

DAISY MARIA PINHEIRO DE SOUZA ANDRADE

**ESTUDO DE UMA NOVA GEOMETRIA DE PLACA DE GRANITO PARA  
REVESTIMENTO DE FACHADAS: SIMULAÇÃO PELO MÉTODO DOS  
ELEMENTOS FINITOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre. Área de Concentração: Tecnologia da Construção e Estruturas

Orientador: Orlando Celso Longo, D.Sc  
Co-Orientador: Gilberto Adib Couri, D.Sc

Niterói  
2017

Ficha Catalográfica elaborada pela Biblioteca da Escola de Engenharia e Instituto de Computação da UFF

A553 Andrade, Daisy Maria Pinheiro de Souza

Estudo de uma nova geometria de placa de granito para revestimento de fachadas : simulação pelo método dos elementos finitos / Daisy Maria Pinheiro de Souza Andrade. – Niterói, RJ : [s.n.], 2017.

104 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal Fluminense, 2017.

Orientadores: Orlando Celso Longo, Gilberto Adib Couri.

1. Tecnologia da construção. 2. Granito. 3. Método dos elementos finitos. I. Título.

CDD 690

DAISY MARIA PINHEIRO DE SOUZA ANDRADE

**ESTUDO DE UMA NOVA GEOMETRIA DE PLACA DE GRANITO PARA  
REVESTIMENTO DE FACHADAS: SIMULAÇÃO PELO MÉTODO DOS  
ELEMENTOS FINITOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil. Área de Concentração: Tecnologia da Construção e Estruturas

Aprovada em 14 de março de 2017.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Orlando Celso Longo, D.Sc.- Orientador  
Universidade Federal Fluminense

---

Prof. Gilberto Adib Couri, D.Sc.- Co-Orientador  
Universidade Federal Fluminense

---

Prof<sup>a</sup>. Simone Feigelson Deutsch, D.Sc.  
Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro

Niterói  
2017

## **PENSAMENTO**

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê”. (ARTHUR SCHOPENHAUER)

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus amados pais (*in memoriam*) Marina e Jair Fernando, pelo exemplo de amor, integridade e doação, responsáveis pelo melhor de mim.

## AGRADECIMENTOS

Acima de tudo, minha gratidão a **DEUS**, que me honra com **SUA** Presença, **SUA** Interseção, **SUA** Orientação.

À minha amada e linda filha Isabella, pela compreensão na ausência por esta causa, pelo estímulo, admiração e carinho.

Ao mestre Gilberto Adib Couri, por sua generosidade em compartilhar experiências, doar seu tempo e conhecimento, por sua amizade, orientação e incentivo a trilhar os caminhos desta honrosa missão.

Ao professor Orlando Celso Longo, meu orientador, pela dedicação e motivação, disponibilidade e amabilidade durante o percurso das pesquisas.

Ao professor Gabriel Nascimento, pela contribuição técnica, sem a qual este trabalho não estaria substanciado, minha gratidão pela parceria, doação e amizade.

À professora Simone Feigelson Deutsch, por participar da banca examinadora, facultando seu tempo e dedicação na análise do trabalho, aos proficientes comentários que enriqueceram o projeto.

Ao meu amigo e parceiro de trabalho, Arquiteto Delcio Garcia de Sousa, pelo estímulo e pela admiração sempre demonstrados e sua incansável contribuição nas pesquisas.

À professora e amiga, Engenheira Miriam Nóbrega, por sua dedicação, profissionalismo e doação, minha gratidão.

Ao Engenheiro e amigo, João Paulo Dandoulakis que, com sua experiência, orientou as prioridades acadêmicas e colocou-me ao encontro de pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao professor Francisco Xavier, pelo apoio e parceria.

À professora Níssia Bergiante por sua orientação e generosidade em dividir seu conhecimento.

À equipe da secretaria do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense pelo apoio, disponibilidade e atenção dedicados.

Àqueles tantos outros que surgiram no caminho e generosamente, agregaram seu conhecimento, dedicação, experiências e carinho, sintam-se abraçados.

## RESUMO

Dentre os materiais utilizados para revestimento de fachadas, as placas pétreas ainda lideram a preferência na hora da escolha, por motivos estéticos somados ao aspecto de imponência e segurança característicos do material. Embora a sua utilização venha de longa data, pesquisas científicas sobre as propriedades do mármore e do granito começaram ao fim do século XIX tendo como resultado uma revisão dos pressupostos antigos para uma melhor adequação às novas exigências de mercado e de materiais. A espessura das placas passou a ser reduzida, os grampos passaram a ser inoxidáveis, as argamassas de assentamento passaram a ser industrializadas absorvendo melhor a movimentação. Apesar da sua utilização ter se mostrado satisfatória na grande maioria dos casos em que foram utilizados e apesar do grande desenvolvimento científico observado, placas pétreas ainda possuem a tendência de se desgastarem ao longo do tempo devido a uma grande variedade de fatores como as condições climáticas agressivas, ambiente poluídos ou pela utilização de procedimentos construtivos ou de manutenção inadequados. Tais fatores terminam por gerar problemas que incluem a expansão do material, perda de resistência e em casos mais dramáticos, um completo desprendimento do sistema de fixação. Tendo em vista a sua importância estética, funcional e financeira, a identificação de patologias em revestimentos pétreos, suas causas, natureza, origem, bem como os procedimentos executivos têm sido de grande interesse para a indústria da construção civil. A proposta deste trabalho consiste na simulação de novas geometrias de placas pétreas, em “L” e em “S” pelo Método de Elementos Finitos (MEF), utilizando o *software* ANSYS®, num estudo de intertravamento de placas e promoção de maior grau de aderência, a serem utilizadas em revestimentos de fachadas de prédios com o objetivo de aumentar o grau de segurança no processo tradicional com placas aderidas na base. Foram escolhidos três tipos de granito: Vermelho Brasília, Preto Indiano e Verde Labrador por suas características físico-mecânicas já conhecidas e atendendo aos requisitos da ABNT NBR 15844:2010b e sua aceitação no mercado. Foram considerados valores de referências da ação do vento e seu estado limite último. Os resultados obtidos demonstraram um percentual de ganho de qualidade nas características de aderência nestas novas geometrias, quando comparadas com as placas de geometria retangular, de uso consolidado. Este estudo objetiva a avaliação de desempenho, nas condições impostas nas simulações realizadas com a utilização deste *software*.

Palavras-chave: Revestimentos de fachadas em placas pétreas, descolamentos de placas pétreas em fachadas, sistema de fixação direta, Método dos Elementos Finitos, ANSYS®

## ABSTRACT

Among the materials used for cladding, granite boards still lead the preference at the time of choice, for aesthetic reasons added to the aspect of impressiveness and safety characteristic of the material. Although your use come from a long date, scientific research on the properties of marble and granite began the end of the 19TH century resulting in a revision of the old assumptions for a better adaptation to new market requirements and materials. The thickness of the plates began to be reduced, the clips were stainless, the settlements mortars have become industrialized absorbing better a movement. Despite your use have proven satisfactory in most cases in which they were used and despite the great scientific development observed, granite boards still have the tendency to wear over time due to a variety of factors such as the aggressive climatic conditions, polluted environment or by the use of construction procedures or inadequate maintenance. These factors end up generating problems that include the expansion of the material, loss of strength and in more dramatic cases, a complete detachment of the clamping system. With a view to your aesthetic, functional and financial importance, the identification of diseases in granite coatings, its causes, nature, origin, as well as the executive procedures have been of great interest to the construction industry. The purpose of this work is to simulation of new geometries of granite boards, in "L" and "S" by the Finite Element Method (MEF), using the ANSYS software ®, a study of interlocking boards and promotion of greater degree of adhesion, to be used in coatings of façades of buildings with the objective of increasing the degree of safety in traditional process with boards attached at the base. Three types of granite were chosen: Red Brasilia, Indian Black and Labrador Green for its known physical-mechanical characteristics and taking into account the requirements of ABNT NBR 15844:2010b and your acceptance on the market. Were considered wind action references values and in your last limit State. The results obtained showed a percentage of quality gain in adhesion characteristics in these new geometries, when compared with the rectangular geometry, consolidated usage. This study aims to performance evaluation, in accordance with the conditions imposed in the simulations carried out with the use of this software.

**Keywords:** coatings of façades in granite boards, displacement of granite boards in facades, direct fixation system, Finite Element Method, ANSYS

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>14</b>
1.1 QUESTÃO DA PESQUISA .....	20
1.2 OBJETIVOS.....	20
<b>1.2.1 Objetivo Geral .....</b>	<b>20</b>
<b>1.2.2 Objetivos Específicos.....</b>	<b>21</b>
1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA.....	21
1.4 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO.....	22
1.5 ESTRUTURA DA PESQUISA.....	22
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>24</b>
2.1 FIXAÇÃO DE PLACAS PÉTREAS EM FACHADAS.....	24
2.2 ROCHAS .....	47
<b>2.2.1 Rochas Naturais e Suas Características .....</b>	<b>47</b>
2.2.1.1 Rochas Ígneas .....	48
2.2.1.2 Textura e Composição Mineral .....	49
2.2.1.3 Classificação das Rochas Ígneas .....	50
2.3 CARACTERÍSTICAS DAS ROCHAS .....	50
<b>2.3.1 Granitos .....</b>	<b>53</b>
2.3.1.1 Características Petrográficas do Granito Vermelho Brasília.....	55
2.3.1.2 Características Petrográficas do Granito Preto Indiano.....	56
2.3.1.3 Características Petrográficas do Granito Verde Labrador.....	57
<b>3 PATOLOGIA.....</b>	<b>59</b>
3.1 PATOLOGIA DE DESCOLAMENTO .....	59
3.2 FATORES QUE INTERFEREM NO DESCOLAMENTO DE PLACAS DE GRANITO ADERIDAS .....	60
<b>3.2.1 Rejunte e Juntas .....</b>	<b>66</b>
<b>4. METODOLOGIA.....</b>	<b>71</b>
4.1 TRABALHOS DESENVOLVIDOS COM A UTILIZAÇÃO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA COM PLACAS DE ROCHAS EM REVESTIMENTO DE FACHADAS E ARGAMASSAS DE REVESTIMENTOS.....	71
4.2 GEOMETRIA DAS PLACAS DE GRANITO.....	74
4.3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO .....	76
4.4 DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO – MALHA GERADA .....	78
4.5 CONDIÇÕES DE CONTORNO E CARREGAMENTOS.....	79
4.6 SIMULAÇÃO 1 .....	80
4.7 SIMULAÇÃO 2 .....	81
4.8 ANÁLISE FINAL .....	83
<b>5 ESTUDO DE CASOS.....</b>	<b>86</b>
5.1 CASO 1 .....	86
5.2 CASO 2 .....	88
<b>5.2.1 Granito Vermelho Brasília .....</b>	<b>88</b>
<b>5.2.2 Granito Preto Indiano.....</b>	<b>90</b>
<b>5.2.3 Granito Verde Labrador .....</b>	<b>91</b>
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>93</b>
6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTURO.....	93
6.2 CONCLUSÃO.....	94
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>95</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figural: Finland Hall in Helsinki (APRIL 1998), with evidence of bowing of the marble panels.....	16
Figura 2: Sistema de fixação de placas pétreas por colagem e auxílio de grampos (sistema racionalizado) .....	24
Figura 3: Camadas do sistema de revestimento em placas pétreas por colagem .....	29
Figura 4: Tensões cisalhantes .....	29
Figura 5: Flexão nas placas por ancoragem.....	30
Figura 6: Revestimento solicitado à compressão .....	31
Figura 7: Fatores que exercem influência na aderência sobre bases porosas.....	33
Figura 8: Causas extrínsecas que interferem na resistência de aderência e degradação das placas pétreas em fachadas .....	34
Figura 9 (a), (b) e (c) – Granitos.....	36
Figura 10: Sistema de revestimento sujeito à cisalhamento simples.....	39
Figura 11: Sistema de revestimento sujeito à tensão de compressão .....	39
Figura 12: Revestimento solicitado à compressão por tração .....	40
Figura 13: Detalhe de sistema de suporte com fixação de elementos verticais e horizontais ..	41
Figura 14: Detalhe de calha na pedra para colocação do clip de suporte .....	41
Figura 15: Fixação mecânica de Halfen, modelo HRC .....	42
Figura 16: Planejamento de Sistemas de Fachadas .....	43
Figura 17: Vista da fachada do ed. Marques dos Reis.....	46
Figura 18: Detalhe de placa pétrea (granito) escorada. ....	46
Figura 19: Fachada lateral do edifício Marques dos Reis .....	47
Figura 20: Placa de granito da fachada fraturada por impacto .....	61
Figura 21: Trinca em placas de granito de fachada .....	61
Figura 22: Placas de granito com manchas .....	62
Figura 23: Placas de granito com manchas .....	63
Figura 24:- Processo de Evolução da Fadiga.....	64
Figura 25: Ações dinâmicas que provocam vibrações e possíveis patologias nas construções	65
Figura 26: Bom acabamento de rejunte na junta de dilatação.....	68
Figura 27: Disposição do selante e limitador de profundidade .....	68
Figura 28: Detalhe de encontro entre placas de parede e piso/ parede e teto .....	69
Figura 29: Gráfico de patologias associadas ao método de fixação direta (MFD).....	70
Figura 30: Gráfico de patologias associadas ao método de fixação indireta (MFI). ....	70
Figura 31: Gráfico de atividades de pesquisa.....	73
Figura 32: Gráfico das Isopletas da Velocidade Básica do Vento .....	74
Figura 33 (a), (b) e (c): Modelos e dimensões das placas granito nas formas retangular, em “L” e em “S”.....	75
Figura 34: Geometria tridimensional da parede (placas retangulares) .....	76
Figura 35 (a), (b) e (c) – Discretização do domínio em elementos finitos .....	78
Figura 36: Elemento <i>SOLID186</i> . ....	79
Figura 37: Elemento <i>CONTA174</i> . ....	79
Figura 38: Fixação do perímetro (em azul) da camada de argamassa.....	80
Figura 39 (a) e (b) - Modelo de placas retangulares e malha de elementos .....	81
Figura 40: Placas retangulares – Descolamento total da placa com $V= 37\text{m/s}$ .....	82
Figura 41: Placa na forma em “L “ – Descolamento total da placa com $V= 39 \text{ m/s}$ .....	83
Figura 42: Placas na forma em “S” – Descolamento total da placa com $V = 41 \text{ m/s}$ .....	83
Figura 43 (a), (b) e (c): Contato definido entre placas e argamassa.....	84

Figura 44: Placa retangular - Deformada amplificada em 1500x na iminência do descolamento total .....	85
Figura 45: Placa em “L” – Deformada amplificada em 1500x na iminência de descolamento total .....	85
Figura 46: Placa em “S”- Deformada amplificada em 1500x na iminência de descolamento total .....	85
Figura 47: Placas retangulares com tração de aderência pontual. ....	86
Figura 48: Placas retangulares com tração de aderência no rejunte. ....	86
Figura 49: Placas retangulares com tensões normais (Pa).....	87
Figura 50: Placas retangulares – Tensão máxima para argamassa.....	87
Figura 51: Placas retangulares - tensão de ruptura no rejunte.....	88
Figura 52 (a), (b) e (c): Tensões (em Mpa) nas placas com deformada amplificada em 1500x .....	89
Figura 53 (a), (b) e (c): Tensões (em Mpa) no rejunte com deformada amplificada 1500x ....	90
Figura 54 (a), (b) e (C): Placas Granito Preto Indiano - Tensões nas placas nas formas retangular, em “L” e “S” .....	91
Figura 55 (a), (b) e (c): Placas Granito Verde Labrador - Tensões nas placas nas formas retangular, em “L” e “S”.....	92

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Produção Mundial de Rochas Ornamentais.....	17
Tabela 2: Maiores Produtores Mundiais de Rochas .....	18
Tabela 3: Evolução do Mercado Internacional de Rochas ornamentais para Revestimento.....	19
Tabela 4: Especificações do granito .....	27
Tabela 5: Relação do tipo rochoso e regiões produtoras. ....	36
Tabela 6: Composição mineral das rochas ígneas .....	50
Tabela 7: Valores médios de ensaio .....	55
Tabela 8: Composição Mineralógica do granito Vermelho Brasília .....	56
Tabela 9: Composição Mineralógica do granito Preto Indiano .....	57
Tabela 10: Composição Mineralógica do granito Verde labrador .....	58
Tabela 11: Classificação dos movimentos dos elementos construtivos quanto à natureza e reversibilidade .....	66
Tabela 12: Propriedades dos materiais considerados na análise .....	77
Tabela 13: Velocidades máximas de vento suportadas .....	90
Tabela 14: Resumo dos resultados para os três tipos de granitos testados.....	92

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFNOR	Association Française de Normalization
ASTM	American Society for Testing and Materials
BS	British Standard
DIN-	Deutsch Institut fur Normung
MEF-	Método dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira Registrada
PA	Produtos de Ardósia.
RCB	Rochas Carbonáticas Brutas
RPE	Rochas Processadas Especiais
RPN	Revestimento de Pedra Natural
RPS	Rochas Processadas Simples
RSB	Rochas Silicáticas Brutas
RTR	RILEM Technical Recommendation

## LISTA DE SÍMBOLOS

AA	Absorção d'água
Cpe	Coefficiente de pressão externa
CO <sub>2</sub>	Gás Carbônico
ΔT	Gradiente de temperatura [ ° C ]
pp	Peso Próprio
PA	Porosidade Aparente
Δp <sub>e</sub>	Pressão efetiva externa
T	Temperatura
V	Velocidade (m/s)
V <sub>0</sub>	Velocidade básica do vento
Vk	Vento

## 1 INTRODUÇÃO

A palavra fachada tem origem na Itália do século XIV tendo, entretanto, seu uso se tornado comum no século XV, período este conhecido como Renascimento Italiano, onde, uma revolução de conceitos estéticos foram observados. É cognato que *facciata*, palavra italiana proveniente do latim *facies*, que significa rosto, aparência, semblante. O termo é bastante apropriado, uma vez que a fachada representa a parte mais externa, exposta, em uma construção.

O primeiro documento de que se tem notícia abordando o tema fachada é o contrato do Palácio Sansedoni, de 1340 em Siena. Apesar de essencialmente gótico em suas características, o projeto prefigura objetivos estéticos do Renascimento Italiano, quando passa a fachada a ser elemento fundamental da arquitetura residencial unifamiliar.

O ponto de partida para uma nova atitude diante da fachada se dá com o Palácio de Médici (FLORENÇA, 1444). As superfícies exteriores são tratadas na sua totalidade, obedecendo uma gradação de baixo para cima, que vai do térreo, fortemente rustificado, ao topo mais leve e liso. A partir deste ponto, houve uma verdadeira revolução na construção civil, mais especificamente aos conceitos de elaboração e implementação da parte exterior das edificações. Novos materiais passam a ser utilizados. Técnicas de construção são desenvolvidas ou aperfeiçoadas. Os resultados de tais pesquisas são absorvidos e adaptados às regiões, respeitando-se as necessidades e poder de compra do contratante.

As fachadas com seu amplo espectro de possibilidades contemplam, dentre todas, o uso de pedras para revestimento agregando valor estético e funcional. A rocha ornamental, por ser material nobre, de beleza clássica, transmite sensação de segurança, rigidez e “eternidade” numa analogia com o perpétuo. Entretanto, esta segurança e durabilidade derivam não somente da rocha, mas inclusive de sua correta especificação, projeto detalhado, intervenientes climáticos, execução assertiva, métodos de aplicabilidade. Segundo Casimir (1994), as falhas não ocorrem devido a um único fator e sim da combinação de vários outros. A fachada sendo invólucro da edificação, logo contemplando função estética, sofre desgaste e degradação por estar submetida diretamente à ação do tempo (CHAVES, 2009).

As rochas são utilizadas em construções desde os primórdios do aparecimento dos seres humanos. Devido à necessidade de proteção contra ambientes externos hostis à sua existência, necessário a busca constante por abrigo que lhes proporcionasse alguma segurança e conforto. Neste sentido, pedras constituem o elemento ideal especialmente pela sua durabilidade e resistência. Com o passar do tempo, a segurança deixa de ser o único fator a ser

levado em consideração para a escolha de um abrigo; outros fatores passaram a ser levados em consideração tais quais solidez, resistência, durabilidade e beleza do abrigo. Dentro deste contexto, a concepção do exterior de uma construção, ou seja, de sua fachada, passou a ter uma importância cada vez maior.

Embora a sua utilização venha de longa data, pesquisas científicas sobre as propriedades do mármore e do granito começaram ao fim do século XIX tendo como resultado uma revisão dos pressupostos antigos para uma melhor adequação às novas exigências de mercado e de materiais. A espessura das placas passou a ser reduzida, os grampos passaram a ser inoxidáveis, as argamassas de assentamento passaram a ser industrializadas, facilitando sua utilização no canteiro de obras e consequente ganho de tempo de produção.

Ainda hoje, a pedra natural é símbolo de elegância e durabilidade. Além de desempenhar na construção civil, os requisitos de qualidade, design, durabilidade, a pedra natural agrega valores de sustentabilidade - ecológicos, por ser produzido pela natureza, reduzindo a emissão de CO<sub>2</sub>, tornando-se excelente opção perante o cenário de mudanças climáticas. Desta forma, contribui para a economia, quando utiliza pouca energia quando comparado com os processos de produção industrializados.

No entanto, apesar de sua utilização ter se mostrado satisfatória na grande maioria dos casos em que foram utilizados e apesar do grande desenvolvimento científico observado, placas pétreas possuem a tendência de se desgastarem a longo do tempo, devido à poluição e a uma grande variedade de fatores endógenos e exógenos, causando alterabilidade dinâmica em função do tempo e seus efeitos numa analogia defendida por Aires-Barros, (1991) entre o tempo e seus efeitos no homem.

Proeminentes construções como, por exemplo, o *Finlandia City Hall em Helsinki* (Figura 1) experimentaram sérios problemas com suas fachadas em placas de mármore. Neste caso, o painel da fachada teve de ser completamente substituído em 1998 acarretando um custo de aproximadamente U\$ 5 milhões de dólares (CARFAGNI, 1999).



Figura1: Finland Hall in Helsinki (APRIL 1998), with evidence of bowing of the marble panels.

Fonte: G. Royer – Carfagni /*Construction and Building Materials* 13 (1999) 449-457

Segundo o pesquisador Carlo Montani (2014), a produção mundial noticiada de rochas ornamentais e de revestimento evoluiu de 1,8 milhão t/ano, na década de 1920, para um patamar atual de 130 Mt/ano e 53,4 Mt de rochas brutas e beneficiadas foram comercializadas no mercado internacional em 2013. O notável crescimento do intercâmbio mundial fez com que as décadas de 1980 e 1990 fossem caracterizadas por muitos como a “nova idade da pedra” e o próprio setor de rochas como uma das mais importantes áreas emergentes de negócios minero-industriais. Em âmbito mundial, estima-se que o setor de rochas esteja, atualmente, movimentando transações comerciais de US\$ 130 bilhões por ano (CARLO MONTANI 2014).

A produção mundial de rochas ornamentais, no ano de 2013, totalizou 130 milhões de toneladas, envolvendo rochas carbonáticas (59%), rochas silicáticas (36,5%), ardósias (4,5%) e demais rochas xistosas, conferindo o emprego ilimitado de rochas na construção civil. A previsão para o ano de 2020 é de uma produção mundial de rochas ornamentais superior a 170 milhões de toneladas. A participação dos granitos (rochas silicáticas) na produção evoluiu de um percentual de 10% na década de 20, para um de quase 40% no panorama atual (CID CHIODO FILHO, 2014).

Tabela 1: Produção Mundial de Rochas Ornamentais

Ano	Mármore		Granitos		Outros		Total
	1.000 t	%	1.000 t	%	1.000 t	%	1.000 t
1926	1.175	65,6	175	9,8	440	24,6	1.790
1986	13.130	60,5	7.385	34,0	1.195	5,5	21.710
1998	29.400	57,6	19.000	37,3	2.600	5,1	51.000
2006	53.350	57,5	34.800	37,5	4.600	5,0	92.750
2010	65.230	58,5	40.500	36,3	5.750	5,2	111.500
2013	76.750	59,0	47.500	36,5	5.750	4,5	130.000

Fonte: Modificado de ABIROCHAS - dados compilados de Montani (2014).

Observando as projeções de consumo, produção e intercâmbio mundial das matérias-primas da construção civil, não há indícios que levam a crer numa mudança drástica deste quadro. Na verdade, todos os dados sugerem a manutenção da tendência de crescimento da demanda dos materiais rochosos naturais e artificiais para revestimento. Algumas estimativas apontam que no ano de 2020, a produção mundial de rochas ornamentais ultrapassará a casa dos 170 milhões de toneladas, correspondentes a quase dois bilhões de metros quadrados equivalentes por ano, devendo-se ainda ter incremento de 30% no volume físico das atuais transações internacionais (CHIODI FILHO, 2014).

O Brasil é tido como um dos principais participantes desse crescimento em virtude de, a partir da década de 80 colocar um grande número de novos tipos de granitos no mercado internacional. Encontra-se como 4º. colocado dentre os maiores produtores mundiais de rochas, atrás da Turquia, Índia e China (ABIROCHAS, 2014).

Tabela 2: Maiores Produtores Mundiais de Rochas

Países	1996		2013		Variação 2012/2013
	1.000 t	Participação %	1.000 t	Participação %	
China	7.500	16,1	39.500	30,4	526,7
Índia	3.500	7,5	19.500	15,0	557,1
Turquia	900	1,9	12.000	9,2	1333,0
Brasil	1.900	4,1	9.000	6,9	473,7
Itália	8.250	16,7	7.000	5,4	84,8
Iran	2.500	5,4	6.500	5,0	260,0
Espanha	4.250	9,1	5.000	3,8	117,6
Egito	1.000	2,2	3.000	2,3	300,0
EUA	1.350	2,9	2.750	2,1	203,7
Portugal	1.950	4,2	2.650	2,0	135,9
Grécia	1.800	3,9	1.250	1,0	89,4
Arábia Saudita	250	0,5	1.200	0,9	480,0
França	1.150	2,5	1.050	0,8	91,3
Paquistão	200	0,4	1.000	0,8	500,0
Subtotal	36.500	78,5	111.400	85,7	305,2
Outros	10.000	21,5	18.600	14,3	186,0
Total Mundial	46.500	100,0	130.000	100,0	279,6

Fonte: Modificado de ABIROCHAS – Montani (2014).

Segundo Chiodi Filho (2013), no Brasil, o maior parque industrial de teares multi-fio diamantado, está concentrado no Estado do Espírito Santo.

Observa-se no mercado internacional, um aumento das exportações das rochas silicáticas brutas, especialmente a China, maior exportadora de rochas processadas. Na tabela abaixo, demonstra-se o volume comercializado de rochas silicáticas ornamentais e de revestimento.

Tabela 3: Evolução do Mercado Internacional de Rochas ornamentais para Revestimento

Produtos		2009		2010		2011		2012		2013	
		1.000t	%	1.000t	%	1.000t	%	1.000 t	%	1000t	%
RSB	2516	8.909	21,7	10.531	21,7	10.945	22,1	12.576	24,2	14.970	28,1
RCB	2515	9.466	23,0	13.334	27,5	13.812	27,9	14.590	28,1	13.136	24,6
RPE	6802	18.199	44,3	20.026	41,3	20.124	40,6	20.306	39,1	21.118	39,6
RPS	6801	3.262	8,0	3.301	6,8	3.41	6,9	3.145	6,1	2.946	5,5
PA	6803	1.242	3,0	1..306	2,7	1.254	2,5	1.251	2,5	1.170	2,2
Total		41.078	100	48.498	100	49.550	100	51.868	100	53.340	100

Fonte: ABIROCHAS - compilado de Montani (2010 a 2014).

Tendo em vista a sua importância estética bem como financeira, a identificação de patologias em revestimentos pétreos, suas causas, natureza e origem, e também os procedimentos mais adequados de reparos necessários para sua correção torna-se um assunto de grande interesse para a indústria da construção civil.

As patologias das placas pétreas, restritas à sua utilização em revestimentos de fachadas dos edifícios, classificam-se segundo Ricardo (1992), em defeitos de superfície, fissuração, declinação e destacamentos. Os defeitos de superfície são àqueles originados pela ação de fatores climáticos, estes segundo Marini P. e Bellopede R. (2007), influenciam na deterioração da pedra; poluição do ambiente, características físico-química da rocha. Os três últimos, relacionam-se, ainda segundo o autor, às características geométricas da rocha, especialmente à espessura, à ligação entre as placas de rocha, o suporte, os métodos de fixação e às solicitações incidentes.

A patologia mais recorrente em fachadas com placas de pedra aderidas, são notadamente os descolamentos e as manchas na superfície, além de outras como fissuração, eflorescências e desgaste, conforme Ana Margarida Chaves (2009). A autora destaca ser o descolamento das placas pétreas como especialmente preocupante, pelo fator de alto risco de acidentes, comprometendo a segurança das pessoas e adicionalmente perda financeira. Segundo Soriano (1999), os reparos em fachadas em placas pétreas, são de custos muito elevados.

Para Antunes, Rosenbom e Garcia (2005), o elevado peso das placas contribuem para elevar os riscos de descolamento.

Segundo Neto e Brito (2011), o erro de execução está ligado diretamente à inexistência de mão-de-obra preparada e conseqüente falta de formação especializada na

aplicação de novos materiais e novas tecnologias. Esta falta de qualificação é incoerente com a demanda de utilização de placas pétreas na construção civil, mais especificamente na aplicação de revestimentos de fachadas, devido ao apelo estético e sua maior durabilidade. As placas pétreas, segundo Antunes (2003), oferecem a possibilidade de variações de acabamento e texturas, cores, suplantando o tempo em estilo arquitetônico.

Neste contexto observa Flain (1994), dada a importância na construção civil, da utilização de placas de pedras em sistemas de revestimentos de fachadas, formou-se Comissão de Estudos na Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) com o objetivo de submeter preceitos técnicos para a elaboração de projetos de execução de fachadas em placas pétreas, bem como definir em norma, ensaios de caracterização tecnológica das rochas.<sup>1</sup>

A proposta deste trabalho consiste no estudo de uma nova geometria das placas de pedra granito, utilizando o método de elementos finitos (MEF), para analisar o intertravamento das placas a serem utilizadas em fachadas de prédios, com o objetivo de aumentar a segurança no processo tradicional com placas aderidas à base, sem grampos metálicos.

## **1.1 QUESTÃO DA PESQUISA**

A pesquisa tem como foco constatar a possibilidade de que, por meio da utilização de uma nova geometria de placas de granito assentadas pelo método tradicional e/ou racionalizado para revestimentos de fachadas, estas possam promover o intertravamento entre placas e também o aumento de aderência do conjunto placa suporte, resultando em maior grau de segurança e consequente diminuição dos índices de descolamentos e colapsos.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Proposição de uma nova geometria de placas pétreas para revestimento de fachada de edifícios objetivando um intertravamento entre placas que resulte num maior coeficiente de segurança/aderência nos processos tradicional/racionalizado, com simulação pelo Método dos Elementos Finitos.

---

<sup>1</sup> Segundo FRASCÁ, (2010), no ano de 2010, foram publicadas várias normas estabelecendo procedimentos, ensaios, caracterização e diretrizes para revestimentos de fachadas com placas pétreas, à exceção de ardósias.

### 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Demonstrar através de análise numérica, com modelação e cálculo pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) e comparação de resultados, uma nova geometria de placas pétreas para revestimento de fachadas, experimentando através dessa nova geometria, a promoção de maior aderência e/ou intertravamento entre placas.

- Simular a aderência de placas pétreas em fachadas, com geometrias diferenciadas em “L” e “S” e geometria retangular com uso consolidado, para comparação entre os modelos com os três tipos de granito: Vermelho Brasília, Preto Indiano e Verde Labrador.
- Analisar as tensões de aderência entre as três formas geométricas e os três tipos de granito utilizando o Método dos Elementos Finitos, com recurso do *software* ANSYS.
- Obter modelo com dimensões equivalentes e parametrização com resultados que atendam ao módulo de segurança solicitado (0,1 Mpa) (NOGAMI, 2013), em função da velocidade máxima do vento suportada..

### 1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

A pesquisa busca com as simulações de novas geometria de placas de granito para assentamento em fachadas, uma alternativa para os trabalhos de recuperação de fachadas, de forma a substituir os métodos de recuperação onerosos (substituição do sistema original por sistema de fixação indireta).

O granito é o material mais utilizado por suas características físicas, além de oferecer acabamento imponente e de maior durabilidade, entretanto, sua técnica de execução não é padronizada por falta de legislação que estabeleça procedimentos específicos para assentamento de placas pétreas pelo método tradicional. A inspiração maior deste trabalho, é de estudar um processo que contribua para a diminuição de descolamentos de placas pétreas em fachadas, patologia esta, de importância e de interesse para a construção civil e sociedade em geral.

O método tradicional de assentamento de placas pétreas em fachadas, ainda que não tenha procedimentos técnicos definidos e regulamentados, deverá continuar com a sua utilização por gerar menor custo de mão de obra e sistema. Torna-se imperativo agregar

segurança neste sistema, ainda que seja como alternativa de proporcionar tempo hábil para a manutenção de placas descoladas nas fachadas, sem que haja colapso repentino com consequências que poderiam resultar em perdas de vidas, além de perdas financeiras.

#### 1.4 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

Esta pesquisa se restringe, à análise de uma nova geometria de placas de pedra para revestimentos de fachadas, pelo método de execução tradicional e/ou racionalizado como forma de comparação, utilizando o *software* ANSYS®

Para isso, foi escolhido o granito sabendo-se ser a rocha com as melhores características físico-mecânicas para aplicação em fachadas.

Não será objeto desta pesquisa, discorrer sobre os mais diversos tipos de pedras utilizadas para revestimentos de fachadas, bem como os procedimentos e materiais utilizados em sua execução e suas características físico-mecânicas e petrográficas inerentes aos diversos tipos litológicos.

As patologias recorrentes em revestimentos de placas de pedra em fachadas serão mencionadas, sem entretanto, serem aprofundadas, restringindo-se ao descolamento.

As análises se restringirão à geometria, com base nas características das pedras escolhidas, assentamento com argamassa industrializada, não comportando neste estudo, os diversos intervenientes nos processos de descolamento de placas pétreas como os diversos tipos de argamassas, demais patologias recorrentes, fixação indireta, névoa salina e outros.

#### 1.5 ESTRUTURA DA PESQUISA

O trabalho desenvolvido divide-se em seis capítulos, conforme apresentados abaixo:

- O **primeiro capítulo** é composto pela contextualização do tema proposto, a formulação da situação problema bem como os objetivos geral e específicos, a questão a ser respondida pela pesquisa, a delimitação de estudo, a justificativa e relevância para a escolha deste tema e a organização do estudo.

- O **segundo capítulo** trata da revisão da literatura considerando os principais autores pesquisados sobre o tema que versa sobre rochas naturais, especificamente o granito, e fatores relacionados.

- O **terceiro capítulo** abrange pesquisa sobre patologia de descolamento de pedra, em especial o granito, e fatores que interferem para a incidência dessa patologia.

- O **quarto capítulo** versa sobre a metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho, sua descrição e ensaios aplicando o Método dos Elementos Finitos, com a utilização do programa ANSYS e simulações.

- O **quinto capítulo** apresenta estudos de caso sobre tração de aderência com aplicação de argamassa e **análises parametrizadas com os três tipos de granitos: granito Vermelho Brasília, granito Preto Indiano e granito Verde Labrador.**

- O **sexto capítulo** estabelece considerações finais com sugestões para trabalhos futuro e conclusão.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 FIXAÇÃO DE PLACAS PÉTREAS EM FACHADAS

As técnicas utilizadas para fixação de placas pétreas em fachadas de edifícios são as técnicas de fixação direta ao suporte e as indiretas ao suporte. A primeira, segundo Costa (2011), caracteriza-se por ligações entre placas de pedra e elementos de fixação metálicos que devem absorver tensões em conjunto ao suporte. Segundo Flain, Righi e Frazão (2014), a fixação direta se dá por colagem (adesão físico-mecânica) com ou sem ancoragem de segurança (grampos) e a fixação indireta por componentes metálicos.

Para Flain (1995), a fixação direta das placas pétreas por colagem e auxílio de grampos metálicos, é classificada como “revestimento modular racionalizado (Figura 2).

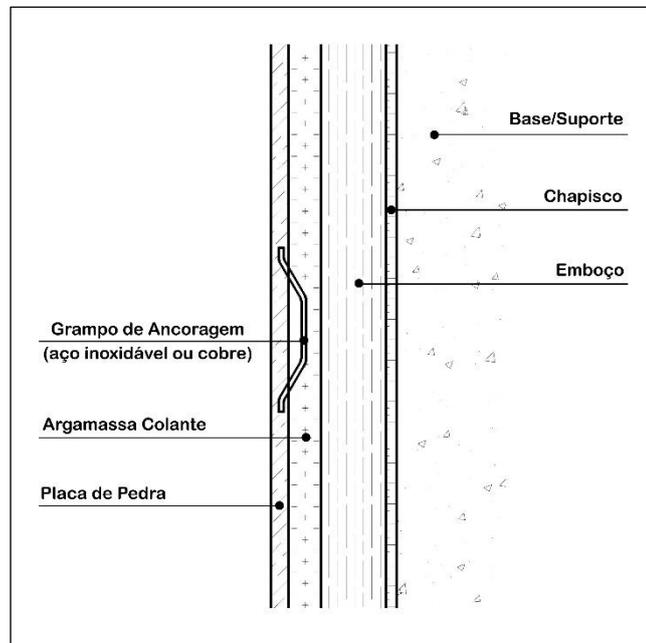


Figura 2: Sistema de fixação de placas pétreas por colagem e auxílio de grampos (sistema racionalizado)

Fonte: Adaptado de TECHNICAL BULLETIN– MARBLE INSTITUTE OF AMERICA, 2010.

No Brasil, este tipo de ancoragem é executado de forma inversa, onde é feito um corte de preferência com diamante no tardo da pedra, sendo este corte um pouco maior do que a bitola do grampo (para preenchimento com cola), com dimensão proporcional a do grampo. As duas hastes do grampo são então fixadas em dois furos na estrutura. Normalmente são grampos de 12 a 15 cm e a distância de perna da haste que é bem menor, em virtude da espessura da pedra (20/30 ou 40 mm).

Este tipo de ancoragem caracteriza o conjunto como *método tradicional racionalizado*, ou seja, com a utilização de componentes metálicos, racionalizando o processo, mas não o descaracterizando.

Os materiais indicados para grampeamento poderão reagir aos componentes minerais que algumas pedras possuem. Uma rocha rica em óxido de ferro, pirita, pode sofrer oxidação em contato com o alumínio, ferro e até mesmo o aço em ambientes agressivos. Em caso de ambiente marítimo, o aço 316 seria o mais indicado, principalmente nessa técnica de penetração das “pernas” do grampo nas placas de rocha.

Como parte do sistema há de se considerar a escolha dos materiais selantes, que irão fixar as ancoragens metálicas nas placas de pedra, onde os selantes de poliuretano por serem flexíveis após a cura podem acompanhar os movimentos dinâmicos (TECHNICAL BULLETIN– MARBLE INSTITUTE OF AMERICA, 2010).

Segundo Foster (1973) apud Sabbatini (1989), os métodos racionalizados são aqueles em que as técnicas aplicadas na indústria são utilizadas na construção sem, entretanto, causar mudanças radicais nos métodos de produção na obra.

No norte da Europa, ciclos de temperatura extremas e chuvas periódicas, contribuíram para o surgimento de patologias de placas pétreas de fachadas, com fragilidade do sistema de aderência entre placas e estrutura dos edifícios, exigindo ações de emergência e reforço com sistemas alternativos de fixação mecânicas (SCHOUENBORG; JACOBSSON E BRUNDIN, 2011).

Segundo estes autores, os primeiros trabalhos de revestimentos de fachadas em placas de pedra com fina espessura foram instalados com camada de cola – argamassa - entre a estrutura e as placas. Principalmente em aplicações em estruturas baixas, nenhum outro meio era utilizado, entretanto, várias patologias associadas à temperatura, desgaste do tempo e fadiga do sistema exigiram um adicional recurso para fixação das placas, inicialmente com utilização de parafusos de aço e anilhas, as quais ficavam evidentes, percebidas então como novo design de fachada.

No Brasil, a mão de obra não treinada, a carência de projetistas especializados em projetos de fachadas, estudos insipientes em revestimentos de fachadas em pedra, contribuem para a recorrência de patologias e custo elevado para a produção de fachadas e sua recuperação. Os métodos de fixação indireta são executados por poucas empresas do setor. O método tradicional, mais consagrado, caracterizado pela fixação direta de revestimentos pétreos ao suporte, podendo agregar grampos na ancoragem como meio de contribuir na segurança, é utilizado com base no empirismo; não há normas que promovam procedimentos

específicos e sim cadernos técnicos de empresas que contribuem com sua experiência e adaptações de normas; os procedimentos contidos nas normas para argamassas, cerâmicas para revestimento, são os mais utilizados como parâmetros.

Nas construções de menor gabarito e pequeno a médio porte, o método de fixação indireta torna-se onerosa, pelo custo da estrutura auxiliar e mão de obra especializada, incluindo nesse contexto o projeto detalhado.

Ainda se reportando às fachadas com método de fixação indireta, Schiochet (2009) apud Flain; Righi e Frazão (2014), as inovações tecnológicas contribuem para minimizar a incidência de patologias, exige, porém, mão de obra especializada para projeto e execução por sua complexidade.

Seguindo o raciocínio, Nakamura (2004), endossa que o sistema de fixação indireta ao suporte oferece melhores resultados, a melhor escolha, necessita, porém, de mão de obra especializada e projetistas capacitados, o que demandará algum tempo para sua implantação, motivo pelo qual o sistema tradicional continuará sendo utilizado por razões técnicas e econômicas.

Deverá ser observado que, não obstante ao desenvolvimento de métodos inovadores, os tradicionais deverão ser alvo de estudo para melhoria da qualidade e segurança, promovendo sua viabilidade custo – operacional.

Nos assentamentos de placas pétreas construídas com sistema tradicional, as patologias mais comuns dentre outras, as manchas, fissuras, perda do brilho, descolamentos de placas, sendo esta última, a patologia que mais causa perda de valor patrimonial e maior risco de acidentes envolvendo pessoas, segundo Nogami (2007), causas de prejuízo e comprometimento funcional, resultantes de desconhecimento técnico na execução e especificação de materiais.

O descolamento de placas pétreas é fato, ser a anomalia que causa sérios acidentes atingindo bens materiais e risco de perdas de vidas. Veiga (2005) considera como possíveis causas de descolamento das placas pétreas, as tensões existentes entre placa, argamassa e suporte, ocasionado pelo peso das placas e às variações térmicas e higrométricas.

As argamassas utilizadas para a colagem de placas pétreas são as industrializadas, as executadas em obras e as argamassas para porcelanato. A determinação da resistência de tração das argamassas é definida para material cerâmico, conforme norma NBR 14084:2004, esta norma é utilizada por falta de norma específica para placas pétreas, ainda que as diferenças de composição dos materiais sejam discrepantes, com a probabilidade de resultados duvidosos (GRILLO, 2010).

Para Chaves (2009), a falta de resistência mecânica por parte do reboco contribui para a colagem ineficaz.

Segundo Maranhão e Barros (2006), as argamassas “tipo farofa” (cimento:areia) e a pulverização de cimento anteriormente ao assentamento das placas de granito, exercem grande influência na resistência de aderência e que apenas naquelas onde há pulverização de cimento e teor de cimento superior a 25%, a resistência de aderência mostra-se satisfatória.

Segundo Antunes (2010), é importante a definição do revestimento a ser aplicado na fachada, para que se avalie a estrutura como um conjunto de suporte, onde o maior ou menor grau de aderência dependerá da rugosidade do substrato, sendo as superfícies mais rugosas oferecem maior aderência.

A interação entre as camadas - substrato, argamassa e revestimento – com pouca rugosidade, inibe a área de atrito, com conseqüente perda de poder de aderência; alterar a superfície de contato através da rugosidade dos substratos promove a melhoria da ancoragem (NOGAMI, 2007).

Segundo Frascá (2003), os granitos apresentam homogeneidade na sua constituição textural e estrutural. Sua constituição segundo Costa (2011), é compatível com os mais diversos tipos de acabamento utilizados para revestimento de fachada. Os granitos são muito utilizados em revestimentos de fachadas por oferecer uma variedade de cores e padrões, atendendo à solicitação estética.

Características e especificações das rochas ígneas Granito segundo FRASCÁ (2003).

Tabela 4: Especificações do granito

<b>ESPECIFICAÇÕES DO GRANITO</b>		
<b>PROPRIEDADE</b>	<b>ABNT NBR 15844</b>	<b>ASTM C 615</b>
<b>Densidade aparente</b>	>2.550 kg/m <sup>3</sup>	≥2.560 kg/m <sup>3</sup>
<b>Porosidade aparente</b>	1,0 %	n.e
<b>Absorção d'água</b>	<0,4 %	≤0,4 %
<b>Compressão uniaxial</b>	>100 Mpa	≥131 Mpa
<b>Módulo de ruptura (3 pontos)</b>	>10 Mpa	≥10,34 Mpa
<b>Flexão (4 pontos)</b>	> 8 MPa	≥ 8,27 Mpa
<b>Coefficiente de dilatação térmica linear</b>	< 8,0[10 <sup>-3</sup> mm/ (m x °C)	n.e.
<b>Impacto do corpo duro</b>	> 0,3 m	n.e.
<b>Desgaste Amsler</b>	< 1,0 mm/1000m	n.e.

Fonte: Adaptado de MhB Serviços Geológicos – Frascá (2003)

As anomalias nos RPN têm suas causas e origens nos mais diversos fatores, desde a falta de especificação e escolha correta da pedra, falta de qualificação dos técnicos de projeto e execução envolvidos, omissões nos cadernos de encargos (NETO e BRITO, 2011).

Por ser de grande interesse e preocupação, técnicos de vários países estão envolvidos em estudos e pesquisas com o objetivo de proporcionar maior durabilidade aos revestimentos de placas de pedra natural, com o desenvolvimento de técnicas de projeto, especificação e melhor qualificação dos profissionais envolvidos, como exemplo a *Society Façades Engineering (SFE)*, constituída em 2014 como iniciativa conjunta da CIBSE, instituto de serviços de engenharia e construção com autoridade para publicações de orientações e códigos da construção civil, estabelecendo normas de práticas na engenharia, reconhecido internacionalmente. A associação (*SFE*) reúne profissionais atuantes em engenharia de fachadas, promovendo *expertise* com o objetivo de atender aos critérios de desempenho em fachadas de edifícios, cada vez mais complexos, em conjunto com áreas de conforto ambiental e sustentabilidade.

O descolamento e a adesão estão relacionados entre si, visto que ambas são forças contrárias, antagônicas, onde a adesão é a força de ligação, que pretende a capacidade de manter dois elementos atômicamente coesos; quando a resistência de ligação é vencida pela capacidade de dissociação, o descolamento acontece. A falta de uma dessas forças promove a presença da outra.

Nos revestimentos com placas pétreas, o descolamento é a patologia mais agressiva e tem como causas principais, segundo Maranhão e Barros (2006), a má aderência entre a placa e a argamassa de assentamento ou desta com o substrato e alterações características das rochas, que segundo Chaves (2009), a composição mineralógica como porosidade, textura, podem interferir na resistência, além das causas extrínsecas como o ambiente a qual se insere.

Os prédios localizados nas regiões litorâneas, sofrem degradação por ação do íon cloro que constituem a névoa salina e rica em sais marinhos, especialmente o NaCl (da SILVA et al., 2014). Outros fatores relacionados à poluição somados à névoa salina criam fluxos de gases e partículas, favorecendo o ingresso de vapores nas placas de rochas e desenvolvimento de diversas patologias (AIRES-BARROS 1991), apud (SILVA et al., 2014).

Segundo Silva, Oliveira e Souza (2008), podem ser causas das patologias, a má aderência entre placa e argamassa de assentamento ou desta com o substrato (Figura 3), a alteração da argamassa de assentamento ou de rejuntamento, a alteração de produtos impermeabilizantes, a agressividade da atmosfera salina e fortes ventos com partículas em suspensão, assim como emissão de  $CO_2$  e inclusive, alterações da própria rocha.

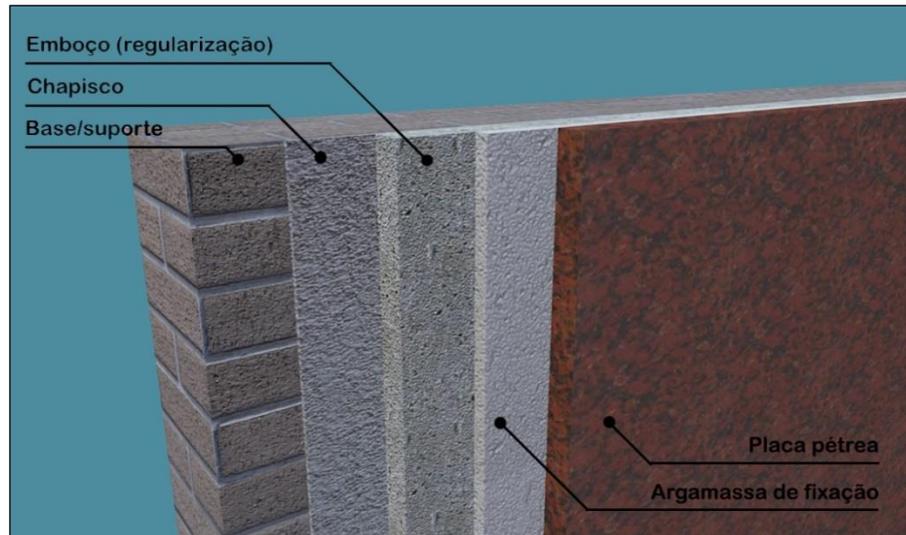


Figura 3: Camadas do sistema de revestimento em placas pétreas por colagem

Fonte: adaptado de Junginger e Medeiros (2003).

Outras causas devem ser associadas ao descolamento de placas pétreas em fachadas, como as tensões instaladas entre as camadas de *placa - argamassa colante - suporte* (Figura 4), originadas pelas variações térmicas e higrométricas, peso das placas, ausência ou mau dimensionamento de juntas de dilatação (VEIGA, 2005).

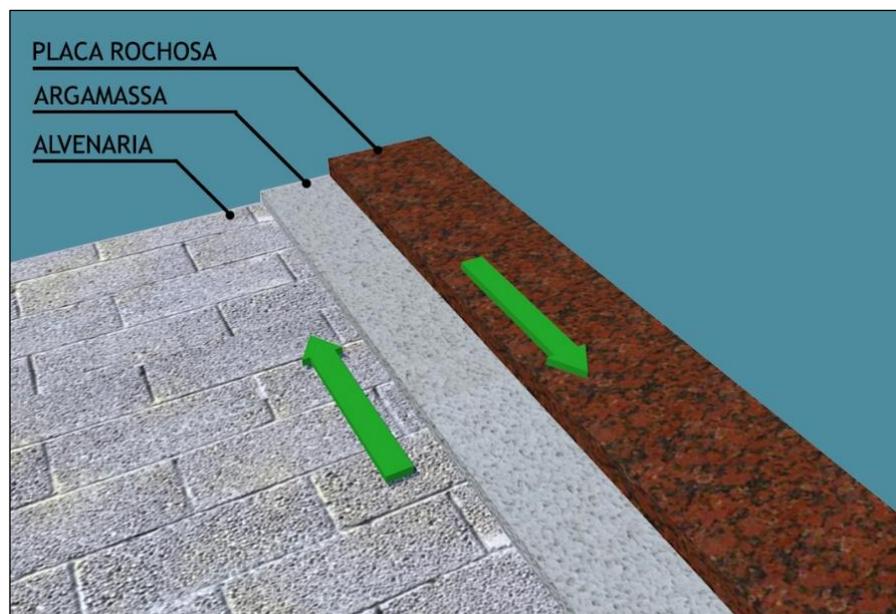


Figura 4: Tensões cisalhantes

Fonte: Adaptado de NOGAMI (2013)

As dissociações ocorrem por falta de aderência entre o substrato e a placa pétrea - perda de aderência entre os componentes de acabamento e sua respectiva base (ABNT NBR 15575-4:2007).

Várias são as causas para o surgimento de patologias, que estão intrinsecamente relacionadas entre si. A fadiga é um fenômeno resultante de carregamentos cíclicos que provoca tensões. Bauer et al. (2011), demonstram que fachadas com grande amplitude térmica, apresentam um grau elevado de incidência de patologias associadas ao comportamento físico-mecânico e a fadiga do material se processa após ciclos de carregamento (BAUER et al., 2012).

Conforme Granato (2009), o assentamento das peças de granito exige esforços cortantes aos elementos ligantes, os substratos, bem como cargas de arrancamento. Diz ainda, que para alívio dessas tensões e mais àquelas advindas das variações térmicas, mecânicas e do próprio material com suas características mineralógicas, exige-se a criação de juntas de alívio de tensões. Ainda complementando, observa que a utilização de camada de assentamento mais o substrato, quando dos esforços atuantes, estes interferirão em cada uma delas provocando deformações que afetarão diretamente o revestimento de placa pétrea (Figuras 5 e 6).

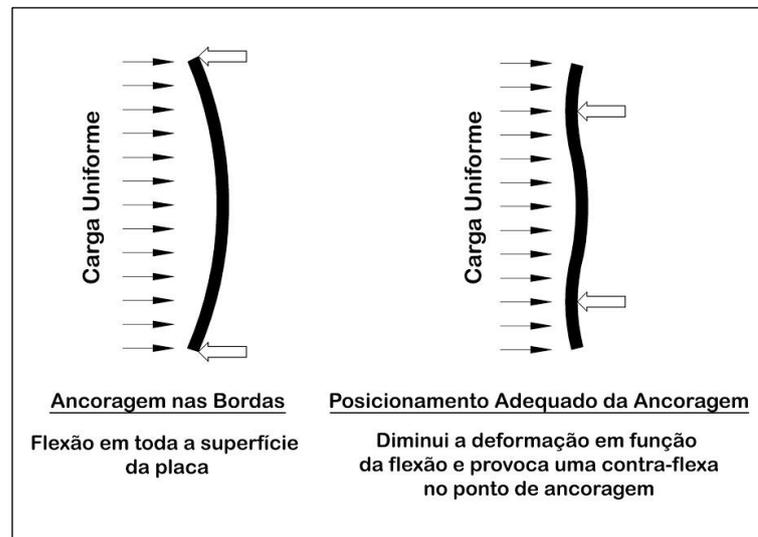


Figura 5: Flexão nas placas por ancoragem

Fonte: Adaptado de TECHNICAL BULLETTIN– MARBLE INSTITUTE OF AMERICA, (2010)

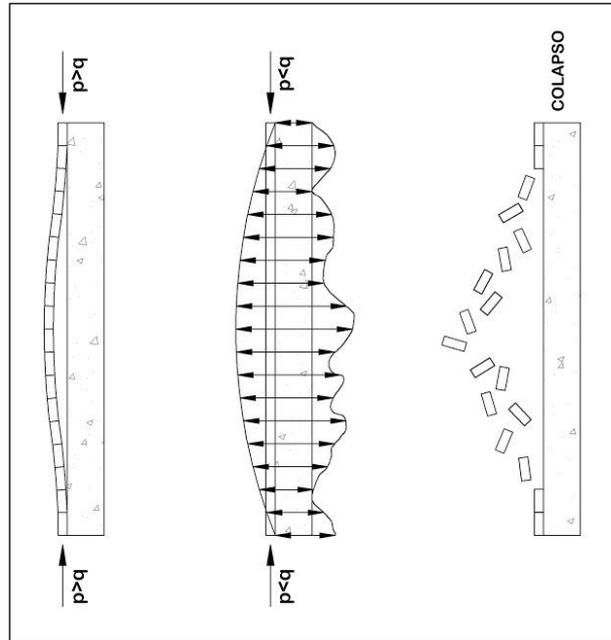


Figura 6: Revestimento solicitado à compressão

Fonte: Adaptado de Fiorito (2009)

As normas da ABNT sobre rochas tratam de procedimentos de requisitos, ensaios e terminologia. A ABNT NBR 15846:2010 – Projeto, execução e inspeção de revestimento de fachadas de edificações com placas fixadas por insertos metálicos - limitando-se neste contexto. Desta forma, as Normas ABNT para revestimentos cerâmicos são àquelas que servem de parâmetros de consulta para aplicação de placas pétreas em fachadas no sistema tradicional, além daqueles procedimentos empíricos, não normalizados nem especificamente estudados.

Segundo Frascá (2010), as Normas da ABNT fornecem requisitos para auxiliar na seleção de materiais pétreos para determinada aplicação, conquanto a normativa internacional, como a americana – ASTM visa a priori a orientação na escolha da rocha e na manutenção; a normalização europeia – CEN, trata das características tecnológicas, propriedades da rocha e conformidade do produto, visando uma unificação de requisitos de qualidade, criada juntamente com a criação da Comunidade Econômica Europeia. Ainda na Europa, a BSI e a DIN estabelecem procedimentos para projeto e instalação de revestimentos em fachadas (MOREIRAS, 2005).

A definição de aderência de acordo com a NBR 13528 (ABNT, 2010): propriedade do revestimento de resistir às tensões normais e tangenciais atuantes na interface com o substrato. A aderência não é uma propriedade da argamassa, sendo a interação entre as

camadas constituintes do sistema de revestimento que se pretende avaliar (base, preparo de base e revestimento).

Aderência é ligação de natureza atômica ou molecular, que pode ser física, entre o substrato e o adesivo ou química, onde as forças eletrostáticas exercem a interação entre corpos sólidos (THURLER e FERREIRA, 1995). Essa ligação molecular (ligação secundária de Van der Waals), segundo Almeida (2005), é a que promove a aderência entre argamassa e o porcelanato, comprovadamente em argamassa para porcelanato desenvolvida por este autor.

Segundo Nogami (2007), em testes de aderência feitos com três tipos de granitos (Vermelho Brasília/Verde Labrador e Preto Indiano) e argamassas do tipo comum (1:3), industrializada e para porcelanato (tipo A4), esta última apresentou maior resistência de aderência, proporcionalmente ao dobro da argamassa industrializada, e que a argamassa comum para placas de granitos ornamentais, apresentaram valores de resistência de aderência baixos, inferiores aos especificados pela norma<sup>2</sup>.

As argamassas específicas para granito existentes no mercado, na verdade são argamassas para cerâmica, admitindo-se para granitos, limitam as dimensões das placas em 40 x40 cm e aplicação em fachadas com altura máxima de 3m. Segundo normatização francesa, a fixação por colagem deverá ser em placas de pedra com dimensões máximas de 300mm x 300mm e massa não excedente a 40 kg/m<sup>2</sup> (VEIGA, 2005).

Os procedimentos mais utilizados e seguros para assentamento de placas pétreas em fachadas no método tradicional, acompanham além da argamassa escolhida, fixação de tela de aço eletrossoldada na estrutura, onde ganchos fixados no tardo das placas se encaixam nas telas (NOGAMI, 2007).

A interação entre placa e estrutura é característica físico-mecânica, ou seja, a aderência depende não somente das propriedades da argamassa e sim das características das placas de rocha, sua dimensão, geometria, seu comportamento diante das interferências específicas de cada projeto.

Na ocorrência de descolamentos de placas de pedra em revestimentos de fachadas, outros são os intervenientes que deverão ser considerados como a temperatura e o clima, seu gradiente que afeta consideravelmente a estrutura cristalográfica da rocha e as camadas de assentamento.

---

<sup>2</sup> Valor de 0,50 Mpa, estabelecido como mínimo de aderência pela ABNT NBR 14084:2004.

A limpeza das placas de pedra com produtos químicos e a lavagem da superfície com jato d'água numa pressão elevada podem causar a soltura do rejunte permitindo a absorção de água e provocar a dissociação dos elementos do sistema (argamassa/pedra) por pressão.

Segundo Cincotto, Silva e Carasek (2005), citados por Guimarães et al. (2002), estes concluem que a movimentação térmica ocorre devido às oscilações da temperatura ambiente e à radiação solar sobre os revestimentos externos e caracteriza-se por variações dimensionais, estas sendo de expansão resultam em tensões de compressão e às de retração resultam em tensões de tração.

Carasek (2010), diz ser a aderência influenciada por diversos fatores, como materiais de base, características da argamassa, condições climáticas, energia de aplicação, outros (Figura 7).

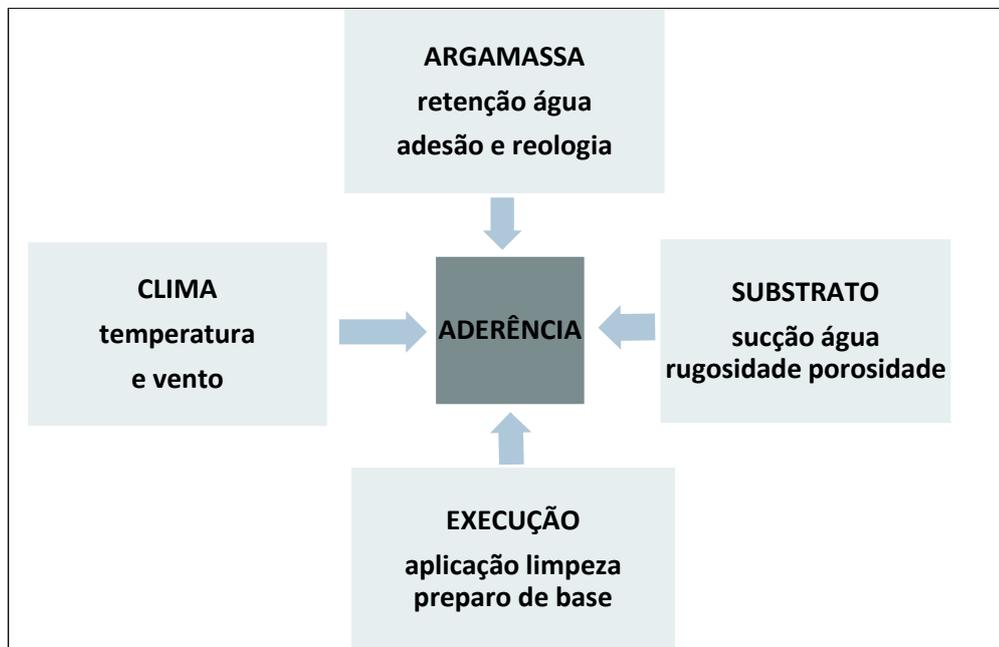


Figura 7: Fatores que exercem influência na aderência sobre bases porosas

Fonte: Adaptado de Carasek (2010)

É importante considerar para projeto assertivo, pretendendo-se a redução de incidência de patologias (principalmente o descolamento de placas pétreas) o fator climático local e seus intervenientes, como parâmetros e dados de cálculo para projeto.

Os destacamentos das placas pétreas em revestimentos de fachadas podem se dar através de fragilidades da própria pedra como sua composição mineralógica, textura, porosidade e resistência, além de outras endógenas ou intrínsecas, como define Chaves (2009), além daquelas, ainda segundo a autora, classificadas como causas extrínsecas, que são

afetadas pelo ambiente externo como percolação, temperatura, composição física e química da atmosfera, tipologia da construção, fatores biológicos (Figura 8) .

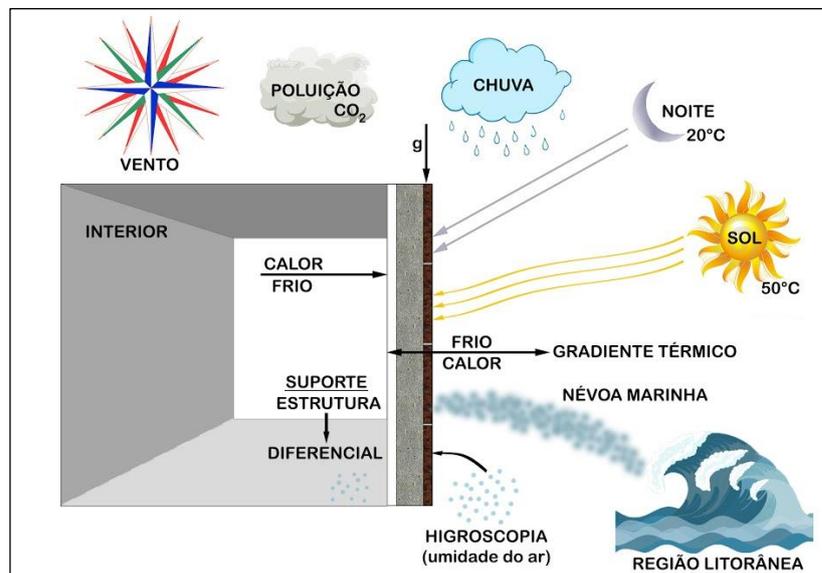


Figura 8: Causas extrínsecas que interferem na resistência de aderência e degradação das placas pétreas em fachadas

Fonte: Adaptado de MOSCOSO, (2013).

Nesse contexto, há de se destacar, a ação dos ventos nas fachadas dos prédios como considerável influência nos descolamentos de placas pétreas. A ABNT NBR 6123:1988, recomenda procedimentos e cálculos de força devida à ação estática e dinâmica do vento nas edificações.

As pressões exercidas pelo vento nas paredes da estrutura podem ser positivas, quando a ação é de fora para a superfície da fachada e negativa, quando ocorre a pressão exercida de dentro do revestimento para fora (sucção), quando então estas se comparam à gravidade, por sua intensidade e com a força agindo de modo a interromper as ligações mecânicas.

Por exercerem cargas normais em relação aos painéis dos revestimentos de pedras, as cargas de vento podem ser intensificadas em regiões de quinas, de mudanças de relevo, da forma da estrutura e materiais. Daí a importância de estudar a carga de ventos na concepção do projeto e cálculo da estrutura em paridade com o revestimento em placas pétreas (TECHNICAL BULLETIN – MARBLE INSTITUTE OF AMÉRICA, 2010).

O cálculo de carga de vento previsto durante a vida útil de projeto considerado para um edifício, pode se tornar falho, quando da intercorrência de ventos e supostos sismos não considerados como limite de risco, resultando em suportes de fachadas não testados para estas cargas (BEASLEY, 2001) apud (KIMBALL, 2013).

A arquitetura de prédios no Brasil, nas grandes cidades, tem se destacado na sua esbeltez e forma, ficando a estrutura num todo mais vulnerável à ação de ventos no que concerne à pressão e direção. Blessmann (2001), citado por Arrais (2011), admite que inúmeros problemas podem ser evitados pela ação do vento na construção, atendendo às determinações da Norma.

Segundo Arrais (2011), a norma vigente sobre a ação de ventos na estrutura é limitada à geometria retangular da edificação e os coeficientes aerodinâmicos representados consideram apenas os ventos incidindo a 0° e a 90°, perpendiculares à edificação, logo, não atendendo às novas características arquitetônicas, necessitando desta forma, de estudos mais precisos, ensaios adicionais para melhor dimensionamento e segurança.

A gravidade, como força elementar de um revestimento em plano vertical, é proporcional ao peso, à massa do revestimento em pedra, não podendo ser desconsiderado no projeto e cálculo de fachadas.

Deverá ser transferido para o sistema de fixação as cargas das placas de pedra, quando então, todas as cargas dos painéis da fachada deverão ser conduzidas para a base da estrutura, compondo um sistema estático. A engenharia de estrutura está ligada diretamente ao projeto de fachadas.

A incidência de um fator não exclui outro, assim, na elaboração do projeto de fachada dever-se-á calcular todos os intervenientes nas hipóteses limítrofes de risco, para obter-se resultado satisfatório em relação à vida útil dos revestimentos de fachadas dos edifícios, evitando perda patrimonial e de vidas.

As rochas são utilizadas em edificações de diversas formas tais quais chapas, lajes ou ladrilhos com diversos tipos de acabamento entre as quais polidas, apicoada, natural, flamejada, possibilitando o recobrimento de superfícies diversas.

Esta vasta gama de possibilidades do uso do material, aliadas às novas técnicas de lavra, ao seu valor comercial acessível a poucos e a sua beleza única, fizeram com que as rochas, especialmente as conhecidas como mármore e granito, fossem bem aceitas no mercado, sendo associadas às obras nobres.

Conforme Chiodi Filho e Chiodi (2009), dentre as rochas de revestimento e as ornamentais, os granitos são caracterizados por rochas silicáticas, dentre elas inclusive os monzonitos, diabásios, granodioritos, sienitos, charnockitos.

Os granitos apresentam uma boa resistência ao ciclo gelo-degelo, sendo por isso uma boa escolha para climas frios ou com grandes amplitudes térmicas (NETO, 2008).

Foram escolhidos os granitos Vermelho Brasília (sienogranito), Preto Indiano e Verde Labrador (Charnokito), conforme figura 9, para análise desta pesquisa, por ser já conhecido e utilizado em revestimentos, por suas composições mineralógicas diferenciadas, além de terem suas características estudadas e determinadas em estudos desenvolvidos por Ribeiro (2005) Silveira (2007).



(a) Vermelho Brasília

Fonte: marmoraria2a.com.br



(b) Preto Indiano

Fonte: stonemar.com.br



(c) Verde Labrador

Fonte: igraex.com.br

Figura 9 (a), (b) e (c) – Granitos

Na tabela abaixo encontram-se os tipos rochosos característicos dos três granitos e suas regiões produtoras.

Tabela 5: Relação do tipo rochoso e regiões produtoras.

NOME COMERCIAL	GRANITO VERMELHO BRASÍLIA	GRANITO PRETO INDIANO	GRANITO VERDE LABRADOR
<b>TIPO PETROGRÁFICO</b>	(1) Sienogranito	(1,2) Gnaisse tonalítico monzogranítico/granodiorítico	Charnokito (Hiperstênio sienogranito) com granada
<b>REGIÃO PRODUTORA</b>	Jaupaci (GO)	Vargem Alta – Iconha (ES)	Baixo Guandu (ES)
	Granulação grossa, isotrópico	Granulação média, bandamento gnáissico definido	Granulação grossa, isotrópico
<b>COLORAÇÃO</b>	Vermelho	Preta	Verde-escura acastanhada
<b>DUREZA</b>	Alta	Baixa	Média
<b>ESTRUTURA</b>	Agregados de grãos anedrais	Dobrada, com diferentes intensidades de gnaissificação	
<b>GRAU DE MICROFISSURAMENTO</b>	Baixo fraca alteração mineral	Baixo fraca alteração mineral	

(1) Lê Maitre (1989), (2) Winkler (1976), (3) Cristais subédricos a anédricos de feldspatos, milimétricos a centimétricos e anédricos de quartzo.

Fonte: RIBEIRO (2005).

Suas características mecânicas plenamente determinadas são a resistência à compressão, resistência à flexão, resistência ao choque, a resistência à flexão após ciclos de

gelo-degelo, a resistência ao desgaste, a dilatação térmica, o coeficiente de Poisson ( $E$ ) e a micro-dureza. As características tecnológicas das rochas são obtidas através de análises e ensaios laboratoriais, executados segundo procedimentos rigorosos e normalizados (SILVA et al., 2008).

Os ensaios mais tradicionalmente utilizados objetivam determinar propriedades tais como: índices físicos (massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água); velocidade de ondas ultrassônicas; desgaste abrasivo Amsler; módulo de ruptura; resistências à flexão, à compressão uniaxial, ao impacto; coeficiente de dilatação térmica e alterabilidade. Em sua maioria, tais propriedades contam com normas da ABNT.

Encontram-se maiores comentários sobre essas propriedades, sua importância e utilidade para as rochas ornamentais, em Winkler (1997), Frascá (2003), Mesones (2001), Navarro (1998), Barros (1991), Chiodi Filho (1995), dentre outros autores. Além da informação inerente à propriedade considerada, a correlação entre propriedades pode ser particularmente útil para especificação, dimensionamento e conservação de rochas. Pode-se inclusive, destacar os trabalhos de Rodrigues et al. (1996 e 1997) e Navarro (1998).

O descolamento, por ser a patologia de maior impacto e que de alguma forma, se não for a patologia de *causa* será a de *efeito*. Considerar-se-á *causa* por ter a placa de pedra solta de seu substrato ou base, de forma abrupta, sem “aviso prévio” e de *efeito*, àquela em consequência de outras patologias incidentes e visuais.

As degradações ocorrem devido às características intrínsecas das rochas, ou seja, suas propriedades mineralógicas, interagindo com as características extrínsecas, como meio ambiente e outras interferências (FRASCÁ, 2016).

Para Campante e Baía (2003) apud UCHÔA (2007), patologias são evidenciadas por alguns sinais, ainda que apareçam em determinados pontos, podem ter sua origem em outros. No caso de deslocamentos diz os autores, a causa pode ser mão-de-obra, procedimentos inadequados, não necessariamente o material de revestimento.

Kimball (2013) discorre sobre algumas indicações óbvias de placas de pedra descoladas ou em processo de descolamento indicando investigação ou reparação, entretanto, àquelas sem sinais de falha ainda podem incorrer em colapso ou desagregadas, causando instabilidade; essas falhas que são ocultas da visão, as quais a identificação não é evidente, são as mais vulneráveis, com risco potencial. Geralmente ocorrem patologias no interior do suporte, quer por dissociação dos suportes e camadas, penetração de água, gradiente térmico, outros.

No revestimento de placas pétreas, as deformações e tensões das interfaces influenciam no processo de degradação do sistema, podendo levar ao descolamento ou colapso dos revestimentos, adaptado de Uchôa (2007):

- a retração da argamassa que liga os elementos das alvenarias
- a retração da argamassa utilizada no emboço
- a deformação lenta do concreto da estrutura atuando sobre os revestimentos de placas pétreas
- recalque das fundações
- as deformações originadas pela variação da umidade relativa do ar atuando sobre argamassas endurecidas
- a composição cristalográfica das pedras
- as deformações por gradiente térmico nas faces das placas pétreas e as transmitidas ao interior
- fadiga

A fadiga é causada por ações externas que provocam patologias como fraturas, deslocamentos e destacamentos. As variações térmicas provocam variações de tensões, onde quanto maior o número de ciclos, menor a vida útil do revestimento por incidir em maior grau de carga dinâmica, resultando em trincas e fendas (MOSCOSO, 2013).

Os estudos sobre propriedades da fadiga da pedra natural ainda são escassos e não consistentes, por envolver diferentes aspectos desde as características das pedras, seu comportamento em relação ao meio ambiente, o sistema de instalação. Um tipo diferente de ensaio de fadiga é análise de espectro<sup>3</sup>.

Ainda segundo Moscoso (2013), com o aumento gradual da temperatura nos revestimentos cerâmicos, as placas tendem a se separar, assim como a juntas resultando em cisalhamento simples entre a base das placas e a argamassa (figura 10); o inverso, com redução gradual da temperatura, provoca a junção das placas, soltando-as, conforme figura 11.

---

<sup>3</sup> Análise realizada no domínio da frequência para determinação de tensões em peças submetidas a carregamentos transientes.

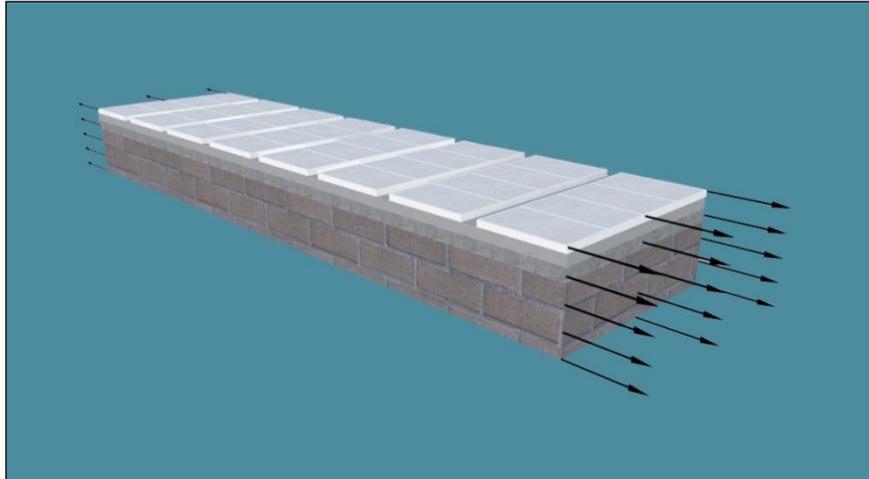


Figura 10: Sistema de revestimento sujeito à cisalhamento simples

Fonte: Adaptado de MOSCOSO (2013)

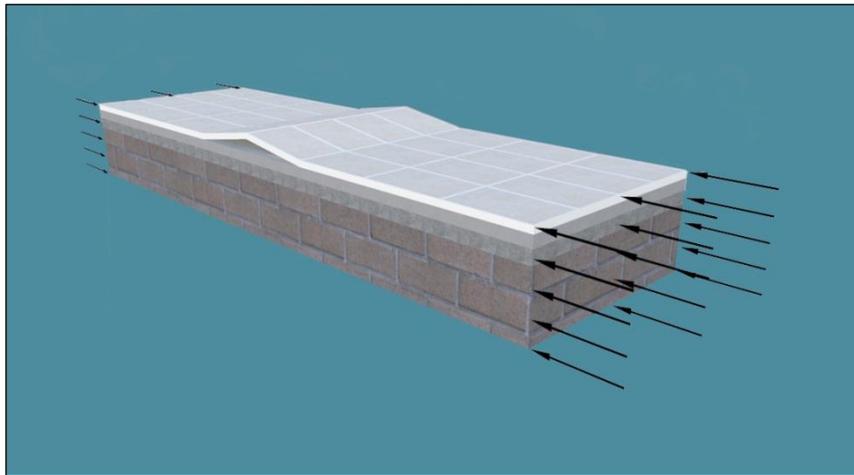


Figura 11: Sistema de revestimento sujeito à tensão de compressão

Fonte: Adaptado de MOSCOSO (2013)

A retração da argamassa colante causa a tensão de compressão do sistema de revestimento cerâmico, resultando em tensões cisalhantes conforme figura 12 (FIORITO, 1994) apud (MOSCOSO, 2013).



Figura 12: Revestimento solicitado à compressão por tração

Fonte: Adaptado de MOSCOSO (2013)

No caso de revestimentos em placas pétreas, destaca-se que o material absorve os limites de tensões, por absorverem os limites de temperaturas, gerando fissuras no próprio revestimento, com o aumento de potencial de risco de fraturas.

Maranhão e Barros (2006) imputam às argamassas colantes as causas dos destacamentos de placas pétreas, por ineficiente aderência entre argamassa, a placa de rocha ou substrato. Os autores concluem que mais de 50% de tipos de argamassas testados, apresentaram valores abaixo ou muito próximos de 0,50 Mpa, estabelecido pela ABNT NBR 14084, como sendo valor mínimo para placas cerâmicas.

Em artigo de *Marble Institute of America* (2010), é considerada como influências no descolamento de pedras, a gravidade, a pressão dos ventos sobre as paredes dos edifícios e as cargas sísmicas. A influência da estrutura sendo dividida em duas partes, a estrutura do prédio e a estrutura dos painéis de pedra, descarregando toda a carga na terra. Os programas de computadores que realizam análise através de elementos finitos permitem identificar as tensões dentro dos painéis de pedra quando sujeito a cargas elevadas, de outra forma, seria inviável este estudo simulando as cargas incidentes.

Silva, Flores-Colen e Gaspar (2012), ao estudarem a aderência de argamassas e suas ligações com o substrato com as placas de revestimentos, concluíram que os vários testes existentes para medição desses valores em laboratório, com a retirada de amostras ou testes *in loco* que avaliam a resistência de adesão com testes de tração (*pull-off*) têm algumas vantagens, porém desvantagens que podem não corresponder às expectativas.

As autoras propuseram um modelo numérico de uma fachada renderizada<sup>4</sup> que inclui uma camada de interface entre o substrato e argamassa, onde dessa forma puderam alterar os dados do modelo da interface até chegar a um resultado positivo. Concluíram que o uso de interface dentro de um modelo numérico com características específicas pode ajudar o estudo e contribuir para o desenvolvimento de aderência de argamassa sobre o substrato.

Moreiras (2014) defende o sistema de fixação indireta (Figura 13), com fixação mecânica (Figuras 14 e 15) onde o sistema permite a racionalização das atividades de construção, sem o uso de argamassas, com menor geração de resíduo, resultando em obra mais limpa e otimizando sua execução, com prazo reduzido de obra. O autor admite que o sistema exige maior especialização em projetos e estrutura.



Figura 13: Detalhe de sistema de suporte com fixação de elementos verticais e horizontais

Fonte: Costa (2011)



Figura 14: Detalhe de calha na pedra para colocação do clip de suporte

Fonte: Costa (2011)

---

<sup>4</sup> Renderização é o processo de aplicação de várias texturas, camadas e interfaces para se obter resultado ótimo.

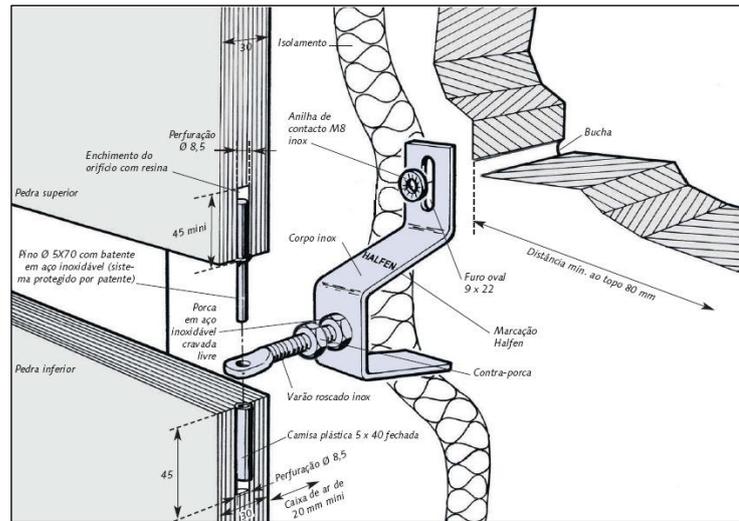


Figura 15: Fixação mecânica de Halfen, modelo HRC

Fonte: Dossier Técnico-Económico n.2 (out. 2006) – Fachadas Ventiladas – Construlink.com

A fachada é expressivamente considerada um dos itens mais importantes de um edifício, não obstante não o é no que remete ao projeto. Seu custo e valor agregado quanto à estética, são fatores relevantes.

Outros valores hoje são agregados ao custo das fachadas dentro do empreendimento: a sustentabilidade dos edifícios, numa busca de eficiência energética, conforto, desempenho reforçado por normas NBR da ABNT – 15575-4:2007

Segundo Oliveira e Melhado (2010), o custo com a manutenção e de execução das fachadas pode atingir 20% do custo total da obra<sup>5</sup>.

Independente das diversas tipologias disponíveis para fachadas de edifícios, desde as tradicionais com suas técnicas e materiais consagrados, as mais modernas como as pré-fabricadas com uma variedade de materiais, fachadas pesadas, leves, ventiladas, cortina, todas demandam técnicas, exigem para o seu bom desempenho na construção e em serviço que haja desenvolvimento tecnológico na construção, nos métodos e materiais e projetos técnicos bem definidos.

As patologias recorrentes em fachadas por falta de planejamento no projeto, na execução e manutenção gera um custo adicional desde a implantação do sistema, somando-se à manutenção exigida por problemas de segurança e durabilidade.

Esta carência de tecnologia de projeto permeia a construção civil, resultando em projetos às vezes audaciosos em sua arquitetura e conseqüente inviabilidade técnica de

<sup>5</sup> Construção Mercado 59, 2006; Construção Mercado 79, 2008; AECWeb – matéria 968,2009 – Disponível em <http://www.aecweb.com.br>.

manutenção. É facilmente perceptível ao se analisar os jogos de plantas de projetos de edifícios, constar equivocadamente, como projeto de fachadas, o desenho de fachadas (elevação).

Para Oliveira e Melhado (2010), estes problemas podem ser reduzidos nas fases de execução e de uso de um edifício, incrementando a qualidade do projeto como produto e processo, pois as informações assertivas ditarão a qualidade final do empreendimento.

Com a experiência e pesquisas desenvolvidas em patologias das fachadas, inspirada na metodologia proposta por estes autores, foi construído um *planejamento de sistemas de fachadas* como um meio de classificação dos intervenientes a serem considerados para uma evolução do processo, conforme figura 16.

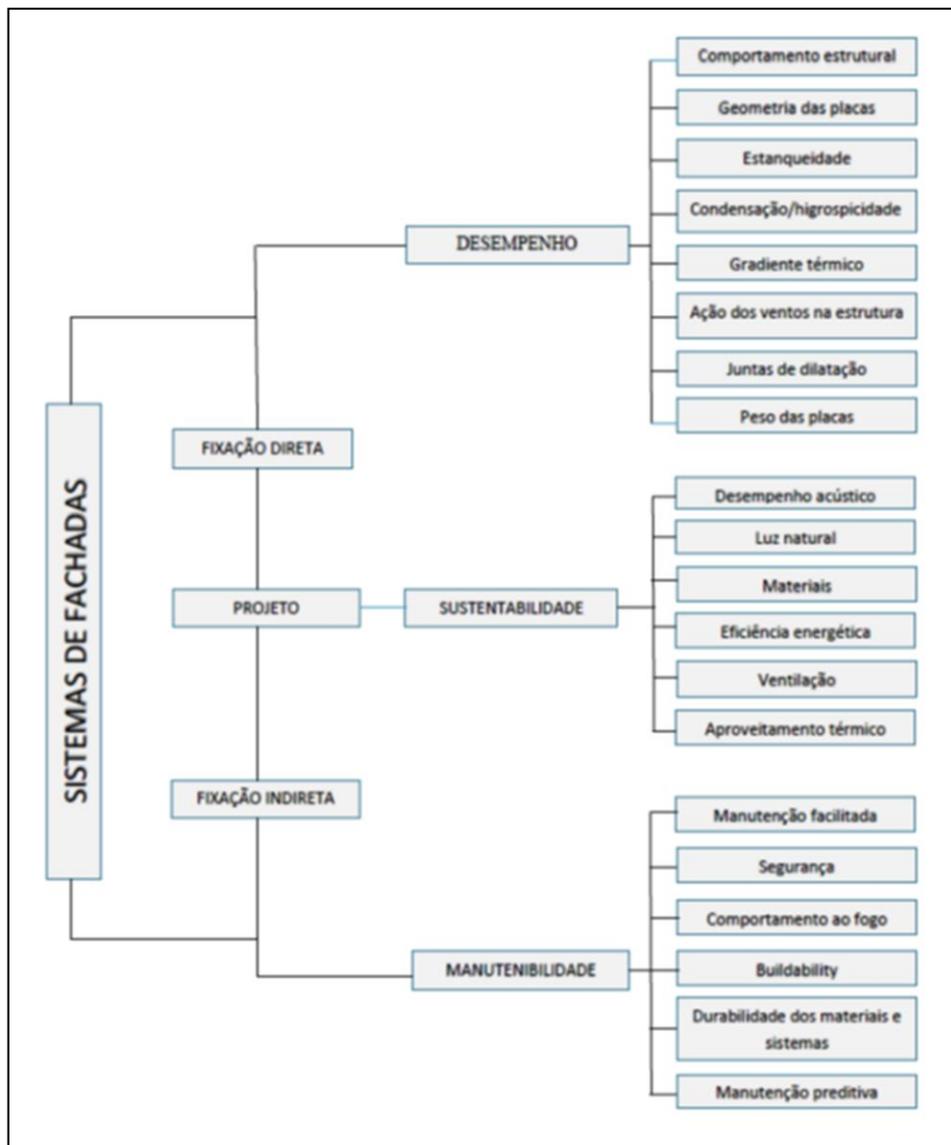


Figura 16: Planejamento de Sistemas de Fachadas

Fonte: Adaptado pela Autora deste Trabalho a partir de Oliveira e Melhado (2010)

Os revestimentos de placas de pedra em fachadas de edifícios são amplamente valorizados por sua imponente estética. No Brasil, o tipo de rocha mais utilizada para o revestimento de fachadas é o granito por apresentar elevada resistência mecânica e maior durabilidade e adaptação ao clima tropical (MOREIRAS, 2014).

Do ponto de vista geológico, as rochas são parte de três grupos genéticos: ígneas, sedimentares e metamórficas (ABIROCHAS, 2013). As ígneas ou mórificas, como o granito, derivam diretamente de consolidação, arrefecimento e cristalização do magma, a uma certa profundidade da crosta terrestre ou à superfície, por ação vulcânica.

O granito é a rocha intrusiva mais comum, parte do grupo das rochas ígneas ou mórificas. Estas rochas devido aos minerais constituintes apresentam uma larga escala de tonalidades, pouco porosas, resistentes mecanicamente e duráveis (SILVA, 2009).

A utilização do granito para revestimento de fachadas é justificada por suas características físico-mecânicas, além daquelas associadas como a variedade de tonalidades, estética e imponência.

Segundo Sabbatini (1989), a classificação do subsistema de vedação vertical deverá ser conforme o processo de produção, existindo desta forma, os sistemas industrializados, os tradicionais racionalizados, que são os intermediários e ainda, os semi-industrializados.

### **Tipos de Métodos de Assentamento de Placas de Pedra em Fachadas**

#### **a) Processo Tradicional**

Conforme Flain (1995), o Processo Tradicional é o método que consiste no assentamento das placas pétreas utilizando argamassa tradicional (colagem), tela fixada ao suporte e as placas de pedra e juntas. Esta tela tem a função de promover aderência suplementar entre o suporte e a camada de fixação e ainda servir de ancoragem às placas pétreas.

#### **b) Processo Racionalizado**

O processo racionalizado consiste na adequação do processo tradicional às tecnologias de materiais e métodos, empregando, por exemplo, argamassas industrializadas. Conforme Junior (2005), a utilização de componentes metálicos, fabricados em indústrias e já especificados em projeto, aumenta o nível de organização do processo. Esta otimização do processo parametrizado ao método tradicional então, caracteriza a racionalização do processo.

#### **c) Sistema de Fixação Indireta**

O sistema de fixação indireta, compostos por estrutura auxiliar e *inserts* metálicos, onde a estrutura auxiliar fica afastada da superfície da fachada, caracterizando a fachada

ventilada quando esta permite o efeito chaminé, com entrada e saída livre do ar. Quando os panos são interrompidos inibindo a ventilação, então ter-se-á a fachada cortina. Segundo Costa (2011), a caracterização de fixação indireta é através de elementos de suporte metálicos que suportam as forças verticais e horizontais, absorvendo tensões que sofrem os revestimentos de placas pétreas.

Estas últimas novas técnicas são notadamente mais eficientes no contexto de segurança, manutenção e produtividade - os sistemas não aderentes, entretanto, segundo Moreiras (2014), comparado com o sistema tradicional, exigem maior cuidado no projeto e uma avaliação estrutural criteriosa.

É fato que as obras de pequeno porte, de baixo gabarito e características individuais, não preterem a técnica tradicional, tendo como precípua justificativa o custo elevado, a carência de mão de obra especializada e a inadequação logística do sistema de fixação indireta de placas pétreas nestas obras de fachadas.

Atualmente, ainda são utilizados os métodos rotineiros de colagem de placas de pedras em fachadas (método tradicional), havendo experimentos com métodos que promovam uma melhor aderência da pedra ao substrato, através de aplicação com vários tipos de argamassas e utilização de grampos. As construções com até 15m de altura deverão prosseguir com os métodos de colagem de placas pétreas direto ao substrato, necessitando de uma melhor performance de modo a proporcionar maior segurança e maior durabilidade, fachadas revestidas em placas de pedra em processo de recuperação, que necessitam de soluções seguras e de baixo custo, o que motivou este trabalho.

As fotos abaixo mostram um prédio dos anos 50 com descolamento de placas pétreas. O projeto de recuperação prevê retirada de todo o revestimento de placas pétreas existentes e execução de sistema de fixação indireta com estrutura auxiliar. O alto investimento que implica o sistema atualmente especificado fez o condomínio interromper as atividades de recuperação.



Figura 17: Vista da fachada do ed. Marques dos Reis



Figura 18: Detalhe de placa pétrea (granito) escorada.



Figura 19: Fachada lateral do edifício Marques dos Reis

No Brasil, ainda é utilizado o sistema tradicional de fixação de placas pétreas, pelos motivos já elencados. Faz-se necessário aprimorar este sistema, no que tange inclusive, às obras de recuperação de fachadas com placas pétreas, criando uma alternativa segura, com custo mais baixo e adaptação de projeto. Há de se destacar, que as grandes obras edificadas até a década de 80, utilizavam o método tradicional ou racionalizado para a fixação de placas pétreas em fachadas. Neste sentido, este estudo objetiva atender às pequenas obras e àquelas que necessitam de recuperação, permitindo uma escolha menos onerosa e mais prática do que o método de fixação indireta.

## 2.2 ROCHAS

### 2.2.1 Rochas Naturais e Suas Características

As rochas naturais são agregados coerentes de materiais ou substâncias sólidas e provêm de formações geológicas oriundas de forma natural. Podem ter origem em três ambientes que diferem entre si em termos de temperatura, pressão e composição química, dando assim origem a três tipos de rochas: rochas magmáticas, rochas sedimentares e rochas metamórficas.

As rochas magmáticas derivam diretamente de consolidação, arrefecimento e cristalização do magma. À uma certa profundidade da crosta terrestre ou à superfície, por ação vulcânica. A solidificação do magma a grande profundidade origina as rochas chamadas plutônicas como é o caso do sienito, granito e do gabro. Se a solidificação se der na superfície, as rochas são designadas vulcânicas tendo como representante mais conhecido o basalto, NETO (2008). Consoante aos minerais que constituem as rochas magmáticas, estas apresentam uma grande gama de tonalidades, sendo normalmente pouco porosas, mais duráveis e com boa resistência mecânica, SILVA (2009).

As rochas sedimentares têm origem em depósitos de fragmentos sedimentares. Estas podem resultar da desagregação exercida por agentes atmosféricos, pelas plantas ou pelos animais, ou podem resultar do aglomerado de resíduos de fósseis e plantas formando assim calcários (brechas, calcário lioz ou travertino). Estas rochas têm uma estrutura estratificadas dispostas em camadas de espessura variável e apresentam características físicas, químicas e mecânicas variadas entre si. No geral, podem ser descritas como bastante porosas sendo suscetíveis de absorverem água.

As rochas metamórficas formam-se da alteração de rochas já existentes, quando são sujeitas a certas condições de temperatura e pressão diferentes da de sua gênese. Apresentam uma grande variância das suas características sendo mais comuns os mármore, as ardósias ou os gneisses, SILVA (2009). Uma vez que neste trabalho nos concentraremos no estudo do granito, daremos maior atenção ao tipo de rocha ao qual pertence, ou seja, as magmáticas.

#### 2.2.1.1 Rochas Ígneas

As rochas ígneas são formadas quando o magma arrefece e cristaliza. Esta rocha fundida, com origem à profundidade até 200 km no interior da terra, compõe-se de elementos encontrados nos minerais do tipo silicatos e de alguns gases, sobretudo vapor d'água, todos confinados no magma pela pressão das rochas. Como a massa magmática é menos densa que os maciços de rochas circundantes, força o seu movimento em direção à superfície originando explosões por vezes muito violentas. A erupção pode gerar o derramamento de grandes quantidades de lava, cuja composição é semelhante à do magma sem a maior parte dos componentes gasosos.

A rocha resultante da solidificação da lava é classificada como extrusiva ou vulcânica, sendo o basalto o exemplo mais conhecido. Quando o magma não alcança a superfície pode eventualmente solidificar e cristalizar em profundidade, num processo substancialmente mais lento formando uma massa sólida de cristais entrelaçados entre si. As

rochas ígneas produzidas deste modo são chamadas intrusivas ou plutônicas, das quais o granito é o exemplo mais abundante, e só aparecem à superfície após a atuação de movimentos tectônicos e a ação de processos de erosão das camadas de rochas superiores. Quando a solidificação do magma se verifica em profundidade intermédia, as rochas resultantes designam-se por hipoabissais (exemplo de dolerito). A velocidade do arrefecimento do magma vai originar cristais de diferentes tamanhos. Um arrefecimento lento produz cristais de grandes dimensões enquanto que um arrefecimento rápido irá originar uma massa rochosa formada por cristais de pequenas dimensões, por vezes impossíveis de observar sem meios de ampliação. Quando o arrefecimento é extremamente rápido não há formação de cristais, formando-se uma matéria sólida sem estrutura cristalina (matéria amorfa).

#### 2.2.1.2 Textura e Composição Mineral

A variedade de rochas ígneas existentes é abundante. As diferenças existentes baseiam-se na sua textura e composição mineral. O termo textura, quando aplicado a rochas ígneas, é usado para descrever a aparência geral da rocha com base no tamanho e disposição dos seus cristais interligados. A textura é uma característica muito importante da rocha porque pode revelar informação qualitativa importante sobre o ambiente em que a rocha foi formada e sobre as suas propriedades, como por exemplo, a resistência e deformabilidade.

Quando grandes massas de magma solidificam a grande profundidade formam-se rochas ígneas com uma textura de grãos grossos. A sua aparência é de um agregado de cristais interligados com tamanho suficiente para serem identificados individualmente por simples observação (textura fanerítica). As rochas ígneas formadas à superfície ou em pequenas bolsas magmáticas a pouca profundidade têm arrefecimento rápido originando uma textura de grãos finos por vezes impossíveis de diferenciar sem recorrer a observação microscópica (textura afanítica).

Para ter uma idéia das diferentes velocidades de arrefecimento do magma, uma rocha vulcânica pode formar-se em alguns minutos enquanto que uma rocha plutónica pode resultar do arrefecimento de uma grande massa de magma durante milhares de anos.

Nem todos os minerais componentes do magma cristalizam à mesma velocidade. Alguns podem já ter certo tamanho quando outros iniciam a sua cristalização. Por exemplo quando o magma aflora à superfície pode já conter alguns cristais levando assim a massa ainda líquida a arrefecer mais rapidamente originando uma rocha com uma textura particular de cristais grandes envolvidos por uma matriz de cristais menores (textura porfirítica).

### 2.2.1.3 Classificação das Rochas Ígneas

As rochas ígneas são classificadas, ou agrupadas, com base na sua textura e composição mineral. As várias texturas ígneas resultam dos diferentes padrões de arrefecimento enquanto que a composição mineral de uma rocha ígnea depende dos componentes do magma inicial e do ambiente de cristalização.

As rochas do lado direito da tabela 7 são compostas por determinados minerais cuja cristalização se dá em primeiro lugar. O seu alto conteúdo em ferro e magnésio faz com que tenham uma cor escura e uma maior densidade que outras rochas. O basalto é a rocha ígnea extrusiva mais comum.

O granito é a rocha ígnea intrusiva mais comum, em parte pela abundância e pelo seu uso generalizado na construção e decoração, estando geralmente associado aos processos tectónicos à formação das montanhas. Por ser mais resistente à erosão e alteração que outras rochas forma frequentemente o núcleo principal das cadeias montanhosas. É importante notar que duas rochas podem ter a mesma composição mineral mas, de texturas diferentes. Para efeito de comparação, temos o próprio granito, rocha intrusiva de grão grosso, cujo equivalente vulcânico, o riolito, constitui-se em uma rocha de grão muito fino.

Tabela 6: Composição mineral das rochas ígneas

	<b>Félsico (granítico)</b>	<b>ntermédio (andesítico)</b>	<b>Máfico (basáltico)</b>	<b>Ultramáfico</b>
<b>Intrusivo (grão grosso)</b>	Granito	Diorito	Gabro	Peridotito
<b>Extrusivo (grão fino)</b>	Riolito	Andesito	Basalto	–
<b>Composição Mineral</b>	Quartzo Feldspato potássico Feldspato sódico	Hornlenda Feldspato sódico Feldspato cálcico	Feldspato Cálcico Piroxena	Olivina Piroxena
<b>Componentes Minerais Secundários</b>	Moscovite Biotite Hornblenda	Biotite Piroxena	Olivina Hornblenda	Feldspato cálcico

### 2.3 CARACTERÍSTICAS DAS ROCHAS

As características petrográficas são as de composição mineralógicas das rochas, que remontam à sua origem, formação, estrutura, textura. Segundo Navarro (2002), existem três variáveis petrográficas que respondem pelo comportamento físico-mecânico da rocha: composição mineral, texturas e estruturas.

A variedade de tipos de rochas entretanto, tornam estas três variáveis em um complexo sistema de parametrização, com suas variações de composição e comportamentos mecânicos.

Segundo Nogami (2013), a análise petrográfica tem como métodos a observação macroscópica e de microscopia ótica de luz polarizada em lâminas delgadas extraídas das rochas em três direções ortogonais.

Os índices físicos se relacionam com a porosidade, massa específica e absorção de água, índices estes que interferem diretamente com a resistência mecânica da rocha, que segundo Frazão e Farjallat (1995), quanto menor a porosidade do tipo litológico, maior sua densidade e resistência mecânica.

A massa específica é uma relação entre massa e volume da rocha. Como as rochas possuem porosidade, com vazios permeáveis (permitem a entrada de água) e impermeáveis (não permitem a entrada de água e outros), tem-se os conceitos de volume de vazios permeáveis e volume de vazios impermeáveis. A soma de todos estes volumes com o volume de rocha dá o volume aparente. Desconsiderado este volume, tem-se o volume absoluto.

A absorção de água nas pedras depende de vários fatores como pressão, a temperatura ambiente e de características da própria pedra como porosidade, compacidade e permeabilidade.

A porosidade representa a relação do quanto que os vazios compõem o volume aparente de uma pedra natural fornecendo uma medida da saturação desta. É preciso, no entanto, observar que duas pedras com a mesma porosidade podem ter diferentes capacidades de absorção de água devido às diferentes disposições de poros nas pedras.

Outra propriedade das pedras que também está ligada com a sua porosidade é a permeabilidade. A permeabilidade é a propriedade da rocha de se deixar atravessar por gases e líquidos. Segue a idéia geral de que os materiais permeáveis compõem materiais absorventes (permeáveis e apenas com capilares) que compõem os materiais porosos (permeáveis, apenas com capilares e o grupo dos vazios impermeáveis).

A higroscopicidade é a propriedade de absorção de água por capilares. Neste caso, pelas forças capilares, não necessariamente a rocha será atravessada pela água (permeabilidade). A higroscopicidade pode dar origem a gelividade quando há solidificação da água em seu interior, provocando o aumento do volume da rocha e originando fraturas na estrutura da pedra.

Outra característica a ser analisada na escolha de uma rocha é a sua dureza. A dureza é a propriedade das rochas, medida pela escala de Mohs, indicando a maior ou menor

dificuldade de serrar. Esta propriedade afeta o preço de compra das rochas, por ser intimamente ligada às dificuldades de produção e manutenção dos equipamentos usados nas pedreiras, marmorarias.

Tendo em vista as diversas possibilidades de aplicação de rochas em construções e levando-se em conta a grande variedade de métodos disponíveis para tanto, a exigência do conhecimento detalhado das propriedades tecnológicas da rocha que se pretende utilizar torna-se muito acentuada, uma vez que se deseja garantir uma boa durabilidade da obra. Para este fim, uma série de ensaios foram propostos e sua utilização, no estágio atual de desenvolvimento tecnológico, tem se tornado frequente. Os ensaios mais tradicionalmente utilizados objetivam determinar propriedades tais como: índices físicos; velocidade de ondas ultra-sônicas; desgaste abrasivo Amsler; módulo de ruptura; resistências à flexão, à compressão uniaxial, ao impacto; coeficiente de dilatação térmica e alterabilidade. Em sua maioria, tais propriedades contam com normas da ABNT. Podemos encontrar maiores comentários sobre essas propriedades, sua importância e utilidade para as rochas ornamentais em FRASCÁ e SARTORI (1998), AIRES-BARROS (1991), CHIODI FILHO (1995), WINKLER, (1997), NAVARRO (1998) e FRAZÃO (2002).

Além da informação inerente à propriedade considerada, a correlação entre propriedades pode ser particularmente útil para especificação, dimensionamento e conservação das rochas. No Brasil, o assunto tem sido estudado de forma tímida ainda. Poucos trabalhos têm sido produzidos neste sentido. Pode-se destacar os trabalhos de Rodrigues et al. (1996/1997) e Navarro (1998), como sendo os primeiros a abordar as relações entre aspectos petrográficos e tecnológicos de granitos ornamentais.

A resistência mecânica é caracterizada pela composição microfissural, mineralógica de cada tipo litológico, onde a massa específica aparente e a porosidade aparente oferecem indicadores de resistência físico-mecânica das rochas (IDEMBURGO, 2012). É a capacidade de resistir aos esforços de tração, compressão, torção e cisalhamento.

A resistência à compressão é bastante grande nas rochas, sendo as demais muito menores em relação a esta, o que fez com que se deixasse de usar unicamente as rochas como elemento estrutural, e fosse usada uma rocha artificial, que é o concreto armado, onde a pasta de cimento e os agregados de rocha resistem bem à compressão (material frágil) e o aço resiste bem à tração (material dúctil).

A resistência à tração das rochas vai de 1/40 a 1/20 da resistência à compressão, a resistência ao cisalhamento e/ou flexão está na faixa de 1/15 a 1/10 desta resistência.

Para escolha assertiva da rocha para revestimento de fachadas, deverão ser considerados fatores intrínsecos às características das rochas, dentre eles, o teor de absorção de água, que segundo Maranhão (2006), a alteração cromática da placa de rochas está diretamente relacionada com o teor de absorção de água. Cada rocha com sua composição mineralógica e grau de estrutura, apresentará maior ou menor manchamentos por absorção de água.

A compressão uniaxial demonstra a resistência das rochas, quando forças verticais atuantes sobre elas.

A resistência à tração por flexão determina a tensão mínima ou flexão máxima que provoca a ruptura da placa de rocha quando submetida aos esforços de compressão e flexão.

O coeficiente de dilatação térmica linear, avalia a dilatação da rocha (placa), nas condições de gradiente térmico – sua resistência à variações limítrofes de temperatura

A resistência mecânica, bem como outras propriedades tecnológicas das rochas, depende de fatores como grau de alteração, microfissuramento e dimensões dos minerais presentes. Considere-se ainda que, durante a gênese de rochas magmáticas e metamórficas, a atuação de mecanismos de deformação resulta numa gama variada de defeitos cristalinos (pontuais, lineares e/ou planares) que configuram planos de fraqueza ou decontinuidades físicas das rochas, definindo assim zonas preferenciais para redistribuição de energia, iniciando a propagação de fraturas conforme as concepções postuladas pela Teoria de Griffith<sup>6</sup>, e consequente desagregação da rocha (ATTEWEL; FARMER 1976); (VUTUKURI et al.,1974); (WHITTAKER et al.,1992).

Assim, pode-se dizer que as características macroscópicas observadas nas rochas são consequências de sua estrutura microscópica, mais especificamente, de defeitos que surgem em sua estrutura cristalina.

### **2.3.1 Granitos**

Para o setor de rochas ornamentais e de revestimento, o termo granito (granite) designa um amplo conjunto de rochas silicáticas, abrangendo monzonitos, granodioritos, charnockitos, sienitos, dioritos, diabásios/basaltos e os próprios granitos, gerados por fusão parcial ou total de materiais crustais preexistentes.

A composição mineralógica desses “granitos” é definida por associações muito variáveis de quartzo, feldspato, micas (biotita e muscovita), anfibólios (sobretudo

---

<sup>6</sup> Teoria equacionada para o estudo de trincas em sólidos frágeis

hornblenda), piroxênios (aegirina, augita e hiperstênio) e olivina. Alguns desses constituintes podem estar ausentes em determinadas associações mineralógicas, anotando-se diversos outros minerais acessórios em proporções bem mais reduzidas. Quartzo, feldspatos, micas e anfibólios são os minerais dominantes nas rochas graníticas e granitóides.

Macroscopicamente (a olho nu), o quartzo é reconhecido como mineral incolor ou fumê. Geralmente translúcido, muito comum nos granitos, podendo-se também encontrá-lo na cor azulada em rochas específicas.

Os feldspatos (microclíneo, ortoclásio e plagioclásios) são normalmente os principais balizadores do padrão cromático das rochas silicáticas, conferindo as colorações avermelhada, rosada e creme-acinzentada nos granitos homogêneos (isótropos) e orientados/movimentados (anisótropos). A cor negra, variavelmente impregnada na matriz das rochas silicáticas, é conferida pelos minerais máficos (silicatos ferro-magnesianos), sobretudo anfibólio (hornblenda) e mica (biotita), chamados vulgarmente de “carvão”.

É importante observar que as rochas conhecidas comercialmente como granitos correspondem a uma grande variedade de rochas magmáticas silicatadas que podem diferir grandemente em suas composições químicas bem como microtecidos e texturas. Como pode ser visto em Navarro (2002), somente no Brasil é possível encontrar uma grande variedade de granitos com características bastante distintas.

O granito é a rocha com maior resistência, isotrópica e por esse mesmo motivo, a mais usual para revestimentos de fachadas. Suas características mecânicas plenamente determinadas são a resistência à compressão, resistência à flexão, resistência ao choque, a resistência à flexão após ciclos de gelo-degelo, a resistência ao desgaste, a dilatação térmica, o módulo de elasticidade e a micro dureza. As características tecnológicas das rochas são obtidas através de análises e ensaios laboratoriais, executados segundo procedimentos rigorosos e normalizados (SILVA et al., 2008).

Tabela 7: Valores médios de ensaio

ROCHA	VERMELHO BRASÍLIA	PRETO INDIANO	VERDE LABRADOR
Resistência à compressão uniaxial (MPa)	209,86	108,71	183,18
Resistência à tração na flexão (MPa)	11,844	Frontal	7,746
		Superior	7,319
Coeficiente de dilatação térmica linear	5,55 . 10 <sup>-3</sup> mm/m°C	Frontal	7,13
		Superior	8,80
Massa específica aparente seca (Kg/m <sup>3</sup> )	2.621	2.770	2.677
Porosidade aparente - PA (%)	0,69	0,98	0,24
Absorção d'água - AA (%)	0,26	0,35	
Coeficiente de Poisson	0,25 (0,23)*	0,25	0,35*
Módulo de Elasticidade	75 (58,37)*	70	41,29*

Fonte: – modificado de RIBEIRO (2005). \* Moreiras e Paraguassú (2012).

### 2.3.1.1 Características Petrográficas do Granito Vermelho Brasília

O granito Vermelho Brasília, rocha ígnea é extraída no Município de Jaupací, Goiás, rocha de natureza magmática, baixa porosidade classificada como Sienogranito, NOGAMI (2013).

De coloração avermelhada, granulação grossa, de 3 mm a 50 mm ou mais, predominância entre 3 mm e 30 mm, com estrutura isotrópica e inequigranular. Os cristais maiores são de microclínio, com formas variadas, que podem ser ovalados, alongados a prismáticos. Possui bom embricamento mineral o que reflete na coesão da rocha (SILVA et al. 2015). Sua coloração vermelha é resultante de sua composição mineralógica, rica em feldspatos potássicos que proporciona maior resistência à ação externa motivo este que sugere sua aplicação em revestimentos externos de fachadas, além de sua estética bem aceita no mercado.

Silva et al. (2015), em análise petrográfica do granito Vermelho Brasília perceberam que este contém uma porcentagem de 18% de feldspatos róseos, raras partículas de cor creme

e quartzo acinzentado (félsicos), 12% de ferro-magnesianos que se materializa nos cristais nos tons de marrom, essa baixa proporção repercute numa baixa oxidação do material. A presença do quartzo pode possibilitar o microfissuramento, ponto vulnerável para absorção de água.

Tabela 8: Composição Mineralógica do granito Vermelho Brasília

Composição Mineralógica	% Modal
Quartzo	32,0
Feldspato Potássico (Microclínio)	41,0
Plagioclásio (oligoclásio)	16,0
Biotita	5,0
Acessórios <sup>7</sup>	2,0
Minerais Secundários <sup>8</sup>	4,0

Fonte: Modificado de NOGAMI (2013).

Segundo os autores, os granitos vermelhos apresentam índices físicos acima dos valores estabelecidos pela Norma da ABNT NBR 15844:2010, atestando boa qualidade para sua utilização em revestimentos exteriores.

### 2.3.1.2 Características Petrográficas do Granito Preto Indiano

O granito Preto Indiano, rocha metamórfica, extraída no município de Vargem Alta, Espírito Santo, é classificada como migmatito com estrutura dobrada e perfilada.

**Descrição Macroscópica** – Diferentes intensidades de gnaissificação, originando maior ou menor grau de paralelismo entre os níveis de paleossômicos e leucossômicos. O paleossômico apresenta cor cinza escura, textura granoblástica a granolepidoblástica, granulação média, entre 1,5 e 4,0 mm. O leucossoma apresenta cor esbranquiçada, textura granular hipidiomórfica com granulação média de 2,0 a 4,0 mm a média –grossa de 5,0 a 10,0 mm. A rocha apresenta baixos microfissuramento e alteração mineral (NOGAMI, 2013).

<sup>7</sup> Acessórios: opacos, apatita, zircão e granada

<sup>8</sup> Minerais Secundários: sericita, muscovita, epidoto, clorita, carbonatos, argilo-minerais, hidróxidos de ferro.

Tabela 9: Composição Mineralógica do granito Preto Indiano

Composição Mineralógica	Paleassoma (% modal)	Leucossoma (% mosal)
Quartzo	22,00	32,00
Feldspato	4,50	
Feldspato Potássico (microlíneo)		25,00
Andesina / oligoclásio	41,00	40,00
Biotita	23,00	3,00
Silimanita	5,00	
Muscovita	3,00	
Granata	1,00	
Cordierita	0,30	
Acessórios *	0,20	tr
Minerais secundários	tr	tr

\*Acessórios: opacos, zircão, carbonatos, sericita e argilo-minerais.

Fonte: Adaptado de NOGAMI (2013).

### 2.3.1.3 Características Petrográficas do Granito Verde Labrador

O granito Verde Labrador , rocha de natureza magmática (plutônica) é classificada como charkonito inequigranular discretamente gnaissificada, é extraída no Distrito Baixo Guandu, ES.

**Descrição Macroscópica** - Cor característica verde garrafa, estrutura discretamente orientada por pequeno estiramento mineral. É constituída por 40% de feldspato potássico como megacristais ovalados ou prismáticos isorientados com dimensões entre 1,5 mm a 45 mm, predominância entre 2,0 mm e 25 mm, charnockito isotrópico. Matriz com granulação variável média/grossa entre 2,0 e 8,0 mm. Os quartzos apresentam-se como agregados de grãos anedrais formando uma malha com aspecto achatado ou estirado com os demais cristais de rocha.

Tabela 10: Composição Mineralógica do granito Verde labrador

<b>Composição Mineralógica</b>	<b>(% modal)</b>
Quartzo	29,0
Feldspato Potássico (Ortoclásio)	43,0
Plagioclásio	20,5
Biotita	2,0
Hiperstênio	1,5
Hornblenda	0,5
Diopsídio	2,0
Acessórios(opacos, apatita e zircão)	1,0
Minerais Secundários (bastita, sericita, epidoto, óxidos e hidróxidos de ferro)	0,5

Fonte: Adaptado de NOGAMI (2013)

### 3 PATOLOGIA

#### 3.1 PATOLOGIA DE DESCOLAMENTO

A patologia mais agressiva e de maior risco para a segurança das pessoas é o descolamento de placas de pedras em fachadas e quanto mais alto o edifício e peso das placas, mais elevado é esse risco (COSTA, 2011).

Conforme exposto, os estudos estão direcionados no potencial de aderência das argamassas e em seu comportamento em revestimentos cerâmicos. O revestimento em placas pétreas merecem especial atenção e estudos mais específicos, abrangendo outras influências que não são somente físico-químicas e sim o comportamento mecânico das placas somadas aos outros comportamentos dos materiais agregados.

Para viabilizar a experiência optou-se pelo método matemático e programa computacional em substituição aos métodos experimentais tradicionais que demandariam vários corpos-de-prova, situações e testes que seriam executados com limitações e com resultados estanques e imprecisos. No programa, a possibilidade de mudanças e alterações, bem como a junção de vários dados e parametrização, gera resultado rápido e confiável.

Especialmente para o comportamento das placas de pedras em fachadas, por ser material que apresenta variações de características físico-mecânicas, os projetos de fachadas poderiam ser desenvolvidos com simulações neste programa.

Torna-se imperativo minimizar o risco de descolamentos de placas de pedra em fachadas, ainda que os procedimentos executados estejam de acordo com o projeto detalhado, considerando-se o cumprimento das etapas de projeto e execução para a excelência da construção.

Sabe-se que as maiores interferências para o descolamento das placas pétreas aderidas ao suporte pelo método tradicional, são: especificação do tipo de pedra; dimensionamento das placas, incluindo espessura; ação dos ventos; gradiente térmico; variações higrométricas; infiltrações de água; tipo de cola; rejunte; juntas de dilatação; dentre outros somados aos métodos executados.

Ainda que na construção civil o método tradicional venha a ser substituído pelos métodos indiretos ao suporte, conviverá com aquelas construções já existentes que necessitam de uma adequação e aquelas de pequeno e médio porte que não comportam um projeto que exige técnicas e projetos específicos.

Este trabalho de análise de placas com nova geometria, objetiva analisar os resultados referentes ao intertravamento entre placas, aderência e promoção de maior segurança para as placas aderidas diretamente ao suporte, adentrando numa área ainda não explorada, onde não se aventou a possibilidade de outras formas geométricas das placas pétreas possibilitarem influenciar na aderência.

Um significativo número de pesquisas têm sido desenvolvidas na relação de aderência das argamassas - substratos e argamassas – revestimentos, além das propriedades físico-química das argamassas colantes.

Ribeiro et al. (2015), utilizaram o granito Vermelho Capão Bonito para teste de efeito de variação da temperatura na aderência de placas granito fixadas com argamassa em revestimento externo, com variação de temperatura gradativa de 23°C, 30°C, 40°C, 50°C e 60°C, resultando numa diminuição do grau de aderência na ordem de 48% a 42%, com argamassas desenvolvidas em laboratório e argamassa industrializada, com probabilidade de fissuras na interface, concluindo que o gradiente térmico influencia sobremaneira na perda de resistência à tração na interface placa de pedra e argamassa.

Algumas outras pesquisas utilizando o métodos matemáticos, tem sido praticadas em especial em testes de aderência de argamassas, substratos e revestimentos com o objetivo de identificar as interações na colagem dos materiais e entender as características de cada material, as influências externas e seu comportamento em conjunto.

Conforme Pereira (2008), a condição de calor é regida pela *Lei de Fourier*, onde a quantidade de calor que atravessa uma placa, na direção normal do fluxo calorífico, por unidade de tempo, é proporcional ao gradiente térmico, logo este ciclo térmico resulta na fadiga do revestimento.

### 3.2 FATORES QUE INTERFEREM NO DESCOLAMENTO DE PLACAS DE GRANITO ADERIDAS

As causas de descolamentos de placas de granito em fachadas são várias, observa-se entretanto, que alguns fatores são fatídicos independente da forma construída, dentre eles, a variação de temperatura, ação da umidade, ação dos ventos, peso das placas, fadiga, a falta de juntas de dilatação, cálculo de espaçamento de rejunte, a escolha do tipo de placa pétrea e o conhecimento de suas características petrográficas.

Dentre os fatores causadores de descolamentos de placas de granito de fachadas, as fissurações das próprias placas, por permitirem a entrada de água e desagregação dos

elementos de suporte. Estas fissuras ou possíveis fraturas (Figura 20) podem ocorrer por acidentes em zonas baixas e vulneráveis a impactos.

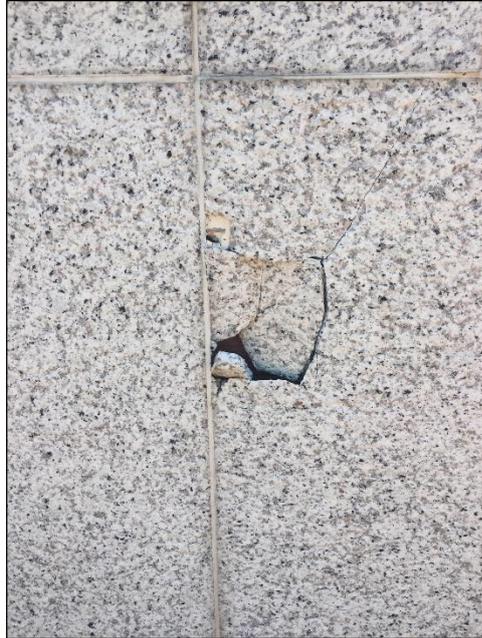


Figura 20: Placa de granito da fachada fraturada por impacto



Figura 21: Trinca em placas de granito de fachada

Outra patologia a ser considerada em placas aderidas pelo método tradicional é a eflorescência, causada pela dissolução de sais existentes nas camadas de suporte ou na própria placa, que quando a água que a carregam evapora, formam camadas de sais na superfície (cristalização).

Segundo Navarro e Artur (2002), a importância do conhecimento do comportamento das rochas ornamentais, seus critérios de escolha, aplicabilidade tem motivado estudos e

pesquisas em todo o mundo. Os autores analisaram rochas dos estados de São Paulo, Bahia e Espírito Santo, onde consideraram como ensaios tecnológicos prioritários a porosidade aparente, desgaste abrasivo Amsler, resistência à compressão uniaxial e módulo de ruptura, concluindo que os resultados obtidos se adéquam como parâmetros para a previsão de comportamento físico e mecânico dos granitos ornamentais para revestimentos.

Sabe-se que a estrutura das rochas define sua resistência, assim o estudo da cristalografia das pedras e sua composição mineral, resulta em melhor escolha das pedras de revestimento.

As manchas nas placas pétreas podem ser originadas por penetração de substâncias a partir da ancoragem, da superfície da própria pedra quer por fissura quer por sua característica mineralógica e por pigmentação de material utilizado nas camadas de suporte, além daquelas em decorrência de poluição, conforme mostram as figuras 22 e 23.



Figura 22: Placas de granito com manchas



Figura 23: Placas de granito com manchas

Segundo Rodrigues et al. (2006), em estudo de caso em fachadas em Portugal, observaram a probabilidade de descolamento de placas de pedras aumenta com o peso das placas e a ação do vento na estrutura.

As tensões resultantes das variações térmicas e higrométricas associadas ao peso das placas pétreas criam zonas de fragilidade no sistema de fixação.

A fadiga no sistema, especialmente provocada por gradiente térmico é causa direta de ocorrências de patologias em revestimentos de fachadas relacionadas ao comportamento físico-mecânico, sabendo-se que os ciclos de variação de temperatura ao longo do dia, contribui para a redução da aderência e variação dimensional, por instabilidade de módulos de elasticidade (BAUER et al., 2011).

Para Bauer et al. (2012), como resultado de ciclos de temperatura diária, a fadiga faz com que o processo de ruptura se instaure, com a propagação de microfissuras.

A fadiga é o processo que causa falha prematura no sistema ou dano permanente, por carregamento cíclicos ou repetitivos. Abaixo, a figura 24 exemplifica o processo.

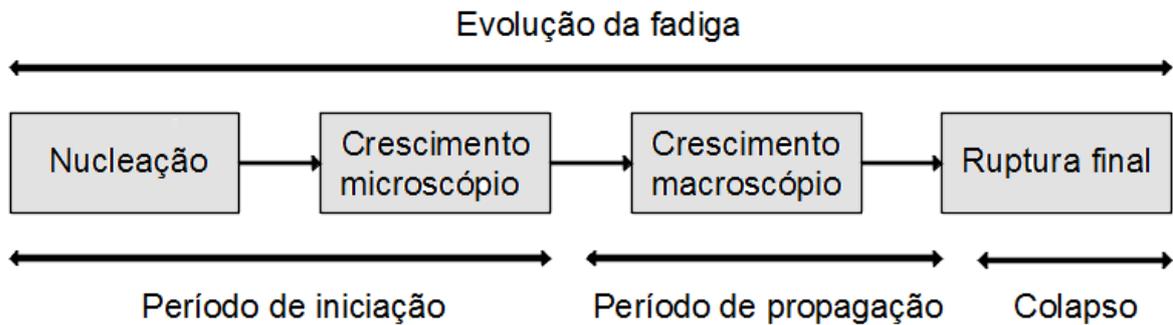


Figura 24:- Processo de Evolução da Fadiga

Fonte: Adaptado de Bauer et al. (2012).

Os revestimentos de fachadas aderidos, segundo o Franco (1998), são afetados por deformações das estruturas, seu ajuste físico e comportamental em conjunto com suas cargas, sua arquitetura e elementos. Estas deformações ocorrem devido às ações de retração e deformação lenta do concreto, além daquelas que interferem diretamente na estrutura.

Segundo a NBR 6118 (ABNT 2003), são classificadas essas ações como:

**Permanentes** – que são àquelas ligadas diretamente à acomodação da própria estrutura, seus elementos de formação como vigas, alvenarias, suas instalações, fluências do concreto, outros.

**Variáveis** – São àquelas que interferem na estrutura em períodos intermitentes e dinâmicos, que são as ações do tempo como vento, sol, chuva, gradiente térmico.

**Excepcionais** – São os considerados por ação e acontecimentos de acidentes, sinistros (incêndio), fenômenos da natureza, obra de alta percussão, intervenientes não previstos.

Para Sabbatini (2005), a fluência é um grande fator de deformação nas estruturas, provocando rupturas em alvenarias e patologias em revestimentos de fachadas.

A estrutura também é vulnerável a deformações por ação do vento, considerando sua velocidade de acordo com a região e o tipo de arquitetura e entorno, promove movimentos cíclicos, podendo causar pequena curvatura (SALVADORI, 2002). Segundo Medeiros (1999), apud Ribeiro (2006), ainda que estes movimentos sejam invisíveis, provocam tensões entre as camadas de revestimentos, por flexão nas fachadas.

Moreira (2002) demonstrou através de imagem, os intervenientes dinâmicos que incidem sobre a estrutura de um edifício que causam movimento e deformação. Pode-se

somar a estes, os tipos de solo com menor capacidade de suporte de cargas, propensos à grandes deformações e recalques.

Outros fatores podem causar grandes deformações na estrutura, como a demolição de prédios vizinhos, a transformação de uso do edifício, com aumento e variação da carga instalada e outros conforme a figura 25 abaixo.

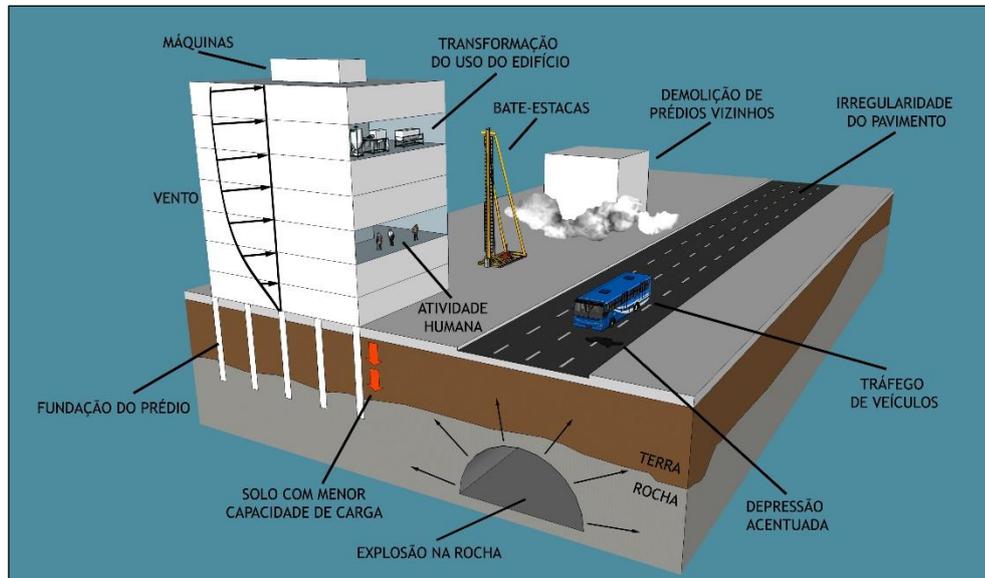


Figura 25: Ações dinâmicas que provocam vibrações e possíveis patologias nas construções

Fonte: Adaptado de Moreira (2002).

Segundo Costa (2011), o peso das placas pétreas direciona a escolha de argamassas mais concentradas, que resultam em elevado índice de retração com conseqüente fissuração e/ou descolamento do suporte ou placa.

Para Ribeiro (2006), os fatores que originam movimentos nos revestimentos de fachadas devem ser externos, quanto ao comportamento dos materiais que são utilizados na construção e componentes da estrutura, variação constante da umidade e temperatura somado à deformação da própria estrutura ou dimensionais. Desta forma, sintetiza-se na tabela 6, a classificação quanto à natureza e reversibilidade.

Tabela 11: Classificação dos movimentos dos elementos construtivos quanto à natureza e reversibilidade

Natureza	Movimento	Reversibilidade
Variação de temperatura	Movimento brusco pelo choque térmico	Reversível
	Movimento térmico	
Ação da umidade	Movimento higroscópico	
	Expansão por umidade das placas cerâmicas Retração da argamassa de emboço ou da argamassa colante da camada de fixação	Irreversível
Comportamento intrínseco dos componentes e elementos do edifício	Movimentos da estrutura de concreto devido às cargas permanentes: peso próprio, fluência, retração	
Ação do vento	Movimento do edifício devido a cargas de vento	Irreversível/Reversível (avaliar cada caso especificamente)

Fonte: Ribeiro (2006).

Outro fator que pode interferir para o descolamento de placas pétreas é a ausência ou mau dimensionamento de juntas e rejunte, bem como a degradação desses materiais tornando um caminho para a penetração de água.

### 3.2.1 Rejunte e Juntas

As juntas de assentamento são as existentes entre placas de um revestimento modular, as quais serão preenchidas pelo rejunte

O rejunte como preenchimento de espaços entre placas deve impedir a passagem de água para o revestimento, agente que provoca o surgimento de manchas, ciclos de umidade, podendo provocar destacamentos de placas e sua degradação, além de provocar deterioração da argamassa colante.

Desta forma, as juntas devem ser estanque e ter como características fundamentais proporcionar o alívio de tensões, absorção de movimentos da estrutura aderida, proporcionando a integridade físico-mecânica dos revestimentos.

Para Junginger e Medeiros (2003), as funções mais importantes dos rejuntes são: auxiliar no desempenho estético do revestimento; estabelecer regularidade superficial; compensar variação de bitola e facilitar o assentamento das placas; vedar o revestimento cerâmico; permitir a difusão de vapor d'água e proporcionar alívio de tensões. Os autores se referem a três formas de rejuntes industrializados:

- cimentícios monocomponentes: forma de pó, com adição de água para sua utilização;

- cimentícios bicomponentes: com uma fração seca e outra na forma de emulsão aquosa (aditivo), para mistura quando da utilização;
- base orgânica: compostos por dois ou mais componentes pré-dosados, formando pasta quando misturados.

O ITC (1987) apud Junginger e Medeiros (2003), sugere que para aplicação em fachadas, o rejunte cimentício deve ser bi componente. Os selantes tipo elásticos por serem materiais resilientes, absorvem os movimentos de origem físico-mecânica e deformações da pedra sem romper.

Para Camposinhos (2009), os rejuntes e juntas deverão ser à base de elastômeros, do tipo poliuretano, cuja flexibilidade permite ao conjunto um equilíbrio de tensões, absorvendo as deformações das placas de pedra sem romper.

As juntas de assentamento com maiores espessuras, contribui para maior estabilidade do sistema, ainda que preenchidas com rejunte convencional, LOBATO PAES (2000). Entretanto, a elevada rigidez dos materiais de rejunte aumenta as tensões nas juntas entre placas.

Considera-se que o revestimento faz parte de um conjunto de camadas onde cada material tem propriedades e comportamentos distintos e ao mesmo tempo associados, cujo limite de resistência de cada camada se atingido, será transmitido ao revestimento, JUNGINGER (2003).

As larguras das juntas deverão ser maiores quando as placas de pedra tiverem dimensões e espessuras maiores e deverão ser de acordo com a especificação do fabricante do material. Importante atentar para o prazo de validade do rejunte que durante sua vida útil vai perdendo suas características iniciais por ação de exposição ao tempo e agentes nocivos.

Para o dimensionamento das juntas, importante submeter a fachada de placas de rocha às variações térmicas (coeficiente de dilatação térmica linear) de 0°C a 50°C, devido à deformabilidade resultante e outras solicitações que as camadas de revestimentos recebem durante a vida útil de projeto.

Segundo a ABNT NBR 13755:1996, as juntas de movimentação são definidas como “espaço regular cuja função é subdividir o revestimento para aliviar as tensões provocadas pela movimentação de base ou do próprio revestimento”.

Detalhes importantes de aplicação de rejunte, segundo Junginger (2003).

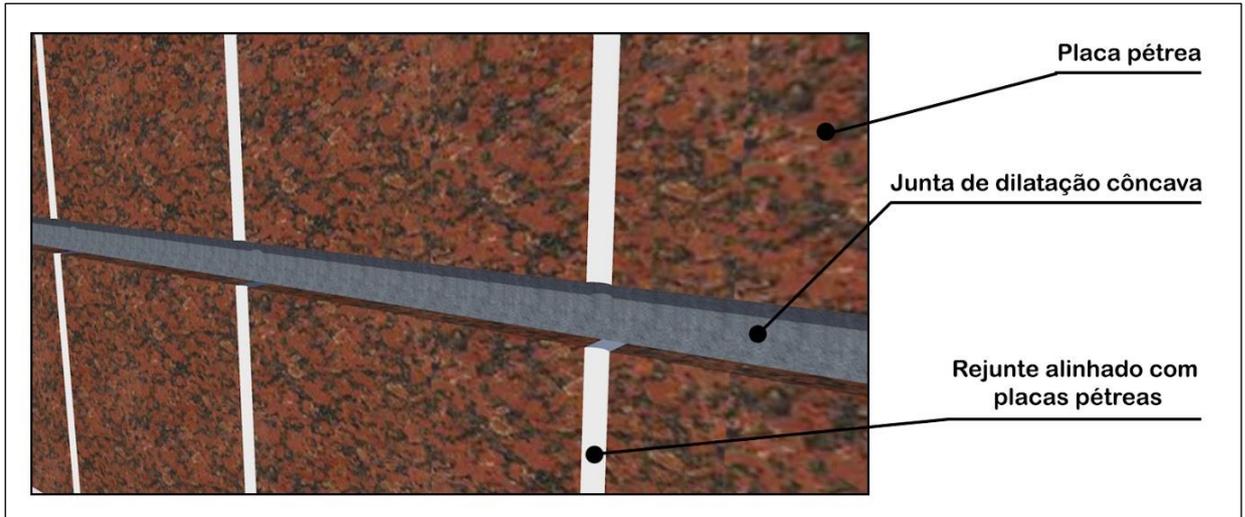


Figura 26: Bom acabamento de rejunte na junta de dilatação

Fonte: Adaptado de Junginger e Medeiros (2003)

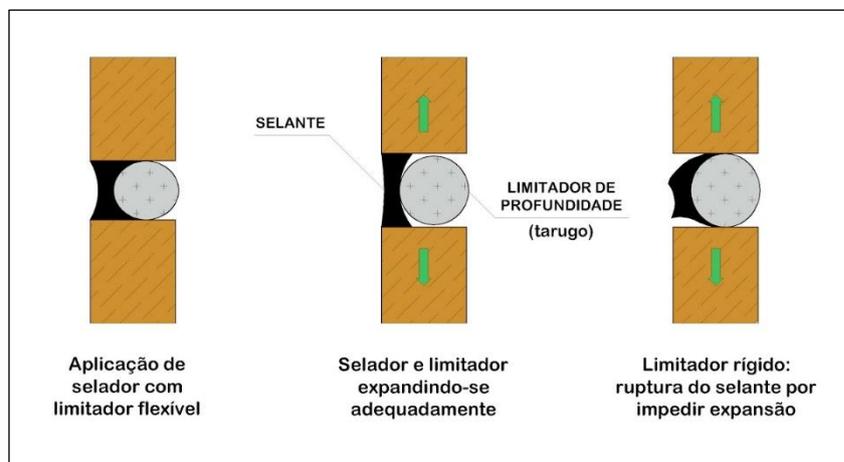


Figura 27: Disposição do selante e limitador de profundidade

Fonte: Adaptado de Junginger e Medeiros (2003).

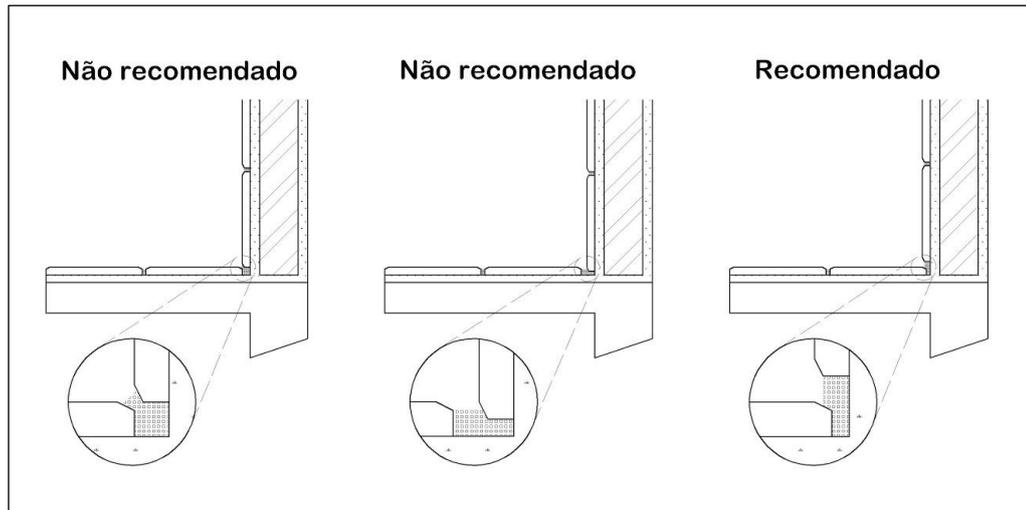


Figura 28: Detalhe de encontro entre placas de parede e piso/ parede e teto

Fonte: Adaptado de Junginger (2003).

Tendo como fator crítico a fadiga dos revestimentos, Wolf (2004) analisou trabalho realizado em comissões para desenvolvimento de padrão de teste de durabilidade de selantes <sup>9</sup>ISO TC59/SC8 e <sup>10</sup>RILEM TC139-DBS), considerando fatores de envelhecimento acelerado e ciclagem mecânica. Observou que os testes que considerava os ciclos de degradação sem fadiga e ciclagem, resultavam inferiores à durabilidade prevista.

Os testes utilizados para identificar falhas e mudanças na aparência de superfície ficaram próximos às condições reais de uso. A indústria necessita desenvolver métodos para estabelecer dados de desempenho e durabilidade dos selantes, esbarrando na complexidade e variação dos fatores que interferem no ciclo de vida do selante.

Interessante destacar que não obstante ser o método de **fixação indireta** ao suporte o mais indicado para aplicação de placas pétreas, por razões de avanço tecnológico, segurança e manutenibilidade, este método comparado ao método de **fixação direta** ao suporte apresenta um maior número de patologias (COSTA, 2011).

<sup>9</sup> ISO 1993, Proposed Test Method for Durability of Sealants Subject to Outdoor Weathering as Simulated in a n Artificial Weathering Machine, ISO TC59/SC8 Committee Document, International Standardization Organization, Geneva.

<sup>10</sup> RILEM 2001, 'RILRM TC 139-DBS: Durability test method – Determination of changes in adhesion, cohesion and appearance of elastic weatherproofing sealants for high movement façade joints after exposure to artificial weathering', Materials & Structures, in print.

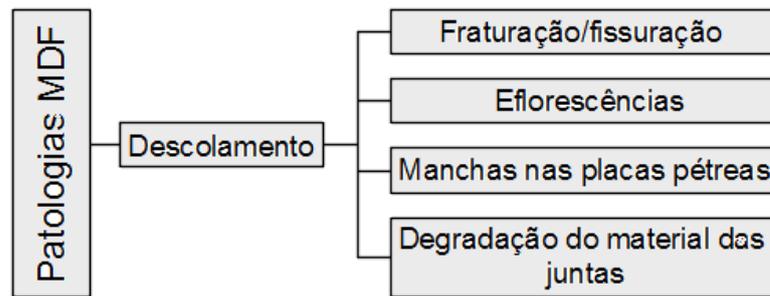


Figura 29: Gráfico de patologias associadas ao método de fixação direta (MFD).

Fonte: Modificado e adaptado de Costa (2011).

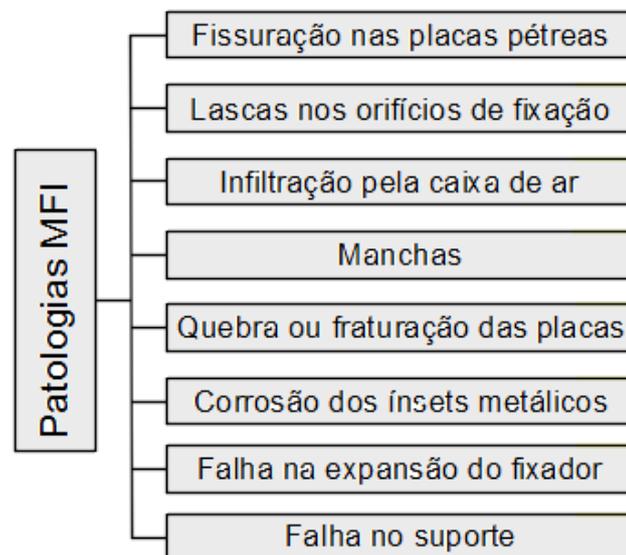


Figura 30: Gráfico de patologias associadas ao método de fixação indireta (MFI).

Fonte: Modificado e adaptado de Costa (2011).

## 4. METODOLOGIA

### 4.1 TRABALHOS DESENVOLVIDOS COM A UTILIZAÇÃO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA COM PLACAS DE ROCHAS EM REVESTIMENTO DE FACHADAS E ARGAMASSAS DE REVESTIMENTOS

Em alguns ensaios tem sido utilizado o método dos elementos finitos, Temoche-Esquivel et al. (2007), aplicaram no programa ANSYS nas variações de temperatura para revestimento de argamassa cimentícia em suporte de concreto, com o objetivo de analisar as deformações e tensões, em camada de reboco em fachada sob propriedades mecânicas (módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e densidade) e propriedades térmicas (condutividade, calor específico e coeficiente de expansão térmica) diferentes (GASPAR, 2011).

Em fachadas revestidas com pedras naturais, Pacheco utilizou o método de elementos finitos para o estudo de sistemas de fixação com ferragens tipo *parabolt* e a relação com a perfuração na placa de pedra granito, sendo utilizadas para o estudo dois tipos de granito, o Amarelo de Vila Real e Cinzento de Apalhão. Analisou-se as diferenças de tensões entre os dois granitos com diferentes condições de fixação dos *parabolts*.

Através do método dos elementos finitos, as autoras Silva, Flores-Colen e Gaspar (2012), estudaram a perda de aderência da argamassa, fazendo uma análise paramétrica com fatores que interferem na zona coesiva entre argamassa e substrato. Atestado pelas autoras, a modelagem numérica possibilita a análise de vários modelos de empenas com diversas tipologias, materiais e substratos com características diferentes, presença de patologias, interferência do clima, carregamentos e outras características. Desta forma é possível em reduzido espaço de tempo ter respostas das condições entre revestimento e parede, com condições de aderência e probabilidades através da análise numérica.

Da Silva et al. (1998), através de modelagem numérica em elementos finitos, estudaram os gradientes de temperatura em fachada e concluíram que a variação de temperatura em torno de 45°C, geram tensões de tração equivalente a 0,5 Mpa na interface entre revestimento cerâmico e argamassa colante, podendo culminar em colapso das peças.

Moscoso (2013), analisou as tensões atuantes na argamassa colante de fachadas de edificações sob ação da fadiga termo-mecânica utilizando o estudo numérico, com o objetivo de melhor quantificar as patologias em fachadas com revestimentos cerâmicos e avaliar a vida

útil do sistema. Considerou a fadiga por gradiente térmico e as tensões resultantes que culminam no colapso.

A pesquisa progrediu por meio de literatura que trata de estudos e experimentos sobre aderência com a utilização de argamassas colantes, com maior disponibilidade de pesquisas e ensaios para o material cerâmico.

O levantamento de material de placas pétreas para revestimento de fachadas não se limitou às placas por colagem e sim expandiu-se no estudo de sistemas de fixação indireta, subsidiando a proposta desta dissertação.

Complementarmente foi feita vasta leitura sobre pesquisas e trabalhos referentes às patologias de fachadas revestidas com placas pétreas, especialmente o descolamento das placas fixadas pelo método tradicional e concluiu-se que os estudos disponíveis imputavam severamente às argamassas as causas destas anomalias.

Muitos outros trabalhos de experimentos, utilizavam além dos tradicionalmente testes e análises, os métodos matemáticos através de programa computacional resultando num modelo mais elaborado e parametrizável.

Vários estudos foram feitos com o objetivo de entender e buscar uma melhor performance para as placas pétreas em fachadas, com diferentes tipos de argamassas e suas características de aderência.

A proposta de uma nova geometria de placa de pedra para revestimento de fachadas, foi ensaiada através de modelo matemático (MEF) em *softwer*, como mais uma alternativa de pesquisa na busca de modelos que possam agregar segurança e instigar outras investigações .

Para este estudo foi utilizado o método dos elementos finitos, cuja aplicação segundo Halfen (2011), tornou-se corrente a partir da década de 60, para cálculos de estruturas mais complexas estimulado pelo uso de computador, viabilizando e desenvolvendo o método. O Método dos Elementos Finitos, aplicado no programa ANSYS, tem sido efetivamente utilizado para cálculos matemáticos, de estruturas de engenharia e de medicina, física , resultando em modelos de comportamento que correspondem aos testes laboratoriais.

Foram feitas revisões nas Normas da ABNT relacionadas aos intervenientes no processo de colagem de placas de pedras em fachadas: placas fixadas por insertos metálicos, argamassas colantes, norma de desempenho (ABNT NBR 15575-4), vento nas edificações (ABNT NBR 6123:1998).

Para atingir os objetivos do presente trabalho, foi feita inicialmente uma pesquisa bibliográfica a níveis nacional e internacional, abrangendo publicações pertinentes ao material pétreo e suas características, mercado e aplicações.

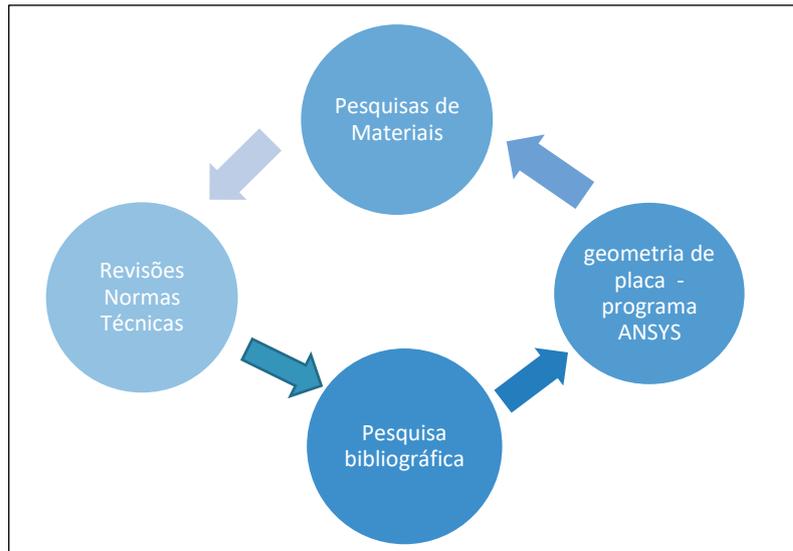


Figura 31: Gráfico de atividades de pesquisa

Neste capítulo, é descrita a metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho e a simulação do estudo de aderência em placas de granito, por meio dos elementos finitos, com o recurso do programa ANSYS.

Utilizou-se a força do vento como parâmetro principal para promoção do descolamento de placas pétreas em revestimentos de fachadas, mais o peso próprio das placas. Nas fachadas revestidas com placas de rochas, vários são os intervenientes que provocam o descolamento das placas, dentre eles a ação dos ventos e o peso próprio das placas. As variações térmicas são notadamente, origem da fadiga, fator que no decorrer do tempo resulta em colapso dos revestimentos.

A força do vento e sua velocidade devem ser consideradas conforme a ABNT NBR 6123:1988, onde a análise inicial se dá pelo gráfico de isopletras (Figura 32), onde fornece a velocidade do vento nas regiões do Brasil. Desta forma, na região IV, obtém-se o vento básico ( $V_0$ ) variando entre 40 e 45 m/s, tendo sido considerada para este trabalho a velocidade de 40m/s.

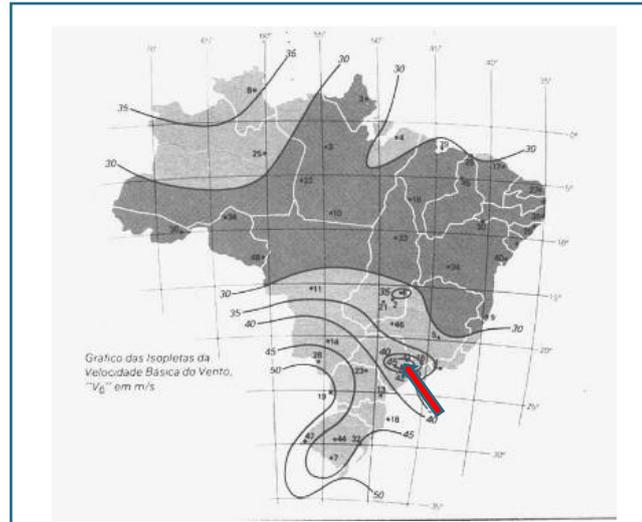


Figura 32: Gráfico das Isoplethas da Velocidade Básica do Vento

Fonte: ebah.com.br

Os modelos foram analisados levando em consideração a ação do vento (sua velocidade) e pressão por sucção, por ser a de maior impacto nas estruturas e peso próprios das placas, mais as características físico-mecânicas de cada tipo de granito escolhido para a modelagem.

Foi aplicado uma força de vento com aumento gradual, dividido em 80 etapas, até que se obtivesse o limite de tensão que proporcionasse o descolamento. Essa divisão em etapas não requer equação adicional, pois o ANSYS faz automaticamente essa simulação, bastando especificar o número de etapas.

#### 4.2 GEOMETRIA DAS PLACAS DE GRANITO

Foi construído um modelo básico retangular com dimensões de 600 x 400mm x 30mm (largura x altura x espessura) e outros dois modelos sugeridos com a forma em “L” e “S” com as respectivas dimensões, definidas de maneira que garantisse equivalência de áreas entre elas e, conseqüentemente, a mesma força de empuxo:

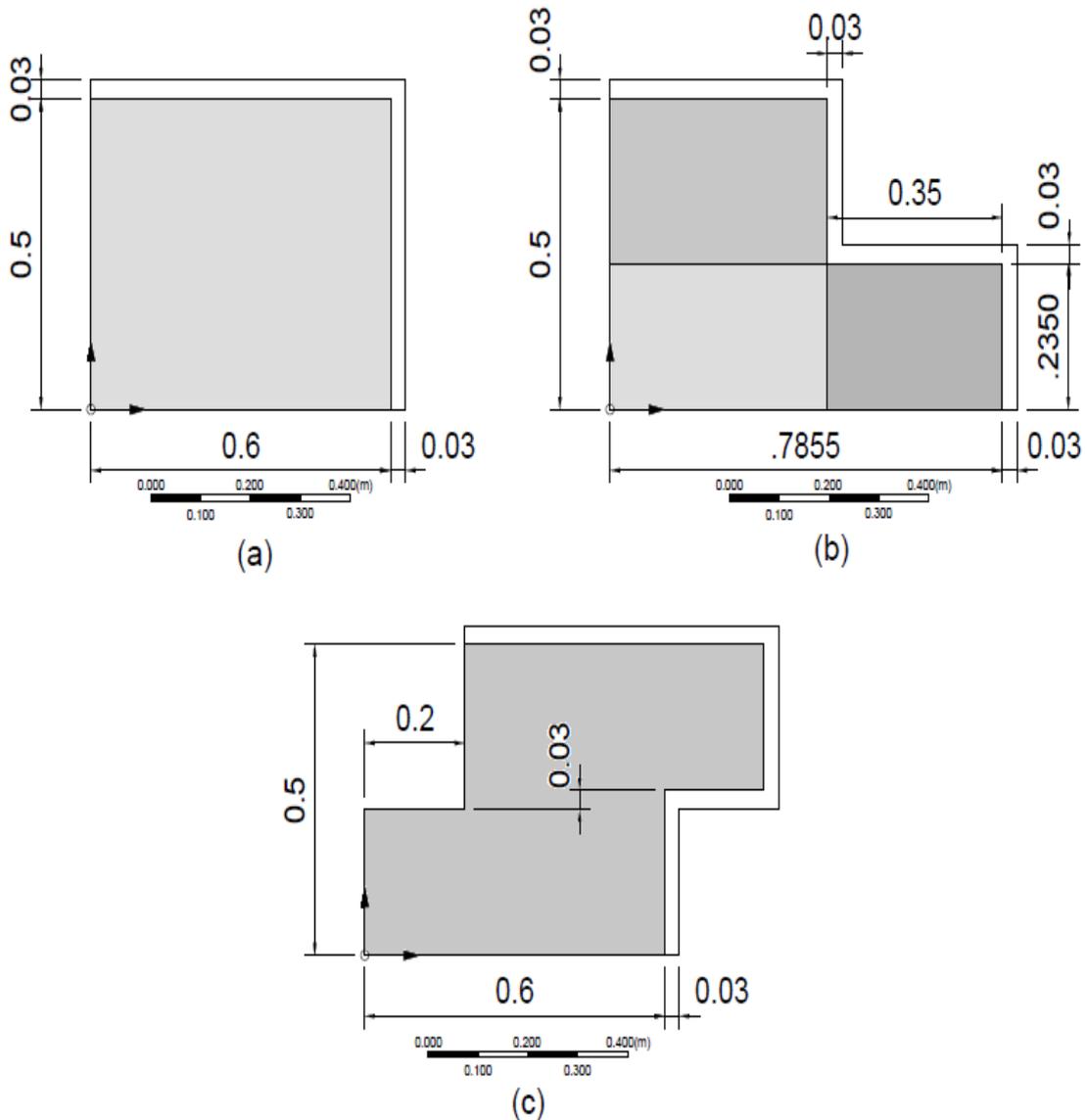


Figura 33 (a), (b) e (c): Modelos e dimensões das placas granito nas formas retangular, em “L” e em “S”.

A geometria foi definida tridimensionalmente, com base nas espessuras do revestimento interno, alvenaria, emboço, argamassa colante, placas e rejunte. Divisões transversais foram feitas através de todas as camadas a partir dos perímetros das placas, com o objetivo de garantir a compatibilidade para o contato entre as diferentes camadas (Figura 34). A parede modelada possui cinco placas ao longo da largura e cinco ao longo da altura.

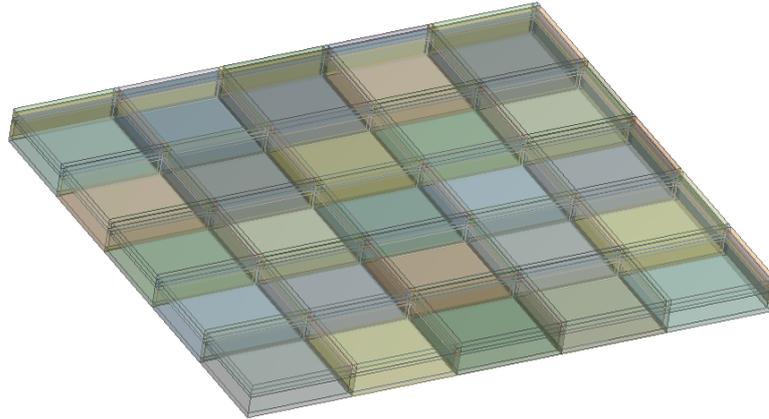


Figura 34: Geometria tridimensional da parede (placas retangulares)

Neste trabalho, não foi considerado o cálculo devido ao esforço do vento para se chegar à espessura das placas, pois esta foi determinada em função do que preconizam as normas ABNT NBR 13707:1996 e 13708:1996. Foi suprimida a utilização de grampos metálicos para fixação preconizada pela norma ABNT NBR 13707:1996, item 5.3 para prédios acima de 15 m de altura, com o objetivo de simular situação crítica.

As dimensões arbitradas para a placas de geometria retangular foi para manter as dimensões usualmente utilizadas em revestimentos de fachadas por ser de manuseio facilitado. As dimensões das placas nas geometrias em “L” e “S” são resultantes da equivalência da placa retangular.

As equações que governam o fenômeno em análise já estão implementadas pelo ANSYS nos tipos de elementos utilizados e nas características dos materiais considerados.

O modelo desenvolvido tem uma característica peculiar, pois, apesar de ser complexo, incluindo a não linearidade dos elementos de contato e diversas camadas em domínio tridimensional, o resultado de interesse é singular (velocidade máxima do vento suportada).

#### 4.3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Utilizou-se o programa ANSYS Mechanical, v17, Help System, (Mechanical Applications, ANSYS, Inc.) cujo processador permite desenvolver a geometria do modelo, características mecânicas, físicas e ainda permite moldar as características de fronteira. Este programa trabalha em domínio tridimensional, fundamental para a análise dos componentes da interface de fachada.

A entrada de dados segue uma sequência lógica, onde são inseridos a geometria das placas, características mecânicas das placas, elementos intervenientes, condições de fronteira, geração da malha e processamento.

Os modelos foram analisados levando em consideração a ação do vento (sua velocidade) por sucção e aplicado numa velocidade gradativa, o peso próprios das placas (Tabela 12), mais as características físico-mecânicas de cada tipo de granito escolhido para a simulação (Tabela 12)

Para as análises foram consideradas camadas: suporte (alvenaria de tijolos cerâmicos), argamassa de regularização (emboço), argamassa colante industrializada, rejunte flexível e placa de granito, com simulações de tensões em pares de camadas.

Para interpretação dos resultados obtidos através da parametrização, como as tensões, deslocamentos, gradiente térmico, o modelo oferece imagens e paleta de cores para melhor identificação.

Tabela 12: Propriedades dos materiais considerados na análise

Material / Propriedade	Alvenaria <sup>11</sup>	Arg. Colante <sup>12</sup>	Emboço <sup>13</sup>	Granito Vermelho <sup>14</sup>	Granito Preto Indiano	Granito Verde Labrado	Rejunte Flexível <sup>15</sup>
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	969	1900	2310	2621	2770	2677	2540
Módulo de elasticidade (GPa)	21,44	6,389	0,571	75 <sup>16</sup>		41,29*	9
Coefficiente de Poisson	0,2	0,2	0,2	0,25*		0,35*	0,22
Coef. de exp. térmica (°C <sup>-1</sup> )	6,8.10 <sup>-6</sup>	7,2.10 <sup>-6</sup>	1,15.10 <sup>-5</sup>	5,7.10 <sup>-6</sup>		7,31	6,4.10 <sup>-7</sup>
Tensão máxima de tração (MPa)	2,5	4,7	4,7	11,8	7,74	11,23	4
Tensão máxima de compressão (MPa)	10	10,7	10,7	210	108,71	183,18	20
Condutividade térmica (W/m.K)	0,494	1,15	1,4	3			1,4
Calor específico (J/kg.K)	584	1000	1000	840			1000

<sup>11</sup> Cálculo equivalente para tijolo de 6 furos 10x16cm com 1cm de argamassa entre tijolos

<sup>12</sup> NBR 15220, NBR 12815, Moscoso (2013), Saraiva (2001), WEBER

<sup>13</sup> NBR 15220, NBR 12815, Moscoso (2013), Saraiva (2001), WEBER

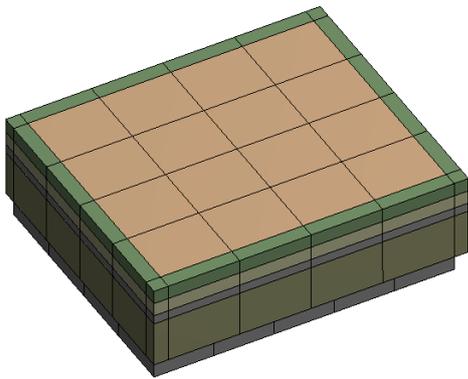
<sup>14</sup> Nogami (2007), NBR 15220, Rahn (1986), Johnson e Defraff (1988), Goodman (1989), Walthan (1999) e Duncan (1999)

<sup>15</sup> Saraiva (2001), Paes (2001)

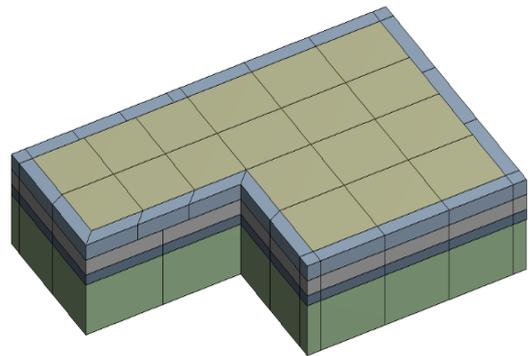
<sup>16</sup> \*Moreira e Paraguassú (2012)

#### 4.4 DISCRETIZAÇÃO DO DOMÍNIO – MALHA GERADA

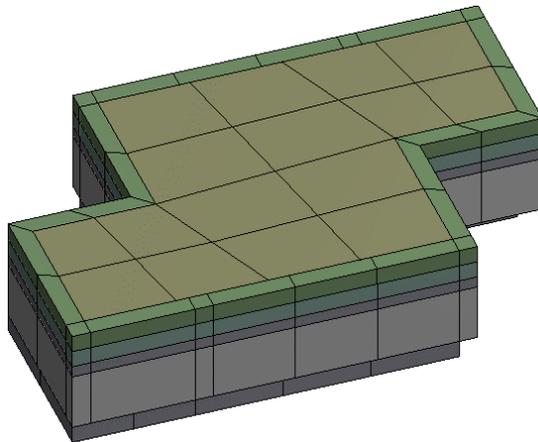
Como parte da metodologia do MEF, o domínio foi discretizado (dividido) em elementos, conforme ilustrado na Figura 35 com a seção de uma placa isolada. Para representação das camadas da parede e as placas, foram utilizados elementos do tipo SOLID186 (citação manual ansys), que são definidos, cada um, por 20 nós, posicionados nos seus vértices e nos pontos médios das arestas (Figura 36). Esses elementos possuem função de forma quadrática, exigindo um número menor de elementos para alcançar uma precisão aceitável.



(a) Placa retangular



(b) Placa em “L”



(c) Placa em “S”

Figura 35 (a), (b) e (c) – Discretização do domínio em elementos finitos

As placas foram divididas por quatro elementos ao longo da altura e quatro ao longo da largura, contabilizando 16 por placa. Ao total, incluindo demais camadas e placas, cerca de 3500 elementos e 30 mil nós foram necessários para definir a malha de elementos finitos.

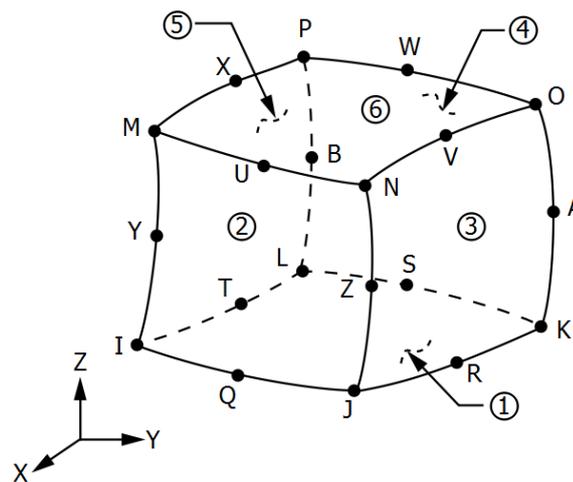


Figura 36: Elemento *SOLID186*.

Fonte: ANSYS Manual

Para representar a aderência entre as camadas e o comportamento do conjunto foram utilizados os pares de elementos de contato *CONTA174* e *TARGE170*, configurados com a opção “*bonded*”. Os elementos de contato utilizam os mesmos nós dos elementos sólidos já definidos para representar as camadas. Desta forma, com uma formulação específica, eles são capazes de transferir carregamentos ou deslocamentos de uma camada para outra adjacente.

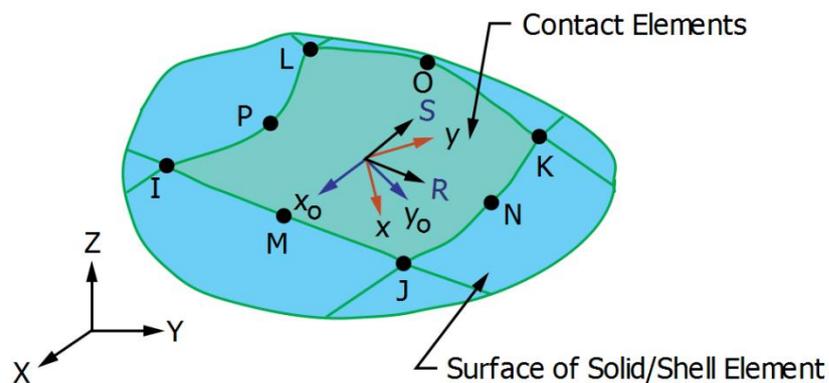


Figura 37: Elemento *CONTA174*.

Fonte: ANSYS Manual

#### 4.5 CONDIÇÕES DE CONTORNO E CARREGAMENTOS

Como condição de contorno, foram fixados os deslocamentos dos nós correspondentes ao perímetro da camada de alvenaria, demarcada pela camada azul da figura 38.

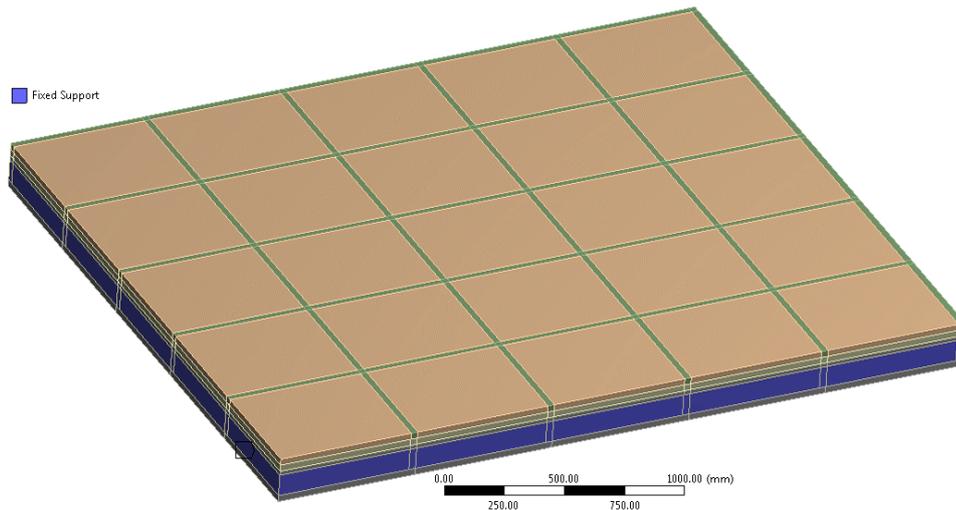


Figura 38: Fixação do perímetro (em azul) da camada de argamassa

A aceleração da gravidade de  $9,8 \text{ m/s}^2$  foi aplicada em todo o domínio, o que, junto com a massa específica informada (Tabela 12), constitui o peso próprio da estrutura.

Uma pressão de sucção foi aplicada na superfície da parede, que corresponde à face externa dos elementos do rejunte e das placas. O valor da pressão é calculado, conforme a NBR 6123, por:

$$\Delta p_e = q \cdot c_{pe} \quad (1)$$

Onde:  $c_{pe} = -1$  e

$$q = 0,613 \cdot (S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot V_0)^2 \quad (2)$$

Os parâmetros  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$  foram considerados como 1,00 (terreno plano), 1,13 (classe A, categoria V,  $z = 10$ ) e 1,10 (grupo 1), respectivamente. A velocidade  $V_0$  máxima aplicada é 40 m/s. A velocidade foi aplicada gradualmente, dividida em 80 etapas.

#### 4.6 SIMULAÇÃO 1

Foram aplicados os carregamentos de peso próprio das placas (Tabela 12). Na primeira etapa foi desenvolvido um modelo com a aplicação da velocidade do vento até que resultasse numa tensão superior ao limite de 0,1 MPa Nogami (2013), mesmo que pontual entre placa, argamassa e rejunte. Quando a tensão máxima de aderência ultrapassava 0,1 MPa, a simulação era interrompida assumindo-se que, ao ultrapassar este valor dado como parâmetro, ainda descolando num único ponto, chegara num estado limite último.

Na figura 39, é ilustrado o modelo geométrico das placas retangulares e discretização com malha de elementos.

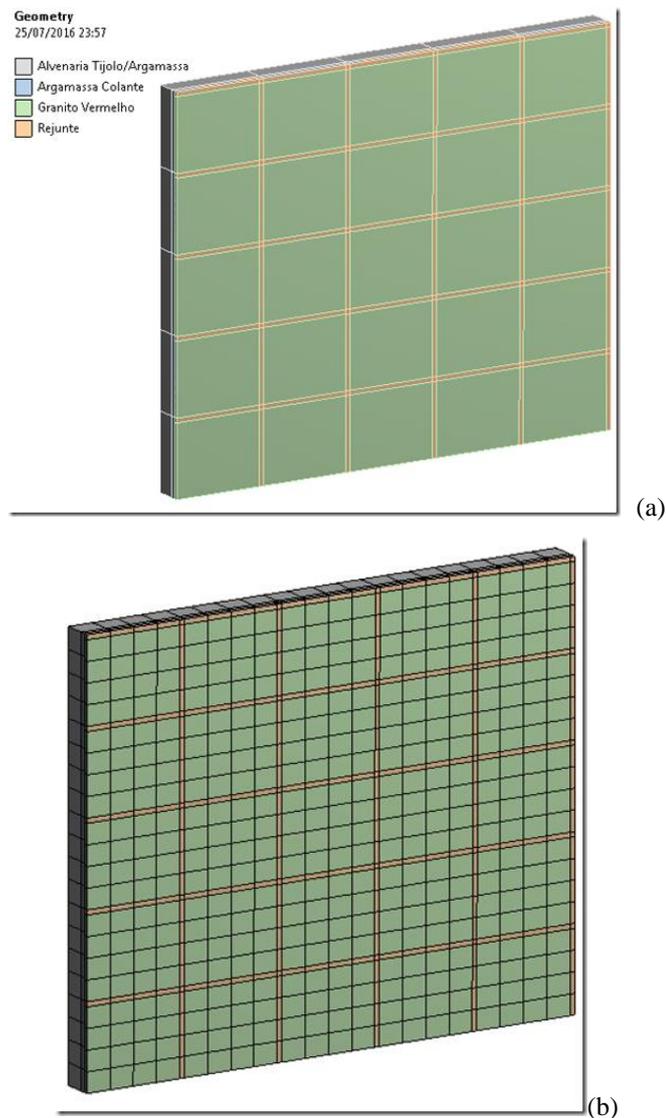


Figura 39 (a) e (b) - Modelo de placas retangulares e malha de elementos

Passou-se então para outra análise através dos elementos finitos, numa segunda etapa.

#### 4.7 SIMULAÇÃO 2

Através dos elementos finitos, com o recurso do programa ANSYS, permite-se introduzir vários outros dados (elementos) para tornar o modelo mais refinado, promovendo simulações com uma nova abordagem.

Nesta segunda simulação foram introduzidos valores limite de aderência para as placas de granito na ordem de 20% do valor de tensão de cisalhamento (0,1 Mpa), a partir do qual ocorre o descolamento das placas, para o conjunto placa-argamassa, conjunto placa-

rejunte, conjunto argamassa- emboço, conjunto emboço-suporte. Desta forma, é possível avaliar com mais precisão quando o modelo se torna instável, quando ocorre a perda de aderência em vários pontos, perdendo a condição de equilíbrio até a falência do sistema.

Ao contrário do primeiro caso, onde delimitou-se a tensão pontual máxima atingida para cada formato da placa numa mesma velocidade, em 0,1 MPa tanto para a aderência quanto para o cisalhamento, aqui aumentou-se gradualmente a velocidade do vento até que houvesse o descolamento total da placa central.

Foi considerada uma tensão de tração/cisalhamento máxima entre placa e rejunte de 20 % de 0,1 Mpa (quando ocorre o descolamento local), considerando-se uma perda de 80% por fadiga, má execução, outros.

Nas figuras abaixo, observam-se os resultados da velocidade do vento para o descolamento das placas nos formatos retangular, "L" e "S". O vento aplicado foi simulado por sucção (por ser o de maior impacto nas estruturas).

As deformadas estão amplificadas em cerca de 1000 vezes, para permitir a visualização do descolamento das placas.

Observa-se neste conjunto de placas retangulares, que com a aplicação do vento a uma velocidade de 37 m/s, o descolamento ocorreu nas extremidades das placas adjacentes, com despreendimento das placas na área central do conjunto (Figura 40).

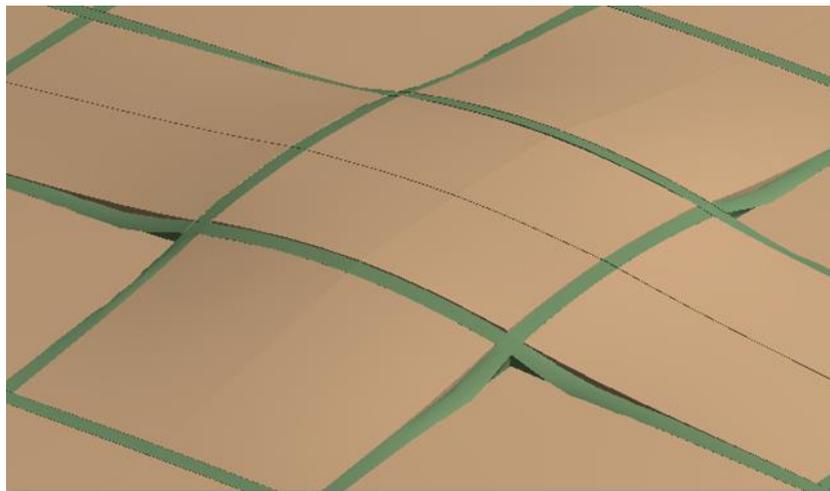


Figura 40: Placas retangulares – Descolamento total da placa com  $V= 37\text{m/s}$

No conjunto de placas com forma em "L", ocorre o descolamento com a aplicação do vento a uma velocidade de 39 m/s (Figura 41), percebendo-se maior fragilidade nos trechos de menor dimensão.

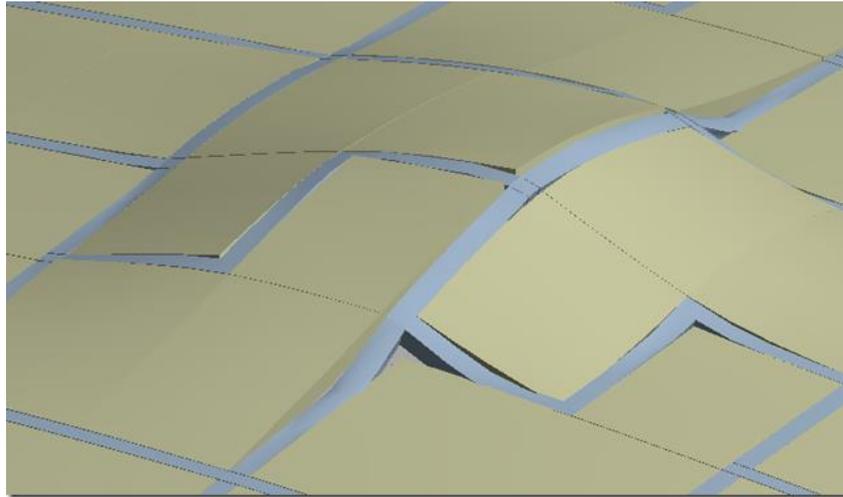


Figura 41: Placa na forma em “L “ – Descolamento total da placa com  $V=39$  m/s

No conjunto de placas na forma em “S “, com a aplicação de um vento a uma velocidade superior, de 41 m/s (Figura 42), houve o descolamento das placas adjacentes e percebe-se que ficaram fixadas ao rejunte, que contribui para a estabilidade do sistema.

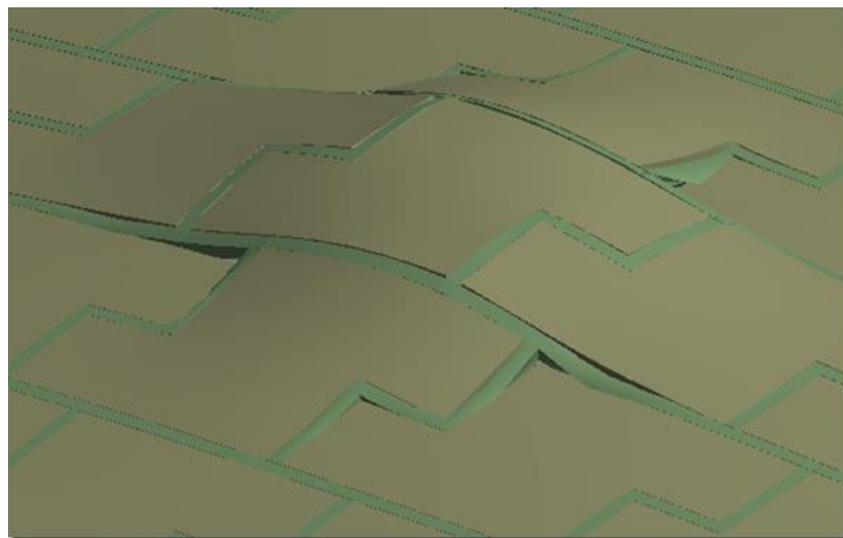


Figura 42: Placas na forma em “S” – Descolamento total da placa com  $V = 41$  m/s

#### 4.8 ANÁLISE FINAL

A modelagem foi calculada com não linearidade geométrica, necessária devido aos elementos de contato utilizados e o modelo de coesão para descolamento.

Para simular uma situação crítica, o contato entre as cinco placas centrais e a argamassa foi desativado, permanecendo presas apenas pelo rejunte (Figura 43).

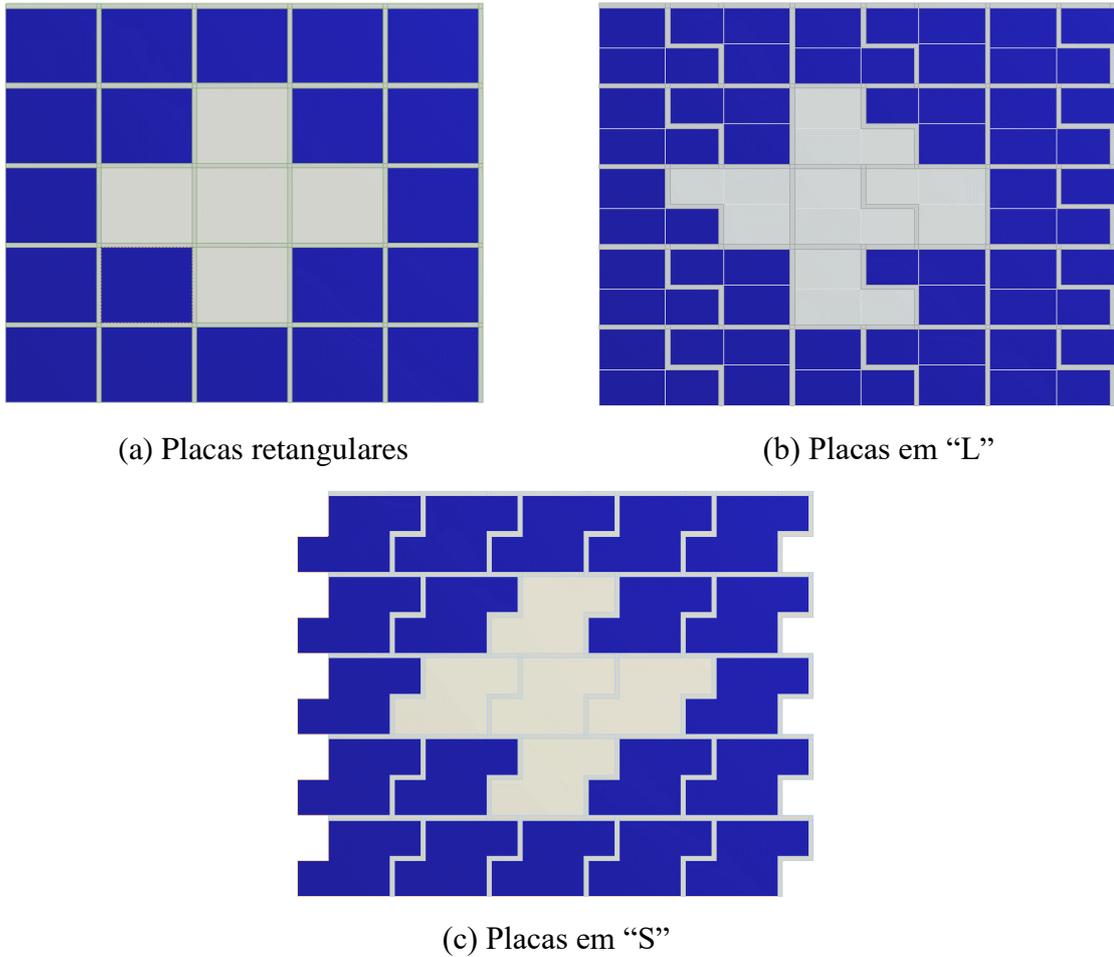


Figura 43 (a), (b) e (c): Contato definido entre placas e argamassa

Quando as placas perdem a área de aderência mínima necessária para suportar os carregamentos, a convergência não linear da simulação interativa não é mais alcançada e, conseqüentemente, o cálculo é interrompido. O último valor de carregamento convergido é, então, assumido como a condição da iminência do descolamento total da placa (Figura 49). Pode-se observar nas figuras 44, 45 e 46, as regiões de descolamento que ocorre entre rejunte e as placas adjacentes.

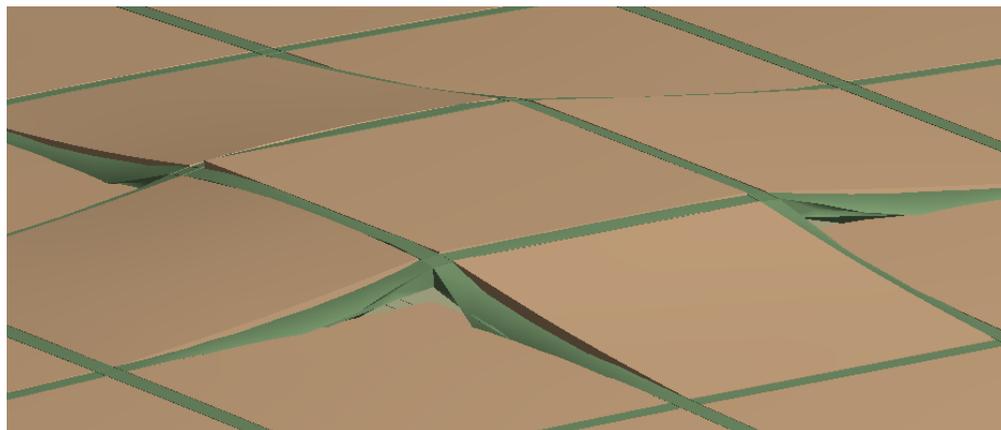


Figura 44: Placa retangular - Deformada amplificada em 1500x na iminência do descolamento total

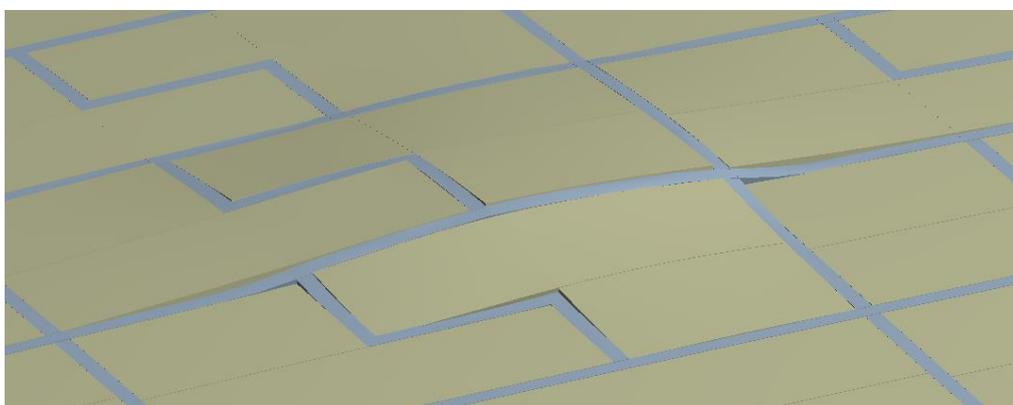


Figura 45: Placa em "L" - Deformada amplificada em 1500x na iminência de descolamento total

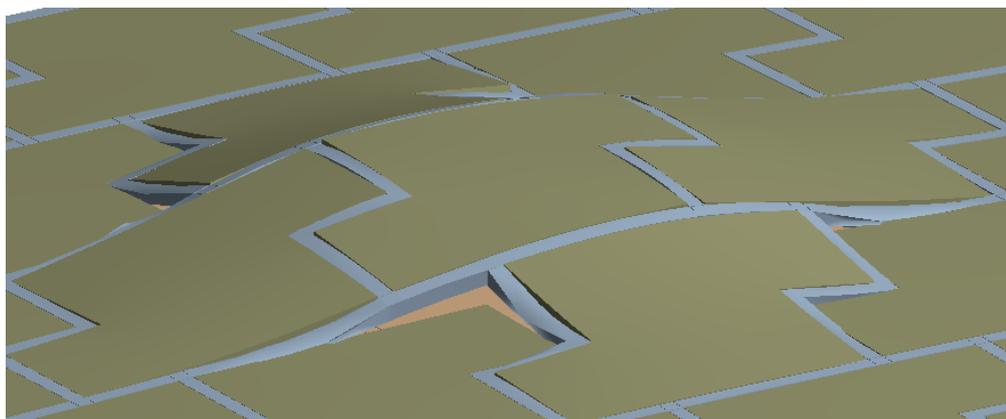


Figura 46: Placa em "S" - Deformada amplificada em 1500x na iminência de descolamento total

## 5 ESTUDO DE CASOS

### 5.1 CASO 1

Tração de aderência com a argamassa (em Pa). Os valores negativos se referem à tração, embora as tensões sejam significativas, alcançando 0,46 Mpa na tração de aderência com a argamassa, estão abaixo do limite último.

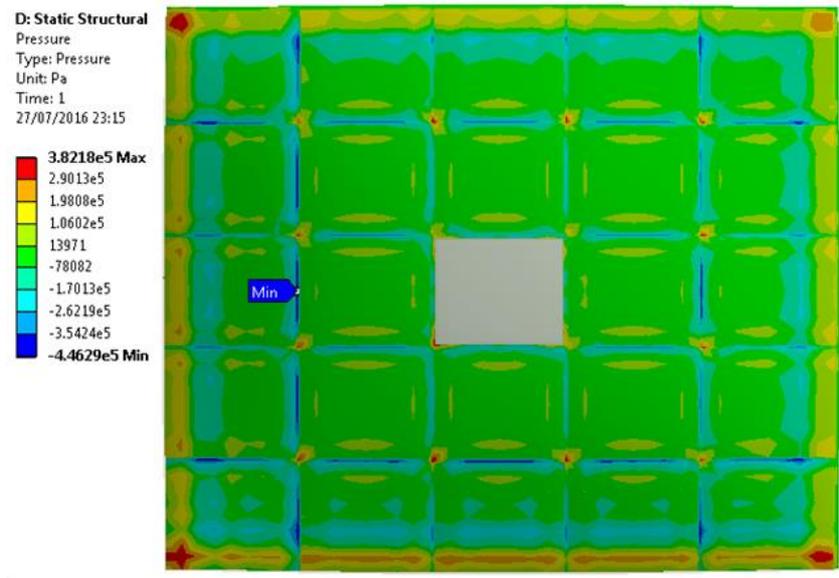


Figura 47: Placas retangulares com tração de aderência pontual.

Tração de aderência no rejunto (em Pa), os valores negativos se referem à tração.

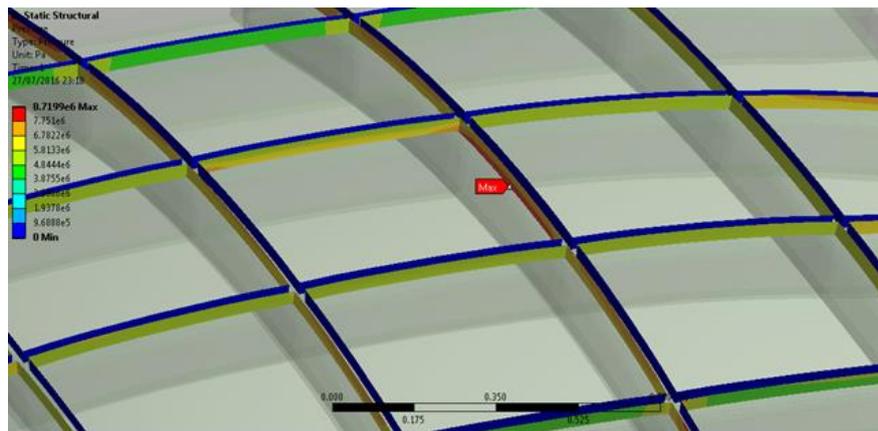


Figura 48: Placas retangulares com tração de aderência no rejunto.

Abaixo são mostradas as tensões normais nas placas (em Pa).

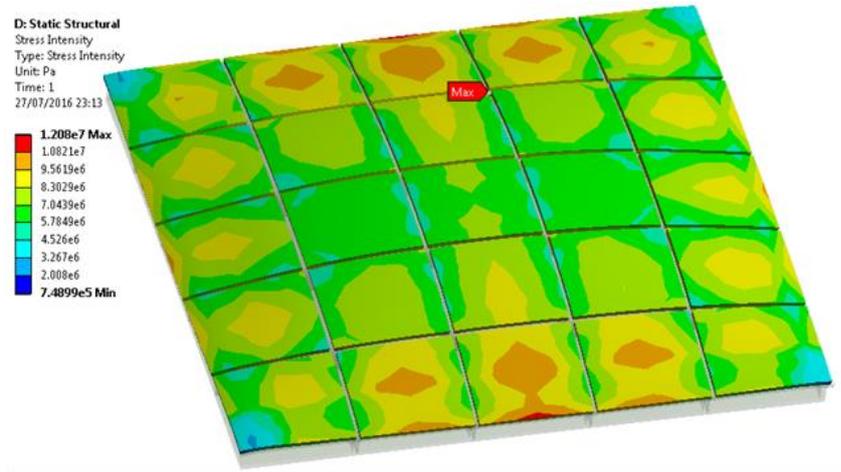


Figura 49: Placas retangulares com tensões normais (Pa)

No conjunto de placas abaixo é mostrado o fator de segurança para argamassa, não considerando a aderência e somente a ruptura interior.

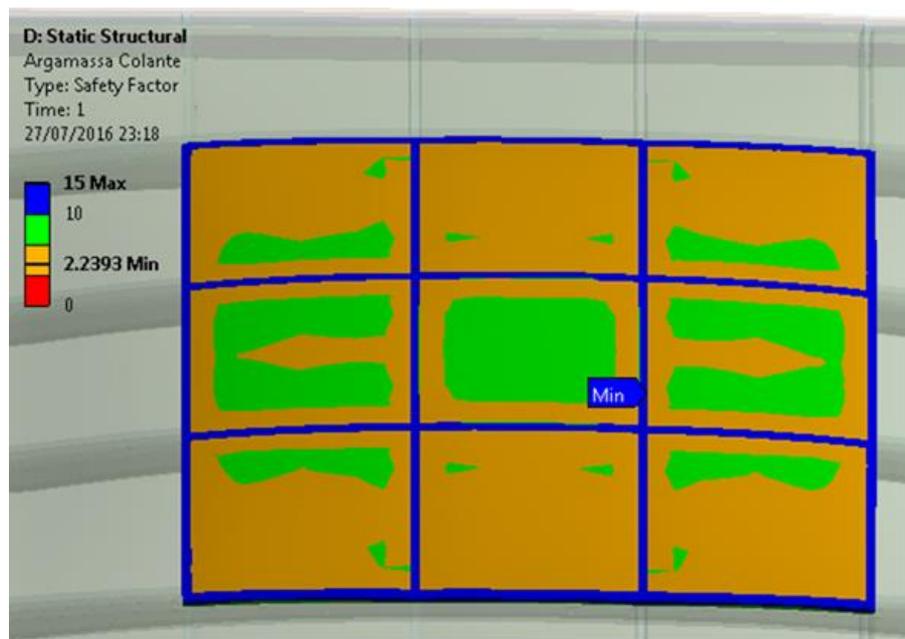


Figura 50: Placas retangulares – Tensão máxima para argamassa.

Da mesma forma, para o rejunte foi considerado apenas o fator de segurança máximo e a ruptura interior.

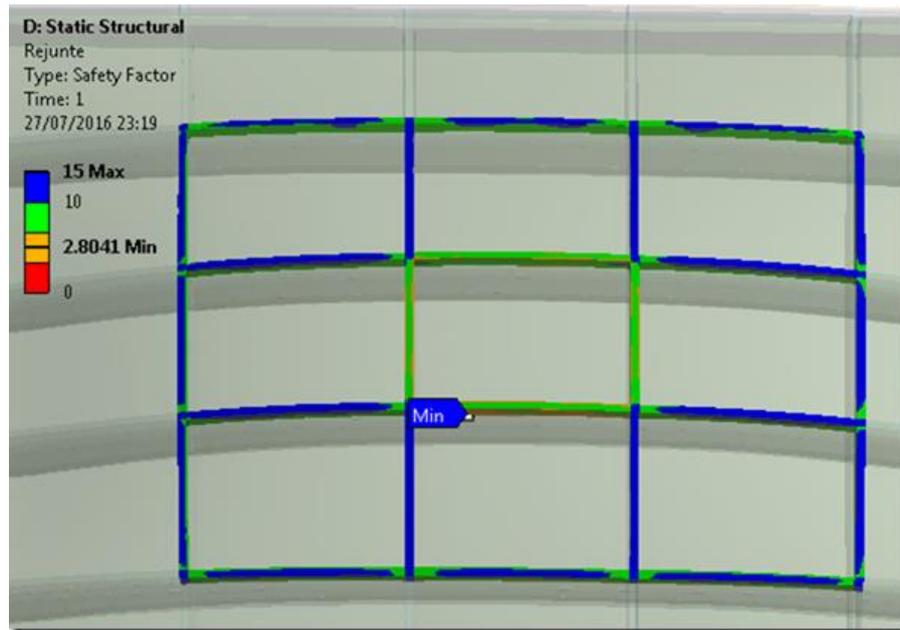


Figura 51: Placas retangulares - tensão de ruptura no rejunte

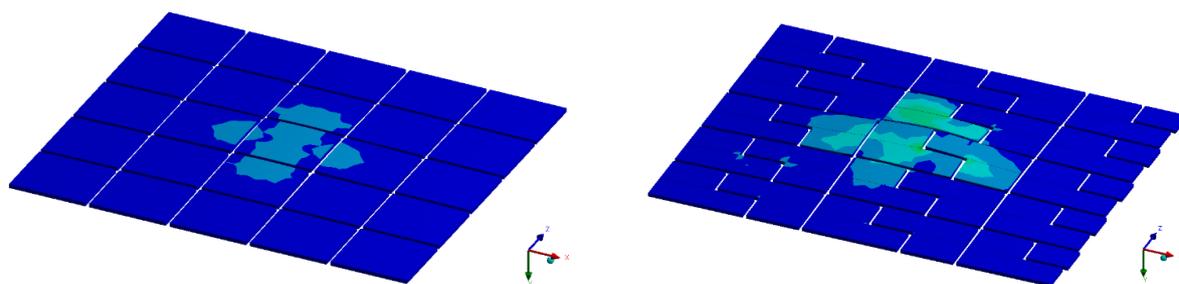
Observa-se nos modelos, que a tensão máxima de ruptura admitida para esta primeira análise, são localizadas, não levando a estrutura (o conjunto de placas) a um estado limite último. O limite de tração de aderência da argamassa é ultrapassado apenas nas quinas, onde estão concentradas tensões resultantes de outros elementos de ligação e maior energia do sistema e desta forma, este modelo específico mostra que esta análise é conservadora, onde estabelece um estado limite que certamente não será alcançado, pois um ponto de descolamento não necessariamente resultará em descolamento de uma placa ou seu conjunto. Este modelo geraria custo elevado, inviabilizando sua utilização na construção civil.

Mesmo na iminência de descolamento total, as tensões calculadas são baixas, com uma grande margem de segurança em relação aos valores limites considerados (Tabela 12).

## 5.2 CASO 2

### 5.2.1 Granito Vermelho Brasília

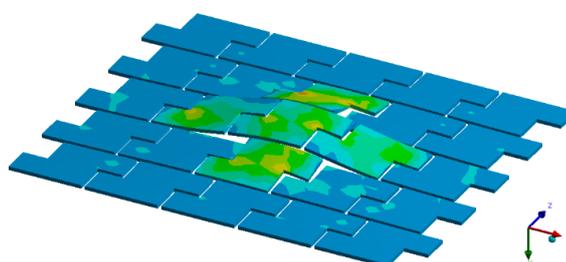
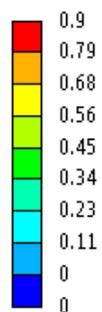
No granito Vermelho Brasília, as tensões calculadas para a placa “S” são as maiores (Figura 52c), pois com esse formato, as placas se mantiveram presas até valores maiores de velocidade do vento e, conseqüentemente, resistiram a esforços mais intensos. A proporção de resistência de aderência em relação à velocidade do vento aplicado e entre as geometrias “L” e “S” em relação à retangular deste granito é de aproximadamente 103,6 % e 150 % respectivamente.



(a) Placas retangulares

(b) Placas em "L"

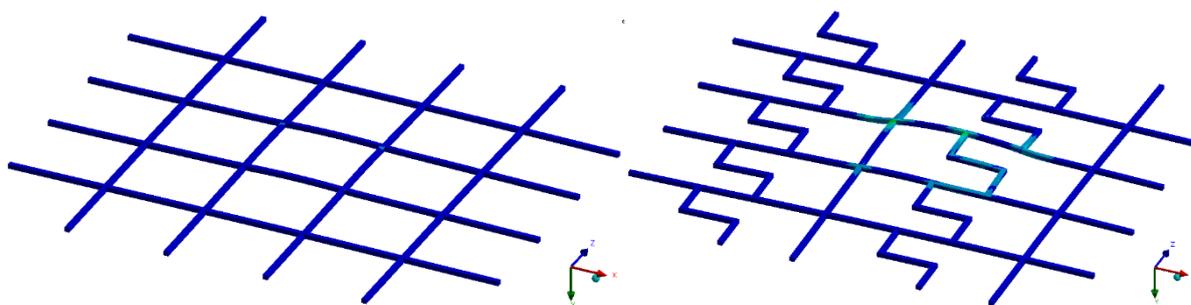
Unit: MPa



(c) Placas em "S"

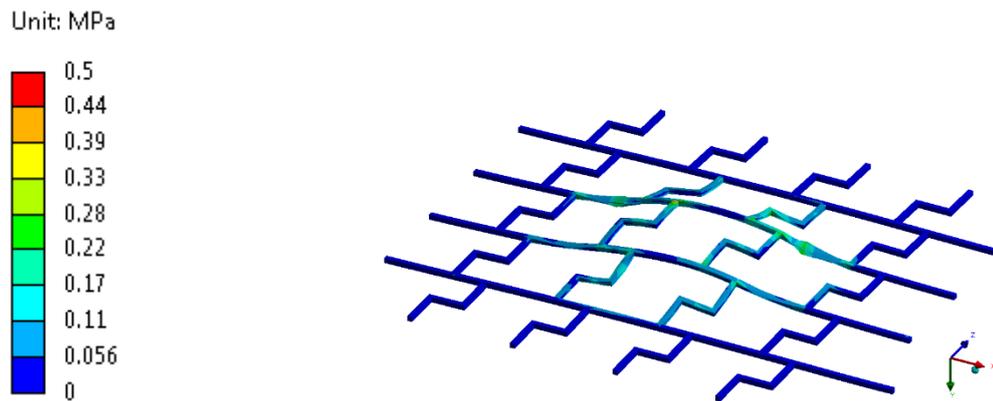
Figura 52 (a), (b) e (c): Tensões (em Mpa) nas placas com deformada amplificada em 1500x

Um comportamento análogo se observou nos rejuntas (Figura 53).



(a) Placas retangulares

(b) Placas em "L"



(c) Placas em “S”

Figura 53 (a), (b) e (c): Tensões (em Mpa) no rejunte com deformada amplificada 1500x

Na tabela 14, as velocidades máximas suportadas por cada geometria de placa, demonstra ser a placa na forma em “S” a que obteve maior resistência.

Tabela 13: Velocidades máximas de vento suportadas

Geometria adotada	Velocidade máxima do vento (m/s)
Retangular	11,0
“L”	22,4
“S”	27,5

Fonte: Elaborada pela autora a partir da pesquisa

### 5.2.2 Granito Preto Indiano

No granito Preto Indiano os resultados são próximos ao Vermelho Brasília. Nas figuras abaixo pode-se observar que os resultados de tensões estão na proporção de 96,8 % e 120 % respectivamente nas formas em “L” e “S” em relação a forma retangular.

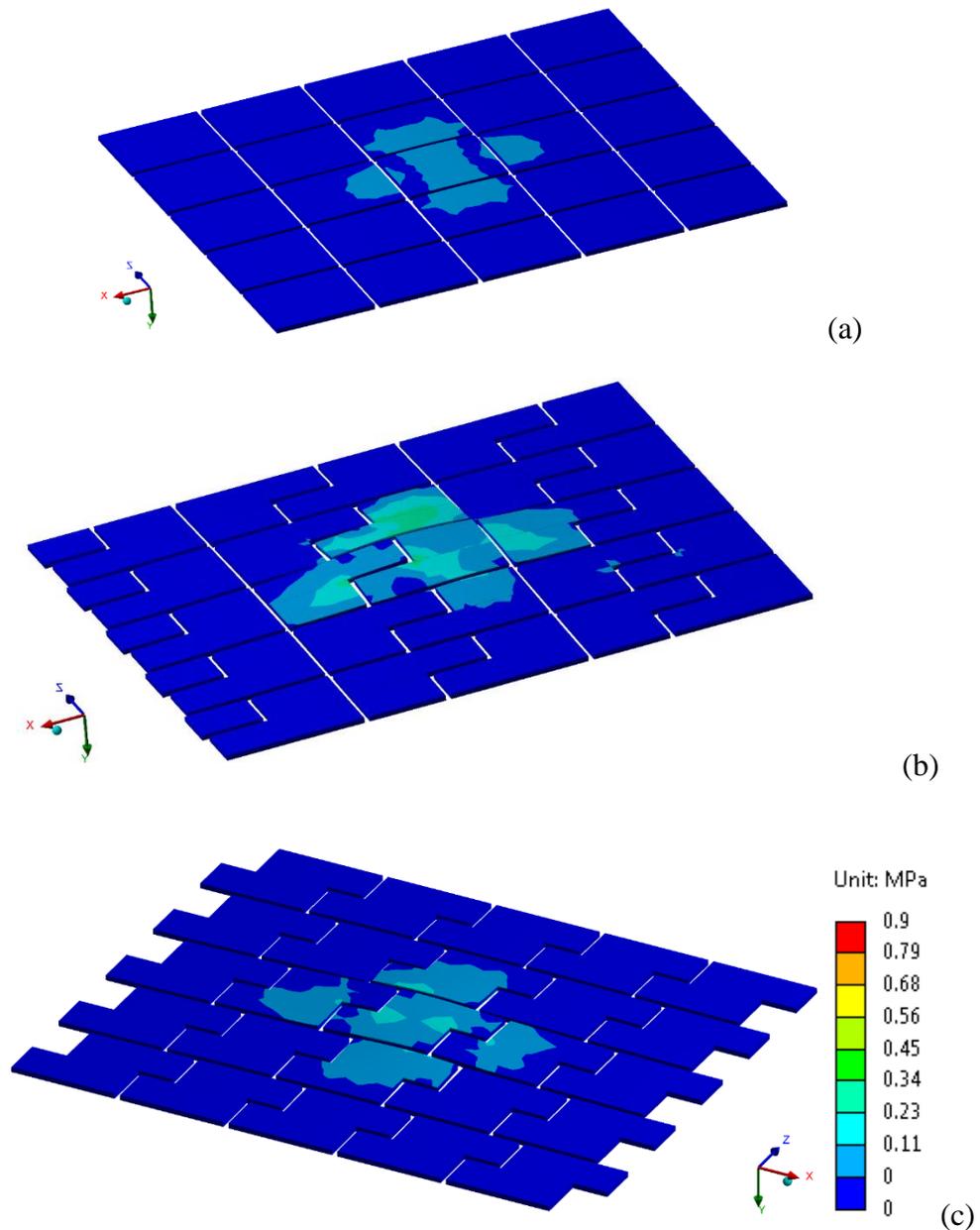


Figura 54 (a), (b) e (C): Placas Granito Preto Indiano - Tensões nas placas nas formas retangular, em “L” e “S”

### 5.2.3 Granito Verde Labrador

O granito Verde Labrador foi o que apresentou uma maior discrepância nos resultados, curiosamente em relação à forma em “S”. Numa análise superficial, pode-se atribuir ao fato deste tipo litológico possuir um módulo de elasticidade bem menor em relação aos outros granitos, o que leva a maiores flexões, facilitando o desprendimento (Tabela 14), valores percentuais de 133% e 92% entre a forma “L” e “S” respectivamente relação à geometria retangular. .

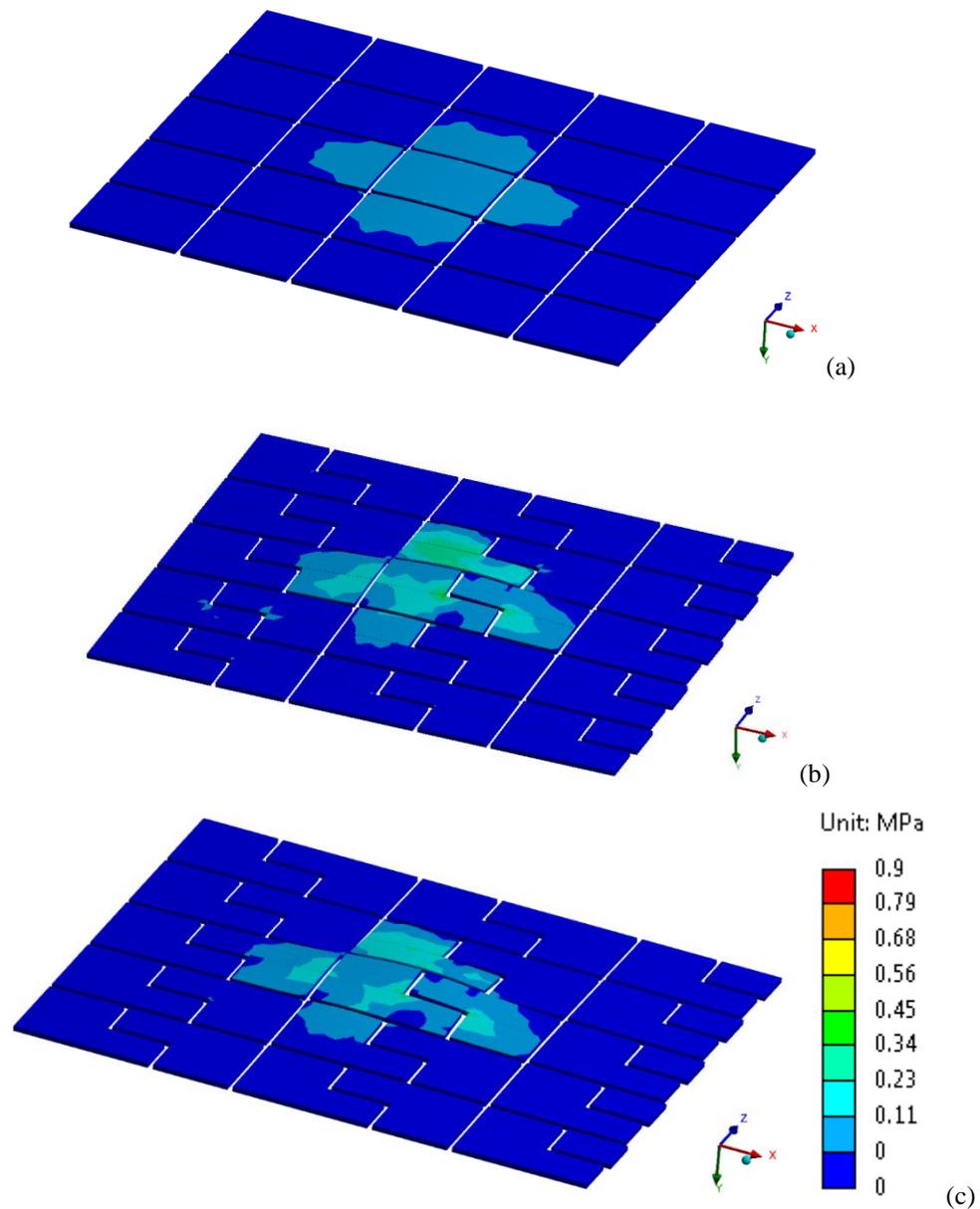


Figura 55 (a), (b) e (c): Placas Granito Verde Labrador - Tensões nas placas nas formas retangular, em “L” e “S”.

Tabela 14: Resumo dos resultados para os três tipos de granitos testados

	Vermelho	Verde Labrador	Preto Indiano
Módulo de elasticidade (GPa)	75	41.29	70
Geometria adotada	Velocidade máxima do vento (m/s)		
Retangular	11.0	10.0	12.4
"L"	22.4	23.3	24.4
"S"	27.5	19.2	27.3

Fonte: Elaborada pela autora deste trabalho a partir da pesquisa

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A escolha de testar modelos de geometria não usualmente utilizados, objetivou entender o processo de aderência em conjunto com a forma e seu intertravamento através destas formas. Utilizar uma nova geometria de placas pétreas para fachadas abre mais uma opção para o *design* de fachadas.

Observa-se que não há um esquema de projeto de fachadas revestidas em placas pétreas, bem como procedimentos relacionados à técnica de detalhamento, execução e estudo preliminar da fachada.

No primeiro ensaio a carga de vento era aplicada até que a tensão ultrapassasse o valor determinado em 0,1 Mpa, quando então o programa parava de rodar estabelecendo como limite último de aderência. Este modelo inicial revelou que condicionantes isolados não resultam em um modelo completo, revelando a fragilidade de um sistema utilizado com baixa parametrização.

No segundo ensaio, fez-se uma simulação mais criteriosa onde foram inseridos um maior número de elementos, com geometria dos modelos, propriedade dos materiais, discretização do domínio, aplicação da força do vento, permitindo uma análise com maior folga e parametrizada (interface de componentes). Desta forma obteve-se resultados mais próximos do real.

O resultado em relação a geometria proposta revelou um potencial maior de resistência de aderência para o modelo com geometria em forma de “S”, demonstrando que formatos diferenciados podem aumentar a resistência ao descolamento por ação do vento em condições críticas (capacidade de aderência reduzida por fadiga).

Quanto aos tipos litológicos dos granitos, estes apresentam variações que podem interferir na aderência e no comportamento junto ao sistema. Deverão ser considerados todos os intervenientes de projeto para que o sistema seja implementado com segurança e custo compatíveis.

### 6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTURO

A partir do estudo realizado, propõe-se ensaios relacionados a nova geometria de pedra em fachadas pelo método tradicional, com os dados de parametrização dos modelos, através de pesquisa dos intervenientes causadores do descolamento das placas em relação ao tipo de material e meio, ensaiar modelos com um maior número de elementos que interferem

diretamente na aderência de placas de granito nas fachadas, em especial a fadiga como resultado do gradiente térmico.

Propõe-se estudos futuros através de experimentos em laboratórios, para validação dos resultados numéricos obtidos através do MEF para este experimento.

Análises mais detalhadas e extensivas através do método de elementos finitos (MEF) para outros tipos litológicos de granitos, com interferências de dados regionais, inclusão de outros elementos que podem interferir na aderência das placas pétreas ao suporte, serão de grande valia para referenciar futura padronização.

Fazer a análise pelo método dos elementos finitos, com computador de alto desempenho com modelos com discretizações menores para que se obtenha resultados mais refinados.

## 6.2 CONCLUSÃO

Para construções seguras, especificamente revestimentos de fachadas, deve-se considerar procedimentos que superem os usuais testes padrões, onde são limitados os parâmetros de investigação num único modelo. A utilização dos elementos finitos em associação ao *software* permite uma multiplicidade de parametrização, desde os dados físico-mecânicos do material, condições de suporte, intervenientes climáticos, condicionantes para fadiga, bem como outros específicos consoante o ambiente e arquitetura a que se inserem, além do processo de degradação e comportamento estrutural.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**ANSYS Help v17.** ANSYS, Inc, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações.** Rio de Janeiro, 1998.

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 13755:** Revestimento de paredes externas e fachadas com placas cerâmicas e com utilização de argamassa colante – Procedimento. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14084:** Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas: determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-4:** Edificações Habitacionais – Desempenho Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações internas e externas – SVVIE. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15846:** Projeto, execução e inspeção de revestimento de fachadas de edificações com placas fixadas por inserts metálicos. Rio de Janeiro, 2010.

ALMEIDA, A. E. F. S. **Estudo da influência das adições de sílica ativa e copolímero estireno acrílico nas propriedades de argamassas para o assentamento de porcelanato.** 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Área Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

AIRES-BARROS, L. 1991. **Alteração e alterabilidade de rochas.** Instituto Nacional de investigação Científica, Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, 1991. 384p.

ANTUNES, M.; ROSEBBOM, K; GARCIA J. – **Anomalias na Colagem de Pedras Naturais 1º Congresso Nacional de Argamassas de Construção, APFAC, Lisboa, 2005.**

ANTUNES, B.; **Revestimento milenar.** Revista Qualidade de Rochas. São Paulo, junho, 2003.

ANTUNES, G. R. **Estudo de Manifestações em Revestimentos de Fachada em Brasília:** Sistematização de Incidência de Casos. 2010. 178f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília – DF, 2010.

ARRAIS, G. P. **Pressões exercidas pelo vento em fachadas de edifícios altos: estudo comparativo dos valores obtidos através de ensaio em túnel de vento e especificações normativas.** 2011.xxxf. (Trabalho de diplomação para título de engenheiro civil ) Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS – **ABIROCHAS**. Panorama Mundial do Setor de Rochas Ornamentais e de Revestimento em 2013. Cid Chiodi Filho. 2014.

ATTEWELL, P. B.; FARMER, I.W. 1976. Principles of engineering geology. London. Chapman and Hall. – 1976. 1046p.

BAUER, E.; CASTRO, E. K.; LEAL, F. E.; ANTUNES, G. R. Identification and quantification of failure modes of new buildings façades in Brasília”. (XII DBMC) (Físico e CD-ROM). Porto 2011. ISBN 1089-1096

BAUER, E; BEZERRA, L. M.; UCHÔA, J. C. B.; CHAGAS, S. V. M. –Argamassas e sua relação com as patologias e danos nas fachadas”. 4º. Congresso de Patologia y rehabilitación de edificios. PATORREB 2012. Patologia 3. Patologia de los materiales y elementos constructivos – Estudo do comportamento à fadiga das argamassas e sua relação com as patologias nas fachadas.

BEASLEY, K. J. (2001). “Contemporary and Traditional Wall System Failures.” **Journal of Performance of Constructed Facilities**. ASCE, n.2, vol. 15, may 2001. P. 42-45.

Björn Schouenborg, CBI; Lars Jacobsson, SP e Jan Anders Brundin – **Slutrapport Beskrivning av infästningssystem och dimensionering av Fasadstensplattor** - Borås, April 2011. MinBaS II Område 4 Applikationsutveckling – stenindustrin Delområde 4.4 Stenhandboken Projekt 4.4:3 Fasader – Suécia.2011.

BLESSMANN, J. **Acidentes causados pelo vento**, 4. Ed. Rev. amp. 2001. Porto Alegre: **Editora da Universidade Federal do Rio Grande do sul**, 2001.

CAMPANTE, E.F. e BAÍÁ, L.L.M. **Projeto e Execução de Revestimento Cerâmico CTE**: Primeiros passos da qualidade no canteiro de obra, ed. O Nome da Rosa, São Paulo, SP.2003.

CAMPOSINHOS, R. S. Revestimentos em Pedra Natural com Fixação Macânica: Dimensionamento e Projecto. Edições Sílabo, Lda. 1ª. edição, Lisboa, 2009. 199p.

CAMPOSINHOS, R. S. Dimension stone design – partial safety factors: reliability safety approach. Proceedings of Institution of Civil Engineers – Construction Materials 165. Issue CM 3. Londres, 2012.

CARASEK, Helena. **Aderência de Argamassas à Base de Cimento Portland a Substratos Porosos**: avaliação dos fatores intervenientes e contribuição ao estudo do mecanismo da ligação. São Paulo, 1996. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

CARASEK, Helena. Avaliação de resultados do ensaio de resistência de aderência de revestimentos de argamassa. 2010. **Revista Técnica**, ed. 185. Junho de 2012.

CARFAGNI, Gianni Royer - **Some considerations on the warping of marble façades: the example of Alvar Aalto’s Finland Hall in Helsinki** Gianni Royer - Carfagni - Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Parma, Viale delle Scienze, 43100 Parma, Italy. Received 23 April 1999; received in revised form 28 June 1999; accepted 11 July 1999 *Construction and Building Materials* 13 (1999) 449-457.

CARLO MONTANI, 2014. *Rapporto Marmo e Pietre nel Mondo*, na 25ª. Edição do relatório anual apresentado durante Marmomacc 2014, Verona, Itália.

CASIMIR, C. **Teste, avaliação e diagnóstico**. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL SOBRE BUILDING ENVELOPE: sistemas e tecnologias. Cingapura, 1994. Proceedings. Singapore, 1994, p-79-84.

CHAVES, A. M. V.A. **Patologia e Reabilitação de Revestimentos de Fachadas** . 2009. **xxx**f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Área de Especialização Materiais, Reabilitação e Sustentabilidade da Construção) Universidade do Minho, Portugal. Julho de 2009. P. 46/47.

CHIODI FILHO, C. **Aspectos técnicos e econômicos do setor de rochas ornamentais**. Rio de Janeiro: CNPQ/CETEM, 1995. (Série Estudos e Documentos V.28). p. 75.

\_\_\_\_\_. **Balanco das exportações e importações de rochas ornamentais e de revestimento em 2012**. São Paulo: ABIROCHAS. Informe 01/2013. 17p.

CHIODI FILHO, C.; RODRIGUES, E. de P. **ABIROCHAS GUIA DE APLICAÇÃO DE ROCHAS EM REVESTIMENTOS** – Projeto Bula – São Paulo. SP. 2009.

CINCOTTO, M. A.; SILVA, M.A.C.; CARASEK, H. **Argamassas para revestimento: Características, propriedades e método de ensaio**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, 1995. (Boletim 68-IPT).

COSTA, M. P. R. **Manual de Controlo de Qualidade para Revestimentos de Fachadas em Pedra**. 2011. **Xxx**f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, PT. 2011.

DA SILVA, S. A.; OLIVEIRA, F.M.C.; MENOR E. A.; MELO, E. B. ; NETO, J. A. N. **Efeitos dos Poluentes Atmosféricos sobre Placas de Rochas Carbonáticas nos Revestimentos de Edificações em Região Litorânea do Recife – PE**. *Holos* ISS 1807 -1600. DOI: 10.15628/holos. 2014.2613. *HOLOS*, ano 30, Vol. 6. 2014.

DA SILVA, D.; ROMAN, L.; ROMAN, H. **Tensões térmicas em revestimentos cerâmicos**. IN: SEMINÁRIO CAPIXABA SOBRE REVESTIMENTOS CERÂMICOS. Espírito Santo, 1998. Anais. Vitória, 1998.

FIORITO, J.S.I. **Manual de Argamassas e Revestimentos: Estudos e Procedimentos de Execução**. Editora PINI. São Paulo. 2009.

FLAIN, E.P. **Revestimentos verticais com placas de rocha**. *Revista Tecnologia da Construção*, São Paulo, ano 2, maio de 1994.

\_\_\_\_\_. **Tecnologia de produção de revestimentos de fachadas de edifícios com placas pétreas**. 1995. 180p. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 1995.

FLAIN, E. P.; RIGHI, R.; FRAZÃO, E. B. **Patologias em revestimentos com placas pétreas em edificações e espaços urbanos no Brasil**. In: **III ENCONTRO DA ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO: arquitetura, cidade e projeto: uma construção coletiva**. São Paulo, 2014.

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

FRASCÁ, M.H.B.O.; SARTORI, P. L. P. Minerais e Rochas. In: Antonio Manoel de Oliveira; Sergio Brito. (Org). Minerais e Rochas. 1ed. São Paulo: ABGE/ CNPq/Fapesp, 1998, v., p.15-38.

FRASCÁ, Maria Heloisa Barros Oliveira. **Estudos experimentais de alteração acelerada em rochas graníticas para revestimento.** 2003. Tese (Doutorado em Geologia) Coordenação de Programas de Pós-graduação do Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2003.

\_\_\_\_\_. MhB Serviços Geológicos Ltda. - Rochas Ornamentais – Tecnologias e Patologias. Curso\_Rochas Ornamentais\_MheloisaFrasca. São Paulo. Disponível em:

<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAgU2cAJ/rochas-ornamentais-tecnologias-patologias-heloisa-frasca-mhb-servicos-geologicos-ltda..> Acesso em 02-08-2016

\_\_\_\_\_. **Normalização em rochas ornamentais: análise da situação brasileira atual x tendências internacionais** – Geóloga, Laboratório de Materiais de Construção Civil – LMCC/ Instituto de Pesquisas Tecnológicas \_IPT –SP ([mheloisa@ipt.br](mailto:mheloisa@ipt.br)). 2010.

\_\_\_\_\_. **CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE ROCHAS ORNAMENTAIS E DE REVESTIMENTO: ESTUDO POR MEIO DE ENSAIOS E ANÁLISES E DAS PATOLOGIAS ASSOCIADAS AO USO** - Geóloga, IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Abril de 2016.

FRAZÃO, E. B.; FARJALLAT, J. E. S. **Seleção de pedras para revestimento e propriedades requeridas.** Revista Rochas de Qualidade, no. 24, 1995.

FRAZÃO, E. B. Tecnologia de Rochas na Construção Civil. São Paulo. ABGE, 2002. 132p.

GASPAR, S. M. G.-Análise da interface entre elementos de parede e camadas de revestimento. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Instituto superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa -2011

GRANATO, J, E. **Patologia das Construções: Fachadas.** p. 89/90/91

GRILLO, K.V.F. **Análise comparativa da aderência de tipos rochosos assentados com três argamassas.** 2010. Xxxp. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

GUIMARÃES L. E.; PEREIRA, C. H. A. F.; OLIVEIRA, K.R.B.; CARASEK H. – Acompanhamento das Variações das Temperaturas Superficiais dos Principais Materiais Utilizados em Fachadas. In: **2º. ENCONTRO SOBRE PESQUISAS DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO.** UFG. GO. nov. 2002.

HALFEN Technical Product Information. Natural Stone support systems – façade. FS 10.1-E (2011).

IDEMBURGO, K.– Estudo de Corte de Rochas Ornamentais Utilizando Disco Diamantado – Dissertação de Mestrado – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da UFMG – 2012.

JUNIOR, C. A. M. O. **Recomendações para Projeto e Execução de Revestimento de Fachadas em Placas Pétreas.** 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Curso de Engenharia civil com Ênfase Ambiental, Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo. 2005.

JUNGINGER, M. **Rejuntamento de revestimentos cerâmicos:** influência das juntas de assentamento na estabilidade de painéis – Dissertação de Mestrado Engenharia civil – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo – São Paulo, 2003.

JUNGINGER, M. e MEDEIROS, J. S. - **Rejuntamento de revestimentos cerâmicos:** influência das juntas de assentamento na estabilidade de painéis. BT/PCC/372 – ISSN 0103-9830. São Paulo – SP, 2003.

KIMBALL, J. B, P.E., FASCE <sub>1</sub> – Latent Building Façade Failures. **FORENSIC ENGINEERING** 2012 ASCE 2013.

Wiss, Janney, Elstner Associates, Inc., 14 Washington Road, Suite 501, Princeton

Junction, NJ 08550; PH (609) 799-7799; FAX (609) 799-7088; email:[kbeasley@wje.com](mailto:kbeasley@wje.com)

LOBATO PAES, I. N. **Influência da junta de assentamento no comportamento térmico do sistema de revestimento cerâmico.** Goiânia, 2000. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás – UFG.

MARANHÃO, F. L.; BARROS, M.M.S.B.de; Causas de patologias e recomendações para a produção de revestimentos aderentes com placas de rocha. **BT/PCC/421.** São Paulo. 2006. [http://www.pcc.usp.br/files/text/publications/BT\\_00421.pdf](http://www.pcc.usp.br/files/text/publications/BT_00421.pdf). Acesso em 01-08-2016.

MARBLE INSTITUTE OF AMERICA. Technical Bulletin – **Dimension Stone Anchorage – Theory, Practice & Components** - Setting the Standards in the Natural Stone Industry. Technu Volume V, Issue I, February. 2010. Stone Industry Education.

MARINI P.; BELLOPEDE, R. The Influence of the Climatic Factors on the Decay of Marbles: an Experimental study. **American Journal of Environmental Sciences**, 2007, 3(3): 143-150.

MEDEIROS, J. S. Tecnologia e projeto de revestimentos cerâmicos de fachadas de edifícios. Tese (Doutorado). Escola Politécnica - Universidade de São Paulo. São Paulo. 1999.

MESONES, F.L.G, VILLÁN, J.E., AGGUIRRE, G.N. **Manual para el uso de la piedra en la arquitectura.** Bilbao: IT & B, S.L., 2001. 400 p.

MOREIRA, T. V. Análise da sensibilidade dinâmica de edifícios com estruturas esbeltas. Tese de doutorado. COPPE/UFRJ, D.Sc. Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, (2002).

MOREIRAS, S. T. F. **Estudo sobre o revestimento de fachadas de edifícios altos com placas de granitos ornamentais.** 2005. Dissertação de Mestrado em Geotecnia –Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. SP. 2005.

Moreiras, S. T. F.; Paraguassú, A. B. **Viabilidade de Uso de placas de Granito como Lajes em Edificações.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v.12, n. 4, p. 25-36. Out./Dez. 2012. ISSN 1678-8621.

MOREIRAS, S. T. F. **Metodologias para o dimensionamento de placas de “granitos” em sistemas não-aderentes de fixação.** 2014. Teses (Doutorado em Engenharia civil) Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2014.

MOSCOSO, Y. F. M., Estudo Numérico e Experimental das Tensões Atuantes na Argamassa Colante de Fachadas de Edificações sob Ação da Fadiga Termo-Mecânica. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil. Universidade de Brasília – Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Brasília-DF. 2013.

NAKAMURA, J. –Projeto de Fachadas. **Revista Técnica.** São Paulo, 2004. no. 92. 9p.

NAVARRO, F.C. Granitos Ornamentais: análise petrográfica na previsão do comportamento físico-mecânico. In: CONGRESSO URUGUAIO DE GEOLOGIA, 2, 1998, Punta Del Este. Atas. Punta Del Este: SUG, 1998. P. 103-107.

NAVARRO, F. C.; ARTUR, A. C. – Caracterização Petrográfica como Ferramenta para a Previsão do Comportamento Físico e Mecânico de granitos Ornamentais: uma Discussão. III SRONE- Recife-PE. Brasil. 2002.

NETO, Natália Margarida. **Sistemas de apoio à inspeção e diagnósticos a anomalias em revestimentos em pedra natural.** 2008. xxxf. Dissertação (Mestrado em Construção). Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, abril de 2008.

NETO, Natália e BRITO, Jorge. **Sistema de apoio à inspeção e diagnóstico de anomalias em revestimentos de pedra natural (RPN)** - See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/280742013> ARTICLE MAY 2011 *Teoria e Prática na Engenharia Civil, n.17, p.9-23, Maio, 2011.*

NETO, Natália e BRITO Jorge de. Validação de um sistema de apoio à inspeção e diagnóstico de anomalias de revestimentos em pedra natural (RPN). **Teoria e Prática na Engenharia Civil.** n.18, p. 23-38. Novembro de 2011.

\_\_\_\_\_. "Inspection and defect diagnosis system for natural stone cladding." **Journal of Materials in Civil Engineering.** 23.10 (2011): 1433-1443.

NOGAMI, L. Investigação da Influência das características petrográficas e da rugosidade de placas de “Granitos e Mármore” fixadas com argamassas. 2013. Tese. Escola de engenharia da Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Geotecnia., SP. Fev. 2013.

NOGAMI, L. **Fixação de placas de rochas ornamentais: estudo da aderência com argamassa colante** .2007. xxxf. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, SP. Nov. 2007.

OLIVEIRA, L. A. de , MELHADO, S. B. (2010) – Metodologia para desenvolvimento de projeto de fachadas leves –Boletim Técnico – Série BT/PCC/547 – ISSN 0103 – 9830 –

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo-Departamento de Engenharia de Construção Civil – SP. 2010.

Panorama Mundial do Setor de Rochas Ornamentais e de Revestimento em 2013 – **ABIROCHAS** – Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais- Cid Chiodi Filho. Marmomac 2014.

MONTANI, Carlo. XXV Rapporto Marmo e Pietre nel Mondo 2014; Congiuntura internazionale, Produzione, Scambi, Consumi, Tecnologie, Beni strumentali, Schede dei Paesi leader. Carrara: Aldus, 2014. 233 p. (verificar 1ª. Citação)

PACHECO, A. M. M. deS. – Finite Element model of characterization of cladding systems used into Portuguese Granite “Cinzeno de Apalhão” e “Amarelo de Vila Real”- Department of Mechanical Engineering, Instituto Superior Técnico, T.U. Lisbon, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal

PEREIRA, F.D.G.; Influência das variações de temperatura no desempenho de fachadas de alvenaria – Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Especialização em Construções – Faculdade de Engenharia – Universidade do Porto – PT. 2008.

RIBEIRO, F. A. Especificação de Juntas de Movimentação em Revestimentos Cerâmicos de Fachadas de Edifícios: Levantamento do Estado da arte. Dissertação de Mestrado – Engenharia de Construção Civil- Tecnologia e Gestão na Produção de Edifícios - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. SP. 2006.

RIBEIRO, R. P.; PARAGUASSÚ, A.B. e MOREIRAS, S. T. F. – Adherence of Granite Plates by Mortar Adhesion: Influence of Temperature - *IACSIT International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 7, No. 5, October 2015.

RICARDO, Sandra M. R. Machado dos Reis. **Modelo para garantia da qualidade de revestimentos em pedra natural de paramentos verticais**. 1992. Dissertação de Mestrado – Instituto Superior Técnico, Modalidade Construção. Lisboa. Portugal. 1992.

RODRIGUES, E. de P.; COUTINHO, J.M.V. ; CHIODI FILHO, C. Petrografia microscópica: uma visão do passado, presente e futuro da rocha ornamental. **Rev. ROCHAS DE QUALIDADE**. São Paulo, no. 127, p. 80-84. 1996.

RODRIGUES, E. de P.; CHIODI FILHO, C.; COUTINHO, J.M.V.V. Importância da petrografia para a previsão do comportamento e da durabilidade de rochas ornamentais. **Rev. ROCHAS E EQUIPAMENTOS**. Lisboa, v.47, p.2. 1997.

RODRIGUES, F., VICENTE, R., VARUM, H. E VELOSA A.. **Inspeção e Avaliação da aderência de Revestimentos Pétreos em Fachadas** – caso de estudo – PATORREB – Universidade de Aveiro -PT, 2006.

SABBATINI, Fernando Henrique.” **Desenvolvimento de Métodos, Processos e Sistemas Construtivos: formulação e aplicação de uma metodologia**”. São Paulo, 1989. Tese de Doutorado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

SABBATINI, F. H. Construção crítica. Entrevista. In: *Téchne*. Edição 99. Ano 13. Junho de 2005. Editora Pini. São Paulo, 2005.

SALVADORI, M. Loads. In: SALVADORI, M. Why buildings stand up: the strength of architecture. New York, 2002. W.W. Norton & Company, Inc.

SCHIOCHET, I. M. **“Caracterização dos aspectos projetuais e construtivos de fachadas em edifícios residenciais na Av. Beira Mar Norte em Florianópolis”**. 2009. Dissertação de Mestrado – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

SILVA, Ana Felipa Ferreira. **Previsão da vida útil de revestimentos em pedra natural de paredes**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Lisboa. Outubro de 2009.

SILVA, C. M.; FLORES-COLEN, I. e GASPAR, S. ; Numerical analysis of render’s adhesion using an interface model – Department of Civil Engineering and Architecture, Instituto Superior Técnico, Technical University of Lisbon, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisbon, Portugal. 2012.

SILVA, S.A. da; OLIVERA, F. M.da C. E SOUZA, J. C. **Patologias em placas pétreas de revestimentos externos na região litorânea do Recife**. Universidade Federal de Pernambuco – PE. – Estudos Geológicos V. 18(1), 2008.

SILA, S. M. B., OLIVEIRA, F. M. C., MELO, E. B., PONTES, B. M. S. **Características físicas e petrográficas dos granitos Vermelhos Brasília e Ventura e seus usos como revestimento externo**. XXVI Encontro Nacional de tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa – poços de Caladas – MG. Out. 2015.

SORIANO, R.V. **Aplacados Pétreos em Fachadas Ventiladas** - Collegi d’Arquitectes de Catalunya. Catalunya, 1999.

TECHNICAL BULLETTIN – MARBLE INSTITUTE OF AMERICA – Setting the Standards in the Natural Stone Industry. Dimension Stone Anchorage – Theory, Practice and Components – Volume V, Issue I February, 2010.

TEMOCHE-ESQUIVEL, J. F.; DEIFEL, T.; BARROS, M. M. S. B.; JOHN, V.; FRANÇA, R. (2007) - “Influência da taxa de defeitos de interface nas tensões de origem térmica em revestimentos de argamassa”. VII Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Recife: Antac, 2007, pp. 1-13.

THURLER, C. L.; FERREIRA, V. A. A Evolução da Resistência de Aderência de Algumas Argamassas Colantes Nacionais. In: **SIMPÓSIO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS**, 1. Goiânia, 1995. **Anais...** Goiânia, 1995.

UCHÔA, J.C.B. **Procedimento Numérico e Experimental Para a Avaliação da Resistência à Fadiga de Sistema de Revestimento**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal de Brasília, Brasília, Distrito Federal.2007.

VEIGA, M. Rosário. **Revestimentos e Acabamentos na Construção de Edifícios**. 2005. 14º Curso de Mestrado em Construção, Laboratório Nacional de Engenharia Civil –PT

VUTUKURI, V. S.; LAMA, R. D.; SALUJA, S. S. **Handbook on mechanical properties of rocks – Testing Techniques and Results**. Clausthal, Germany. 1974. Vol. 1. 280p.

WHITTAKER, B. N.; SINGH, R. N.; SUN, G. **Rock Fractures Mechanics – Principles, Design and applications**. Amsterdam: Elsevier Science Publisher, 1992. 570p.

WINKLER, E.M. **Stone in architecture: properties, durability**. 3.ed. New York: Springer – Verlag, 1997. 313p.

WOLF A. T. Durability Testing of Sealants – **The Trouble with Sealants – Sealants Technology Conference**, Oxford Brookes University, School of Technology, October. 2004. (Dow Corning GmbH, Global Construction Industry, Science and Technology, Rheingaustrasse 34, 65201 Wiesbaden, Germany.)