamanho.

No Gráfico 40, percebe-se uma boa correlação entre os valores de força e tenacidade a partir das 24 famílias deste estudo.

Gráfico 40 - Força x Tenacidade das 24 Famílias estudadas.



Fonte: autora.

CAPÍTULO 05

CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÕES

Dentro do objetivo da pesquisa que consiste em contribuir com o entendimento da influência da área de contato na aderência da interface argamassa colante-cerâmica, são apresentadas as seguintes conclusões:

a) Aspectos gerais:

- o ensaio de propagação da primeira fissura em modo misto de tensões mostrou-se aplicável para a determinação da resistência de aderência na interface de revestimentos cerâmicos colados com adesivos cimentícios;
- os resultados de aderência obtidos através do ensaio de tração direta são em cerca de 60% maiores que os resultados obtidos através do ensaio de modo misto nas argamassas AC II e AC III;

b) Influência da extensão de falha:

- de modo geral, a resistência de aderência na interface argamassa colante-cerâmica das amostras ensaiadas decresce à medida que a falha de extensão da argamassa colante aumenta, apresentando perda de aderência de até 44,2% e 51,4% (AC II e AC III, respectivamente);
- os corpos de prova confeccionados com falha induzida de 20 mm apresentaram as maiores reduções de resistência tanto para a argamassa AC II quanto AC III, ratificando a influência da área de contato na resistência de aderência dos revestimentos colados;

c) Influência do tipo de argamassa colante:

- a resistência de aderência verificada tanto pelo ensaio de tração direta quanto pelo ensaio de propagação da primeira fissura (modo misto), apresentou resultados maiores para a argamassa colante AC III com relação aos resultados da argamassa AC II;

d) Influência da espessura de argamassa:

- a medida que a espessura do adesivo aumentou, observou-se uma sensível queda da resistência em ambas as argamassas, confirmando os resultados obtidos por Rêgo (2008) para adesivos de base cimentícia.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Através do estudo da influência da área de contato na aderência da interface argamassa colante/cerâmica, sugere-se alguns assuntos para futuras pesquisas, que seriam enriquecedoras para um melhor conhecimento do tema:

- estudar a influência da extensão de aderência para diferentes tipos de revestimentos cerâmicos e argamassas colantes;
- avaliação dos mecanismos de adesão de substratos cerâmicos sob efeito de ciclagem térmica;
- criação de modelos numéricos de interface aplicados ao envelhecimento de colagem em substratos cerâmicos com materiais cimentícios.

REFERÊNCIAS

ABREU, M.M.M. **Modelação do comportamento de revestimentos cerâmicos**. 2001. 194 p. Dissertação (mestrado). Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2001.

ABREU, M.; LEITÃO, V.; LUCAS, J.C. “**Modeling the Behavior of Ceramic Tile Coverings**”, VIII World Congress on Ceramic Tile Quality – Qualicer, Castellón: (Espanha), p. 3. 2004.

AKIAMA, S. Y; MEDEIROS, J. S; SABBATINI, F. H. **Flexibilidade de argamassas adesivas**. II Simpósio brasileiro de tecnologia de argamassas. II SBTA. Salvador. 1997.

ALGARVE, V.R.; CAVALCANTI, I.F.A. **Características da circulação atmosférica associadas à ocorrência de geadas no sul do Brasil**. Congresso Brasileiro de Meteorologia, 8:545-547. Belo Horizonte MG. Anais II. 1994.

ALVES, N.J.D. **Avaliação dos aditivos incorporadores de ar em argamassas de revestimento**. Dissertação de mestrado do programa de pós-graduação em estruturas e construção civil, Universidade de Brasília, 175 p. 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - **ASTM D1079-02: standard terminology relating to roofing, waterproofing, and bituminous materials**. West Conshohocken, ASTM, 2002.

ANDERSON, T. L. **Fracture Mechanics - Fundamentals and Applications**. 3. ed. CRC Press Publishers. 2005.

ANTUNES, G. R. **Estudo de manifestações patológicas em revestimentos de fachada em Brasília – sistematização da incidência de casos**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Distrito Federal. 2010.

ARAÚJO, Marcia Regina Alves Boeckmann de. **Tecnologia dos revestimentos em cerâmica e pastilhas em porcelana, utilizados em fachada de edifícios residenciais**. Coordenação Setorial de Pós-graduação e Pesquisa, UPE / POLI. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13528: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Determinação da resistência de aderência à tração**. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13529: Revestimentos de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Terminologia**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13755: Revestimentos cerâmicos de fachadas e paredes externas com utilização de argamassa colante - Projeto, execução, inspeção e aceitação – Procedimento.** Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13818: Placas cerâmicas para revestimento – Especificação e métodos de ensaio.** Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14081: Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas Parte 3: Determinação do tempo em aberto.** Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4287: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade.** Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 8404: Indicação do estado de superfícies em desenhos técnicos – Procedimento.** Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTO. **Números do Setor, 2016.** Disponível em: <<http://www.anfacer.com.br/>> Acesso em 26 de Julho de 2017.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTO. **Especificação de placas cerâmicas.** Disponível em: <<http://www.anfacer.org.br/>> Acesso em 08 de maio de 2017.

BAUER, E. **Revestimentos de argamassa – características e peculiaridades.** Brasília : LEM-UnB; Sinduscon, 92p. 2005.

BAUER, E.; CASTRO, E. K.; SILVA, M.N.B. **Estimativa da degradação de fachadas com revestimento cerâmico: estudo de caso de edifícios de Brasília.** Revista Cerâmica, volume 61, nº 358, p 151-159. São Paulo, 2015.

BOWMAN, R.; WESTGATE, P. **Natural Moisture Behaviour of Typical Australian Ceramic Tiles. Ceramic, Adding the Value.** AUSTCERAM 92, Editora M. J. Bannister, CSIRO Publications. 1992.

CALLISTER JR., WILLIAM D. **Ciência Engenharia de Materiais – Uma Introdução.** Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CAMPANTE, E. F.; BAÍA, L. L. M. **Projeto e execução de revestimento cerâmico.** São Paulo. O nome da rosa, 2003.

CAMPOS, M. DE O. **Estudo da resistência de aderência à tração e ao cisalhamento de revestimentos de argamassa em substratos de concreto.**

Dissertação de mestrado do programa de pós-graduação em geotecnia, estruturas e construção civil da Universidade Federal de Goiás, 2014, 156 p.

CARASEK, H. **Aderência de argamassas à base de cimento Portland a substratos porosos: avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação.** Tese de doutorado do programa de pós-graduação em construção civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1996, 285 p.

CARASEK, H.; CASCUDO, O.; SCARTEZINE, L. M. **Importância dos materiais na aderência dos revestimentos de argamassa.** In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 4, 2001, Brasília. SBTA, 2001.

CARASEK, H.; DJANIKIAN, J. G. **Aderência de argamassas a base de cimento Portland a unidades de alvenaria.** Boletim Técnico BT/PCC/179 da escola politécnica da USP. São Paulo, 1997.

CARASEK, H.; JAPIASSÚ, P.; CASCUDO, O.; VELOSA, A. Bond between 19th Century lime mortars and glazed ceramic tiles. **Construction & Building Materials**, v. 59, p. 85-98, 2014.

CHABOCHE J.L.; FEYEL, F.; MONERIE, Y. **Interface debonding models: a viscous regularization with a limited rate dependency.** International Journal of Solids and Structures, 38 (18): 3127-3160, 2001.

CHAMPANEY, L. VALOROSO, N. **A damage model for simulation decohesion in adhesively bonded assemblies.** European Congresso on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering. ECCOMAS 2004, Jyvaskyla, Finland, 24-28 July, 2004.

CHEW, M. Y. L. (1992), **“The Study of Adhesion Failure of Wall Tiles”**, Building and Environment, v 27, nº4, pp. 493-499.

CERVO, T.C. **Estudo da resistência à fadiga de concretos de cimento Portland para pavimentação.** Tese de doutorado do programa de pós-graduação em construção civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004, 220 p.

CINCOTTO, M. A., SILVA, M. A. C., CARASEK, H. **Argamassas de Revestimento: Características, Propriedades e Métodos de Ensaio.** Boletim 68 – IPT, São Paulo. 1995.

CORTAG. **Cortador profissional master 75.** Disponível em: <<https://www.cortag.com.br/cortador-profissional-master-75>> Acesso em: 25 de novembro de 2017.

COSTA E SILVA, A.J. **Descolamentos dos revestimentos cerâmicos de fachada na cidade do Recife.** Dissertação de Mestrado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 2001. 291p.

CZARNECKI L., GARBACZ A., KOSTANA K. **The Effect of Concrete Surface Roughness on Adhesion in Industrial Floor Systems**, 5th Industrial Floors, Esslingen (2003).

DA SILVA, D. A.; ROMAN, L. M. F.; ROMAN, H. R. (1998). **Tensões térmicas em revestimento cerâmico**. Núcleo de pesquisa em construção (NPC) – Universidade Federal de Santa Catarina, SC.

DAS CHAGAS, S. V. M. (2009) **Estudo e proposta de um modelo de resistência à fadiga de argamassas de revestimento em estado plano e tridimensional de tensões**. Dissertação de mestrado em estruturas e construção civil, publicação E.DM – 015 A/09, Departamento de engenharia civil e ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 172.

DE BARROS, S. **Modèle d'interface pour la simulation du comportement des assemblages collés**. Tese de doutorado pela Universidade de Versailles – França, 2005.

DO Ó, S. W. **Análise da retenção de água em argamassas de cimento aditivadas**. Dissertação de mestrado em estruturas e construção civil, Publicação E.DM 015 A/09, Departamento de engenharia civil e ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2004, 173p.

ELIANE. **Agata White**. Disponível em:
<<http://www.eliane.com/produtos/?page=1&navbar=S&tipo=PISO&estilo=Marmorizado&nome=>> Acesso em: 15 de julho de 2017.

ESQUIAVEL, J.F.T.; BARROS, M.M.S.B. **Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP**, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/538, 31 p, São Paulo, 2009.

FIORITO, A. J. S. I. (1994). **Manual de Argamassa e revestimento – Estudo e procedimento de execução**. Editora Pini, São Paulo, SP.

FRANCO, L.S. **O desempenho estrutural e a deformabilidade das vedações verticais**. In: Seminário Tecnologia e Gestão na Produção de Edifícios: vedações verticais. p. 95-112. Anais. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.

GARBACZ, A.; COURARD, L.; KOSTANA, K. **Characterization of concrete surface roughness and its relation to adhesion in repair systems**. Materials Characterization. V. 56, 2006.

GASPAR, P.; BRITO, J. de. **Mapping Defect Sensitivity in External Mortar Renders**. Journal of Construction and Building Materials, v. 19(8), 2005, p. 571-578.

GLEICH, D.M., VAN TOOREN, M.J.L., BEUKERS, A. **Analysis and evaluation of bondline thickness effects on failure load in adhesively bonded structures.** Journal of Adhesion Science and Technology, v 15, pág. 1091-1101, 2001.

GONÇALVES, S.R.C. **Variabilidade e fatores de dispersão da resistência de aderência nos revestimentos de argamassa – estudo de caso.** 2004. 148p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Brasília, Brasília.

G1 SÃO PAULO. **Problema em revestimento de prédio assusta moradores de Pirituba.** Disponível em: <<http://g1.globo.com/sao-paulo/noticia/2010/09/problema-em-revestimento-de-predio-assustam-moradores-de-pirituba.html>>. 2010. Acesso em: 13/03/2018.

JC ONLINE. **Parte de fachada de prédio cai e bloqueia trânsito no centro do Recife.**

Disponível em: <<http://jconline.ne10.uol.com.br/canal/cidades/jc-transito/noticia/2018/03/12/parte-de-fachada-de-predio-cai-e-bloqueia-transito-no-centro-do-recife-330967.php>> Acesso em: 15/03/2018.

JENNI, A; ZURBRIGGEN, R; HOLZER, L; HERWEGH, M. **Influence of polymerer on microstructure and adhesive strength of cementitious tile adhesive mortars.** Cement and Concrete Research. Volume 36. 2005.

JUNGIGER, MAX. **Rejuntamento de Sistema Cerâmico: Influência das Juntas de Assentamento na Estabilidade de painéis.** Dissertação de Mestrado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 2003. 141p.

KAZMIERCZAC, C.S.; BREZEZINSKI, D.E.; COLLATTO, D. **Influência das características da base na resistência de aderência à tração e na distribuição de poros de uma argamassa.** Revista estudos tecnológicos, v. 3, n.1, p. 47-58, jan./jun. 2007.

KINGERY, W.D. **Factors affecting thermal stress resistance of ceramics materials.** Journal of the American Ceramic Society. Easton, v. 38, n. 1, p. 3-15, 1955.

KINGERY, W.D. **Introduction to ceramics.** J. Wiley & Sons, Inc. New York, 1960. 781p.

MACIEL, L.L.; BARROS, M.M.S.B; SABBATINI, F.H. **Recomendações para a execução de revestimentos de argamassa para paredes de vedação internas e exteriores e teto.** São Paulo: EPUSP, 1998. (Apostila do programa de construção civil).

MACIEL, L.L.; SABBATINI, F.H. **Projeto e execução de revestimento de argamassa.** 5º Ed. Editora O Nome da Rosa. São Paulo, 2016.

MAGGI, P.L.O. **Comportamento de pavimentos de concreto estruturalmente armados sob carregamentos estáticos e dinâmicos**. Tese de doutorado da escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2004, 200 p.

MANDAI, J.T. **Determinação dos Parâmetros para Crescimento de Trincas em Ligas Metálicas: Modelagem e Experimentação**. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Publicação ENM.DM-150^a/10, Departamento de Engenharia Mecânica, Univesidade de Brasília, Brasília, DF, 2010. 158p.

MANSUR, A. A. P. **Mecanismo físico-químico de aderência na interface argamassa modificada com polímeros/cerâmica de revestimento**. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2007.

MANSUR, A. A. P.; DO NASCIMENTO, O. L.; MANSUR, H. S., “**Mapeamento de Patologias em Sistemas de Revestimento Cerâmico de Fachadas**”, Construindo, v. 4, n. 01, p. 64. 2012.

MEDEIROS, A. **Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras**. Tese de doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 201p.; Rio de Janeiro, Brasil; 2012.

MEDEIROS, J. S. **Tecnologia e projeto de revestimento cerâmico de fachada**. Tese (Doutorado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.

MEDEIROS, J.S.; SABBATINI, F.H. **Tecnologia e projeto de revestimentos cerâmicos de fachadas de edifícios**. Boletim técnico da escola politécnica da USP, departamento de engenharia e construção civil, BT/PCC/246. São Paulo: EPUSP, 1999. 28 p.

MENDES, T. M. **Influência do coeficiente de atrito entre os agregados e da viscosidade da matriz no comportamento reológico de suspensões concentradas heterogêneas**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP. São Paulo (SP). 2008.

MI, Y., M.A., CRISFIELD, G.A.O., DAVIES, H.B. HELLWEG. **Progressive delamination using interface elements**. J. Composite Materials, 32 (14): 1246-1272, 1998.

MORENO JUNIOR, R.; SELMO, S. M. de S. **Aderência de argamassas de reparo de estruturas de concreto**. Boletim técnico da escola politécnica da USP. São Paulo, 2007.

NAKAKURA, E.H.; CINCOTTO, M.A. **Análise dos requisitos de classificação de argamassas de assentamento e revestimento**. Boletim técnico da escola politécnica da USP, departamento de engenharia e construção civil, BT/PCC/359. São Paulo: EPUSP, 200. 19 p

NASCIMENTO, A. N. S. **Efeito da espessura do adesivo na resistência de juntas de sobreposição simples, na ligação materiais compósitos**. Dissertação de

mestrado apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto – Departamento de Engenharia Mecânica. Porto, 2013.

NOGAMI, L. Fixação de placas de rochas ornamentais: Estudo da aderência com argamassa colante. Mestrado em Geotecnia. Universidade de São Paulo - USP. Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 2007.

PAES, I.N.L. Avaliação do transporte de água em revestimentos de argamassa nos momentos iniciais pós-aplicação. Tese de doutorado do programa de pós-graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, 2004, 242 p.

PAGNUSSAT, D. T. Contribuição para o entendimento dos mecanismos microestruturais de aderência de argamassas de revestimento em substratos porosos. Proposta de tese (Doutorado em Construção Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008. 112p.

PARRA, B. S.; GENNARI, R. C.; MELCHIADES, F. G; BOSCHI, A. O. Rugosidade superficial de revestimentos cerâmicos. Cerâmica Industrial, Volume 11, número 2, Março/Abril, p 15-18. 2006.

PASTOUKHOV, V. A. e VOORWALD H. J. C. “Introdução à Mecânica da Integridade Estrutural” Editora Unesp, São Paulo, Brasil, 1995.

PORTOKOLL. Argamassa especial cerâmicas flex. Disponível em: <<http://portokollpremium.com.br/produtos/complementos/argamassa-especial-ceramicas-flex>> Acesso em: 15 de outubro de 2017.

PRETTO, M.E.J. Influência da rugosidade gerada pelo tratamento superficial do substrato de concreto na aderência do revestimento em argamassa. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007. 180p.

RECENA, F. A. P. Conhecendo argamassa. EDiPUCRS, Porto Alegre, 2008.

RÊGO, S.R. Aderência de placas cerâmicas submetidas a variações térmicas cíclicas. Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, 2008.

SABBATINI, F. H. As fissuras com origem na interação vedação estrutura. In: Seminário Tecnologia e Gestão na Produção de Edifícios: vedações verticais. Anais. p. 169-188 Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.

SANTOS, N. Avaliação de micro e nanoporosidade de argamassas colantes. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis (SC), 2006.

SARAIVA, A. G. **Contribuição ao estudo de tensões de natureza térmica em sistema de revestimento cerâmico de fachada.** Dissertação de mestrado apresentada à faculdade de tecnologia de Brasília, Brasília, DF. 1998.

SARAIVA, A. G.; BAUER, E.; BEZERRA, L. M. **Análise das tensões entre argamassa colante e placas cerâmicas submetidas a esforços de natureza térmica.** Revista Ambiente Construído, v. 2, n. 2, pp. 47-56. 2001.

SARAIVA, A. G.; BAUER, E.; BEZERRA, L. M. **Efeito de temperatura nas tensões em sistema de revestimento cerâmico de fachadas.** Volume II dos Anais do III Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassa, Vitória, ES. 1999.

SARAIVA, A. G.; BAUER, E.; BEZERRA, L. M. **Desempenho estrutural de argamassas colantes como subsídio para solução de problemas patológicos.** Volume II dos Anais do IV Congresso Ibero-americano de Patologia das Construções e VI Congresso de Controle de Qualidade, Porto Alegre, RS. p. 427 – 432. 2001.

SELMO, S. M. S. **Dosagem de argamassas de cimento Portland e cal para revestimento externo de fachadas dos edifícios.** 1989. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989.

SELMO, S.M.S. **Revestimentos de argamassas de paredes e tetos de edifícios – Projeto, execução e manutenção curso intensivo de argamassa de assentamento e revestimento.** Associação Brasileira de Cimento Portland. 1996.

SILFWERBRAND, J.; BEUSHAUSEN, H.; COURARD, L. **Bond.** In: BISSONNETTE, B.; COURARD, L.; FOWLER, D. W.; GRANJU, J. **Bonded cement-based material overlays for the repair, the lining or the strengthening of slabs and pavements.** RILEM, 2011. p. 51-79.

SILVA, C.O. **Análise crítica dos requisitos e critérios de qualidade da argamassa colante.** Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL NO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Placas cerâmicas para revestimento.** (Programa Qualimat Sinduscon – MG) 24p. Belo Horizonte: SINDUSCON - MG, 2009.

SOARES, A. P. O. A. L. **Determinação da tenacidade à fratura de adesivos estruturais em modo misto pelo ensaio Single-Leg Bending.** Dissertação de mestrado apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto – Departamento de Engenharia Mecânica . Porto, 2015.

STOLZ, C. M.; PAGNUSSAT, D. T.; KIRCHHEIM, A. P.; MASUERO, A. B. **Influência da alteração da macro-rugosidade de um substrato de concreto na resistência de aderência de revestimentos de argamassa.** In: IX Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, Belo Horizonte, 2011.

TAYLOR ROBSON. **Talysurf CCI**. Disponível em:
<https://taylorhobson.es/pt-pt/dt_portfolio/talysurf-cci-3/>
Acesso em: 23 de novembro de 2017.

TOLEDO, LEONARDO BENTO FERREIRA DE. **Patologia em revestimentos cerâmicos de fachadas de edifícios estudo regionalizado para a cidade de Divinópolis – MG**. Dissertação de mestrado apresentada a Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de engenharia de materiais e construção civil. Minas Gerais, 2007.

UCHÔA, JOÃO CARLOS BARLETA. **Análise Numérica e Experimental da Fadiga Termomecânica em Argamassas Colantes no Sistema de Revestimento Cerâmico**. Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Distrito Federal, 2015.

UFPR. **Controles da temperatura**. Disponível em:
< <http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap3/cap3-5.html>> Acesso em: 10 de outubro de 2017.

VALENTINI, P.; KAZMIERCZAK, C.S. **Avaliação da aderência de placas cerâmicas aplicadas como revestimento de fachada**. Revista ALCONPAT, V 06, N 02, p 116-128, Maio – Agosto, 2016.

WETZEL, A; HERWEGH, M; ZURBRIGGEN, R; WINNEFELD, F. **Influence of shrinkage and water transport mechanisms on microstructure and crack formation of tile adhesive mortars**. Cement and Concrete Composites. Volume 42. p 39-50. 2012.

ZHANG, B.; PHILLIPS, D. V.; WU, K. **Effect of loading frequency and stress reversal of fatigue life of plain concrete**. Magazine of Concrete Research, v. 48, n. 177, p. 371 – 375, 1996.