

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**MARCELO DA COSTA TEIXEIRA**

**ANÁLISE INFERENCIAL DA RESISTÊNCIA DE TELHAS CERÂMICAS  
SUBMETIDAS A ESFORÇOS MÚLTIPLOS DE IMPACTO  
SIMULANDO CHUVAS DE GRANIZO**

**DISSERTAÇÃO**

**CURITIBA**

**2021**

**MARCELO DA COSTA TEIXEIRA**

**ANÁLISE INFERENCIAL DA RESISTÊNCIA DE TELHAS CERÂMICAS  
SUBMETIDAS A ESFORÇOS MÚLTIPLOS DE IMPACTO  
SIMULANDO CHUVAS DE GRANIZO**

**Inferential analysis of the resistance of ceramic tiles subjected to multiple  
impact stresses simulating hailstorms**

Dissertação apresentada como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, do Departamento de Construção Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Adalberto Matoski  
Coorientador: Prof. Dr. Aduino José Miranda de Lima

**CURITIBA**

**2021**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



MARCELO DA COSTA TEIXEIRA

**ANÁLISE INFERENCIAL DA RESISTÊNCIA DE TELHAS CERÂMICAS SUBMETIDAS A ESFORÇOS  
MÚLTIPLOS DE IMPACTO SIMULANDO CHUVAS DE GRANIZO**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Construção Civil.

Data de aprovação: 23 de Agosto de 2021

Prof Adalberto Matoski, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof.a Andressa Gobbi, Doutorado - Universidade Estadual de Ponta Grossa (Uepg)

Prof Gustavo Savaris, - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 30/08/2021.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Carlos Alberto (*in memoriam*) e Maria Isabel que me proporcionaram estudos de alta qualidade, o que me permitiu alcançar a formação em Engenharia Civil.

Agradeço à minha especial companheira e esposa Vanessa que me apoiou e compartilhou todo processo desta nova etapa da minha vida, além do entendimento nos meus momentos de ausência.

Da forma mais especial, ao amor e amizade da minha “pequena” filha de 11 anos que sempre me recebe com um sorriso lindo e puro levando-me a aprender muito sobre a nossa vida.

Agradeço ao meu professor orientador Adalberto Matoski e coorientador Aduino José Miranda de Lima que me ajudaram elaborar este trabalho com conhecimento, dedicação, amizade e alegria.

Ao meu “novo e inesperado” amigo Décio Przepiora que participou da elaboração do equipamento de ensaio, dedicando seu tempo a uma causa científica. Também a minha futura colega de profissão Larissa Torres que me auxiliou na realização dos ensaios realizados tornando o processo mais produtivo.

Aos meus colegas de mestrado pela amizade e possibilidade de convívio com profissionais da mesma área, onde a troca de informações e ajuda mútua foram constantes durante o desenvolvimento da dissertação.

Aos coordenadores do programa, professores e banca examinadora que tornaram esta passagem da nossa vida profissional prazerosa, importante e única.

Obrigado a todos!

“Jamais considere seus estudos como uma obrigação, mas como uma oportunidade invejável para aprender a conhecer a influência libertadora da beleza do reino do espírito, para seu próprio prazer pessoal e para proveito da comunidade à qual seu futuro trabalho pertencer”.

(Albert Einstein)

## RESUMO

**TEIXEIRA, MARCELO DA COSTA. Análise inferencial da resistência de telhas cerâmicas submetidas a esforços múltiplos de impacto simulando chuvas de granizo, 2021.** 117 folhas. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

A pesquisa teve como objetivo elaborar uma equação baseada em análise inferencial de regressão múltipla para descrever a resistência a esforços múltiplos de impacto de telhas cerâmicas em diferentes idades submetidas a esforços simulando chuvas de granizo. O trabalho estabeleceu correlações entre as idades das telhas e seus aspectos físicos (absorção, carga de ruptura à flexão e massa saturada), comparou o procedimento experimental da norma FM 4473 (ANSI, 2011), desenvolveu um equipamento de lançamento de esferas de gelo com até 4,5 cm de diâmetro e apresentou uma equação que descreve o fenômeno. Foram realizadas medições de absorção, carga de ruptura à flexão e massa saturada das telhas. A metodologia experimental proposta pela norma FM 4473 (ANSI, 2011) foi utilizada parcialmente pois não foi possível analisar os danos em três níveis. Foi possível concluir através da análise estatística que a idade não influencia significativamente na resistência ao impacto, e sim as características físicas das telhas de carga de ruptura à flexão, absorção e massa saturada. A análise estatística obteve 78% de poder explicativo do fenômeno. Os resultados demonstraram que as características físicas de resistência a flexão, absorção e massa saturada podem provocar uma redução de 45% da resistência ao impacto. Demonstrando que o atendimento aos normativos técnicos e a qualidade na fabricação das telhas cerâmicas são fundamentais para resistências ao granizo.

**Palavras-chave: Chuvas de granizo, Telhados cerâmicos, Teste de impacto**

## ABSTRACT

**TEIXEIRA, Marcelo da Costa.** Inferential analysis of the resistance of ceramic tiles submitted to multiple impact efforts simulating hailstorms, 2021. 117 leaves. Dissertation presented to the Graduate Program in Civil Engineering of the Academic Department of Civil Construction of the Federal University of Technology of Paraná. Curitiba, 2021.

The research aimed to develop an equation based on inferential multiple regression analysis to describe the multiple impact strength of ceramic tiles at different ages subjected to stresses simulating hailstorms. The work established correlations between the ages of the tiles and their physical aspects (absorption, flexural strength, and saturated mass), compared the experimental procedure of the FM 4473 standard (ANSI, 2011), developed an ice ball launching equipment with up to 4,5 cm in diameter and presented an equation that describes the phenomenon. Measurements of absorption, flexural strength and saturated mass of the tiles were performed. The experimental methodology proposed by the FM 4473 standard (ANSI, 2011) was partially used because it was not possible to analyze the damage at three levels. It was possible to conclude through the statistical analysis that age does not significantly influence the impact strength, but the physical characteristics of the breaking load tiles to flexion, absorption, and saturated mass. Statistical analysis obtained 78% explanatory power of the phenomenon. The results showed that the physical characteristics of flexural strength, absorption and saturated mass can cause a 45% reduction in impact strength. Demonstrating that compliance with technical regulations and quality in the manufacture of ceramic tiles are essential for resistance to hail.

**Keywords:** Hailstorms, Ceramic roofs, Impact test

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Telha cerâmica do tipo francesa .....	15
Figura 2 – Comparação do impacto ambiental das etapas do ciclo de vida entre telhas cerâmicas e de concreto .....	19
Figura 3 – Fluxograma do processo produtivo da telha cerâmica .....	22
Figura 4 – Índice de conformidade do setor .....	26
Figura 5 – Indicador de conformidade ao longo dos anos .....	26
Figura 6 – Indicador de qualidade das empresas .....	27
Figura 7 – Curvas de degradação conforme o tipo de telha .....	30
Figura 8 – Curvas de degradação conforme o tipo de exposição .....	30
Figura 9 – Ocorrências de eventos relacionados a granizo no Brasil .....	33
Figura 10 – Ocorrências de eventos relacionados a granizo no Rio Grande do Sul .....	34
Figura 11 – Ocorrências de eventos relacionados a granizo em Santa Catarina .....	34
Figura 12 – Ocorrências de eventos relacionados a granizo no Paraná .....	35
Figura 13 – Frequência de ocorrência de tempestades de granizo no mundo .....	36
Figura 14 – Detalhes do ensaio de impacto Charpy .....	39
Figura 15 – Teste impacto NBR 13818 – Anexo Q .....	39
Figura 16 – Gráficos do número de ocorrências de granizo por ano .....	43
Figura 17 – Protótipo de ensaio para esferas de gelo .....	44
Figura 18 – Equipamento de ensaio FM 4473 (ANSI, 2011) .....	47
Figura 19 – Momento do impacto de uma esfera de gelo .....	49
Figura 20 – Momento do impacto de uma esfera de aço .....	50
Figura 21 – Materiais utilizados .....	57
Figura 22 – Imagens do telhado da guarita obtidas através do Google Earth .....	58
Figura 23 – Equipamento de ensaio .....	59
Figura 24 – Seção de ensaio e telha ensaiada .....	60
Figura 25 – Região de maior fragilidade e menor espessura da telha francesa .....	61
Figura 26 – Forma de impacto da esfera de 3,0 cm de gelo na telha .....	61
Figura 27 - Esfera de gelo de 3,0 cm deformada antes do impacto .....	63
Figura 28 – esfera de gelo intacta antes do impacto .....	64
Figura 29 – Obtenção de dados aleatórios para cada idade (0, 5, 25, 30, 34, 45 e 50 anos) .....	67
Figura 30 – Identificação das telhas .....	67
Figura 31 – Pesagem das telhas saturadas .....	68
Figura 32 – Ensaio de carga de ruptura à flexão .....	69
Figura 33 – Ensaio de impacto .....	72
Figura 34 – Gráfico de carga de ruptura à flexão nas diversas idades .....	75
Figura 35 – Gráfico do comando <i>boxplot</i> para carga de ruptura à flexão nas diversas idades .....	76
Figura 36 – Gráfico do percentual de absorção nas diversas idades .....	78



Figura 37 – Distribuição dos resíduos .....	81
Figura 38 – Normalidade dos dados (aderência) .....	81
Figura 39 – Gráfico de correlações parciais .....	82
Figura 40 – Gráfico diâmetros de rompimento x idade (com intervalo de confiança) .....	85
Figura 41 – Ensaio de carga de ruptura à flexão – telhas novas.....	95
Figura 42 – Ensaio de carga de ruptura à flexão – telhas de 5 anos .....	96
Figura 43 – Ensaio de carga de ruptura à flexão – telhas de 25 anos .....	97
Figura 44 – Ensaio de carga de ruptura à flexão – telhas de 30 anos .....	98
Figura 45 – Ensaio de carga de ruptura à flexão – telhas de 34 anos .....	99
Figura 46 – Ensaio de carga de ruptura à flexão – telhas de 45 anos .....	100
Figura 47 – Ensaio de carga de ruptura à flexão – telhas de 50 anos .....	101

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Indicador de conformidade das empresas fabricantes de telhas cerâmicas .....	25
Tabela 2 – Índice de conformidade das empresas aderidas ao PSQ.....	27
Tabela 3 – Massa do corpo-duro, altura e energia do impacto .....	37
Tabela 4 – Diâmetro e massas das esferas de gelo .....	46
Tabela 5 – Velocidades das esferas de gelo.....	46
Tabela 6 – Velocidades e energias das esferas de gelo .....	65
Tabela 7 – Amostras aleatórias para os ensaios de absorção e carga de ruptura à flexão.....	68
Tabela 8 – Critério para seleção das esferas de gelo .....	71
Tabela 9 – Resultados para o ensaio de carga de ruptura à flexão (N) .....	73
Tabela 10 – Tabela ANOVA para carga de ruptura à flexão em todas as idades .....	74
Tabela 11 – Resultados do teste t de <i>Student</i> para variável carga de ruptura à flexão (N) .....	75
Tabela 12 – Resultados para o ensaio de absorção (%).....	77
Tabela 13 – Tabela ANOVA para percentual de absorção em todas as idades.....	77
Tabela 14 – Resultados do teste t de <i>Student</i> para variável absorção (%).....	78
Tabela 15 – Massas saturadas para cada idade das telhas ensaiadas .....	79
Tabela 16 – Resultados estatísticos.....	80
Tabela 17 – Variáveis utilizadas.....	82
Tabela 18 – Diâmetros de rompimento para cada idade das telhas ensaiadas .....	84
Tabela 19 – ANOVA para carga de ruptura à flexão (5 anos).....	106
Tabela 20 – Teste t de Student para carga de ruptura à flexão (5 anos) .....	106
Tabela 21 – ANOVA para carga de ruptura à flexão (25 anos).....	107
Tabela 22 – Teste t de Student para carga de ruptura à flexão (25 anos) .....	107
Tabela 23 – ANOVA para carga de ruptura à flexão (30 anos).....	108
Tabela 24 – Teste t de Student para carga de ruptura à flexão (30 anos) .....	108
Tabela 25 – ANOVA para carga de ruptura à flexão (34 anos).....	109
Tabela 26 – Teste t de Student para carga de ruptura à flexão (34 anos) .....	109
Tabela 27 – ANOVA para carga de ruptura à flexão (45 anos).....	110
Tabela 28 – Teste t de Student para carga de ruptura à flexão (45 anos) .....	110
Tabela 29 – ANOVA para carga de ruptura à flexão (50 anos).....	111
Tabela 30 – Teste t de Student para carga de ruptura à flexão (50 anos) .....	111
Tabela 31 – ANOVA para % de absorção (5 anos).....	112
Tabela 32 – Teste t de Student para % de absorção (5 anos).....	112
Tabela 33 – ANOVA para % de absorção (25 anos).....	113
Tabela 34 – Teste t de Student para % de absorção (25 anos).....	113
Tabela 35 – ANOVA para % de absorção (30 anos).....	114
Tabela 36 – Teste t de Student para % de absorção (30 anos).....	114

Tabela 37 – ANOVA para % de absorção (34 anos).....	115
Tabela 38 – Teste t de Student para % de absorção (34 anos) .....	115
Tabela 39 – ANOVA para % de absorção (45 anos).....	116
Tabela 40 – Teste t de Student para % de absorção (45 anos) .....	116
Tabela 41 – ANOVA para % de absorção (50 anos).....	117
Tabela 42 – Teste t de Student para % de absorção (50 anos) .....	117

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 .....	41
Equação 2 .....	41
Equação 3 .....	41
Equação 4 .....	41
Equação 5 .....	46
Equação 6 .....	55
Equação 7 .....	69
Equação 8 .....	70
Equação 9 .....	70
Equação 10 .....	71

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1 OBJETIVO GERAL .....	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	15
1.3 JUSTIFICATIVA .....	16
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>18</b>
2.1 IMPORTÂNCIA DOS TELHADOS NAS CONSTRUÇÕES .....	18
2.2 TELHAS CERÂMICAS .....	20
2.3 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS .....	28
2.4 PRECIPITAÇÃO DE GRANIZO .....	31
2.5 HISTÓRICOS DE CHUVAS DE GRANIZO NO BRASIL E REGIÃO SUL .....	32
2.6 NORMATIZAÇÃO .....	36
2.7 ENSAIOS DE IMPACTO .....	38
2.8 VELOCIDADE DO GRANIZO .....	40
2.9 ENERGIA CINÉTICA DO GRANIZO .....	41
2.10 ENSAIOS DE IMPACTO SIMULANDO GRANIZO .....	42
2.10.1 ENSAIO .....	47
2.11 ANÁLISE DE VARIÂNCIA E DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA NORMAL .....	51
2.12 TESTE T DE STUDENT .....	52
2.13 CRITÉRIO DE CHAUVENET .....	53
2.14 ANÁLISE ESTATÍSTICA POR REGRESSÃO LINEAR .....	54
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>57</b>
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS .....	57
3.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS .....	58
3.3 METODOLOGIA .....	60
3.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	66
<b>4 RESULTADOS E ANÁLISES</b> .....	<b>73</b>
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	<b>86</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>88</b>
<b>APÊNDICE A</b> .....	<b>95</b>
<b>GRÁFICOS TENSÃO X DEFORMAÇÃO DE CADA IDADE DE TELHA</b> .....	<b>95</b>
<b>APÊNDICE B</b> .....	<b>102</b>
<b>TABELA DE RESÍDUOS DE DADOS DA AMOSTRA</b> .....	<b>102</b>
<b>APÊNDICE C</b> .....	<b>106</b>
<b>APÊNDICE D</b> .....	<b>112</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os telhados possuem a função de proteger as construções das decorrências atmosféricas como chuva, sol, vento, neve, com a função de estanqueidade que, nos momentos de chuvas, principalmente torrenciais, os usuários tomam conhecimento da sua relevante função (TEIXEIRA, 2017).

Os telhados cerâmicos são a tipologia mais utilizada em coberturas residenciais no mundo (FARRENY *et al.*, 2011).

A previsão da vida útil de um telhado é o procedimento mais adequado para estimar as necessidades de manutenção, reparo e substituição de um edifício componente ao longo de seu ciclo de vida (SILVA; GASPAR; BRITO, 2011).

Teixeira (2017), demonstrou que as chuvas de granizo foram os eventos atmosféricos adversos que mais evoluíram nos últimos 30 anos, principalmente na região Sul do Brasil provocando danos às coberturas dos imóveis atingidos.

Neste contexto, a análise da resistência ao impacto das telhas quando submetidas a chuvas de granizo torna-se cada vez mais relevante a fim de verificar preventivamente a situação da cobertura dos imóveis.

Esse estudo é justificado pelo fato dos potenciais danos físicos que o granizo pode provocar nas edificações afetando toda a toda cadeia produtiva relacionada à construção civil como seguradoras, construtoras, incorporadoras, usuários e setor público.

Sendo assim, foi construído um equipamento capaz de lançar esferas de gelo que simulam situações reais de impacto de granizo que, através dos dados obtidos, realizou-se um tratamento estatístico inferencial, utilizando regressão linear múltipla, onde foi possível determinar uma equação que descreve o diâmetro de granizo que provoca danos nas telhas baseados nas correlações das características de cada telha.

Como fatores limitantes, os materiais ensaiados foram apenas de uma tipologia (telhas cerâmicas francesas), conforme demonstrado na Figura 1.

**Figura 1 – Telha cerâmica do tipo francesa**



**Fonte: autor**

## 1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral é elaborar um modelo matemático, baseado em análise inferencial de regressão linear múltipla, capaz de estimar a resistência de telhas cerâmicas em diversas idades quando submetidas a esforços múltiplos de impacto simulando as chuvas de granizo.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Desenvolver um equipamento capaz de lançar esferas de gelo em velocidades iguais a chuvas de granizo para ensaio laboratorial;
- ✓ Comparar a metodologia de ensaio adotada com a norma FM 4473 (ANSI, 2011) sob as análises de impacto simulando chuvas de granizo;
- ✓ Caracterizar os aspectos físicos de carga de ruptura à flexão, absorção e massa saturada em relação às variáveis de impacto e idade das telhas;
- ✓ Correlacionar os comportamentos físicos de carga de ruptura à flexão, absorção e massa saturada em relação às variáveis de impacto e idade das telhas;

### 1.3 JUSTIFICATIVA

O telhado é o elemento mais vulnerável de um edifício, por estar mais exposto aos agentes de deterioração, apresentando assim uma maior incidência manifestações patológicas (GARCEZ *et al.*, 2012).

A partir de 2000, episódios atmosféricos intensos se tornaram mais frequentes principalmente nos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul no Brasil, como as chuvas de granizo e, mais raramente, tornados de baixa intensidade (TEIXEIRA, 2017).

De acordo com a NRCA (2000), a cobertura de um edifício (em particular, as telhas) representa um dos maiores e mais significativos investimentos em edifícios, dada a necessidade de serem duráveis, garantindo estanqueidade e função de isolamento térmico nas condições específicas em que é submetido durante sua vida útil.

No entanto, em algumas situações, o os telhados não são considerados devidamente na arquitetura do edifício e, o investimento realizado durante a fase de construção e na implementação de políticas de manutenção adequadas e periódicas é escasso, gerando graves problemas, comprometendo a integridade estrutural dos edifícios e a segurança dos usuários (HASSANAIN; FROESE; VANIER, 1999).

A manutenção dos telhados é frequentemente negligenciada nas fases de projeto e execução, diminuindo o desempenho do sistema de cobertura, encurtando sua vida útil (RAMOS *et al.*, 2018).

No entanto, há uma falta de padronização abordagens para a previsão da vida útil de sistemas de cobertura, essencialmente devido à falta de métodos confiáveis para modelar os mecanismos de degradação que afetam os sistemas de cobertura (LOUNIS; VANIER; LACASSE, 1998).

A vida útil prevista de edifícios e seus componentes são informações valiosas para apoiar as decisões na gestão da propriedade tornando-se um elemento fundamental na estimativa de diferentes alternativas de manutenção com base em custos de longo prazo (MORGADO *et al.*, 2017).

A otimização dos planos de manutenção e a avaliação informada da maioria solução vantajosa requer um conhecimento confiável sobre o desempenho do componente em análise ao longo do tempo, e a interação dinâmica entre eles e o



ambiente circundante, identificando os agentes de degradação relevantes (SHOHET; PACIUK, 2004).

O S2ID (Sistema Integrado de Informações sobre Desastres Naturais) do Ministério do Desenvolvimento Regional (2020), demonstra que, no Brasil, houve um aumento significativo de ocorrências de chuvas de granizo em regiões subtropicais a partir dos anos 2000.

As chuvas de granizo podem provocar danos nas construções, haja vista que o telhado é o elemento construtivo mais exposto de um edifício.

Além disso, os danos financeiros e psicológicos relacionados aos ocupantes das edificações, prejuízos às seguradoras e gastos imprevistos ao sistema público tornam-se fatores significativos no planejamento de ações de prevenção.

O normativo técnico brasileiro não possui uma metodologia de análise de impacto nas telhas, sendo assim, este trabalho desenvolveu a metodologia de ensaio de impacto com elaboração de equipamento e uma modelagem matemática que descreve o desempenho das telhas quando submetidas a esforços múltiplos de impacto.

Este trabalho, portanto, se justifica em função do aumento de chuvas de granizo no Brasil conforme Teixeira (2017) e S2ID (2020), e no mundo de acordo com Cecil e Blankenship (2012) e Pucik *et al.* (2019).

Além do aumento do evento atmosférico adverso, a ausência de análises técnicas normativas no Brasil, pela falta de metodologia de análise preventiva das coberturas e dos potenciais danos financeiros e psicológicos aos usuários dos imóveis e seguradoras.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica traz informações sobre pesquisas realizadas sobre a importância das coberturas nas construções, método de fabricação das telhas cerâmicas, manifestações patológicas mais comuns, aumento dos eventos de granizo no Brasil e no mundo, normatização, testes de impacto existentes e análise estatística de dados por regressão linear.

### 2.1 IMPORTÂNCIA DOS TELHADOS NAS CONSTRUÇÕES

Ramos *et al.* (2018) revelou que a tipologia da telha demonstra influência na vida útil dos telhados cerâmicos onde, os resultados alcançados mostraram que a telha francesa é mais durável.

O telhado é o elemento mais vulnerável, e demonstra a maior incidência de anomalias, sendo o elemento responsável pela maioria das decisões de intervenção em reformas de locais históricos (PRIETO *et al.*, 2017).

Gonçalves (2009), publicou um estudo de referência que analisou 826 edifícios dentro de uma área de estudo de caso em Portugal demonstrando que 75% dos edifícios foram identificados como tendo telha cerâmica enquanto.

A Associação Nacional da Indústria Cerâmica – ANICER (2011), publicou um trabalho sobre o período de vida das telhas cerâmicas e telhas de concreto, mas o trabalho realizado analisou uma pesquisa baseada sobre processos de produção, carga aplicada sobre uma estrutura de cobertura, distância média dos fabricantes, impacto ambiental na produção entre outros.

De acordo com a ANICER (2011), as telhas cerâmicas promovem um menor impacto ambiental na maioria das etapas do ciclo de vida de cada tipo de telha (cerâmica x concreto). Sendo assim, no comparativo entre materiais cerâmicos, concreto e asfalto, o que possui o melhor custo-benefício são as telhas cerâmicas e, por esta característica, são comumente utilizadas na cobertura das edificações, principalmente as residenciais.

Para a ANICER (2011), as principais características das telhas cerâmicas são: bom preço, boa resistência às intempéries, facilidade de manuseio, matéria-prima abundante (principalmente no Brasil) e boa capacidade estrutural.

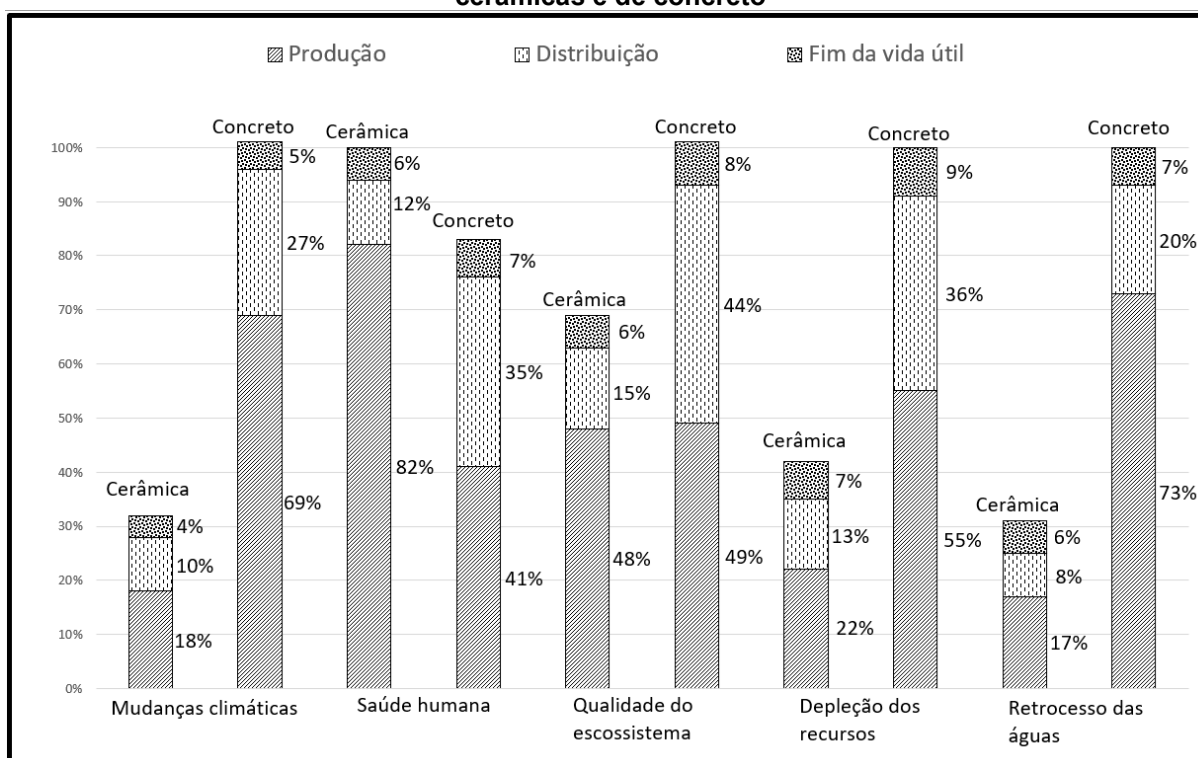
Na Figura 2, podem ser observados os diferentes impactos ambientais com diferentes variáveis nas etapas de produção, distribuição e fim da vida útil entre telhas cerâmicas e de concreto.

É possível verificar na Figura 2 que, o processo de produção e distribuição são os mais impactantes para as mudanças climática, saúde humana, qualidade do ecossistema, depleção dos recursos e retrocesso das águas.

Conforme a Figura 2, apenas para a saúde humana a produção das telhas cerâmicas é pior que as telhas de concreto, nas demais variáveis a telha cerâmica impacta menos o meio ambiente.

Além disso, o seu custo inferior quando comparado aos telhados similares (telhas de concreto, esmaltadas e de asfalto) torna seu uso comum pelos proprietários de imóveis.

**Figura 2 – Comparação do impacto ambiental das etapas do ciclo de vida entre telhas cerâmicas e de concreto**



Fonte: adaptado de ANICER, 2011

Em relação ao material componente da telha cerâmica, a Associação Brasileira de Cerâmica - ABCERAM (2019a), define que a cerâmica se situa na classificação dos materiais inorgânicos não metálicos que são obtidos com tratamento térmico a temperaturas elevadas determinando as cerâmicas em diversos campos.

Um dos principais campo de utilização, pode-se citar os materiais de revestimento como placas cerâmicas, cerâmica branca como louça sanitária, e a cerâmica vermelha que compreende materiais empregados na construção civil como tijolos, blocos, telhas, elementos vazados entre outros.

De acordo com a ANICER (2019), os dados econômicos da indústria de cerâmica vermelha são muito expressivos e representam 4,8% da indústria brasileira da construção civil com quase 7.000 fábricas pelo Brasil e com faturamento anual de 18 bilhões de reais. Em relação ao número de empresas de telhas cerâmicas, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2008), estima que cerca de pouco mais de 2.500 empresas atuam neste segmento.

Neste contexto, os materiais cerâmicos são de suma importância na construção civil, tendo a sua aplicação em alvenarias, revestimentos, louças sanitárias e nas coberturas das edificações pelo Brasil.

Desta forma, a análise de vida útil dos componentes são fundamentais para a qualidade das edificações que utilizam este produto.

## 2.2 TELHAS CERÂMICAS

A telha cerâmica surgiu na China, por volta de 10.000 a.C. e sua utilização difundiu-se pela Ásia e Europa, permanecendo até a atualidade, onde os colonizadores europeus levaram à América, onde foi abundantemente utilizada desde o século XVII (GRIMMER, 1993).

Antigamente, as telhas eram produzidas de forma manual com mão de obra escrava, onde a moldagem era em suas pernas, podendo ser averiguado por peças antigas que demonstram a forma da estrutura humana (BASTOS, 2013).

De acordo com Melo e Lanna (2002), a utilização de tijolos e telhas cerâmicas ocorre desde a época da colonização do Brasil e as coberturas de telhas cerâmicas formam um sistema construtivo tradicional do Brasil fazendo parte da cultura do país.

O amplo desenvolvimento da indústria cerâmica brasileira aconteceu depois da segunda guerra mundial onde, o rápido desenvolvimento ocorreu pela abundância de matérias-primas, fontes alternativas de energia e acesso a inúmeras tecnologias dos equipamentos industriais da época (ABCERAM, 2019b).

De acordo com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 1988), a telha tipo colonial, foi trazida pelos portugueses ao Brasil e a partir disto surgiram diversas formas evolutivas, consolidando-se no mercado as telhas paulistas e plan.

Dentre algumas desvantagens, as telhas cerâmicas possuem características de absorção de umidade, tornam-se frágeis no decorrer do tempo, possuem diferenças de dimensões relativamente expressivas, são menos resistentes em relação ao concreto e asfalto, e a aplicação é difícil devido a encaixes não muito perfeitos (TEIXEIRA, 2017).

### 2.2.1 TIPO DE TELHA

Segundo a norma NBR 15310 (ABNT, 2009), os tipos de telhas cerâmicas são classificados de acordo com suas características dimensionais e forma de fixação, havendo quatro tipos.

- Telhas planas de encaixe que se unem por meio de sulcos e saliências;
- Telhas compostas de encaixe, que possuem geometria desenvolvida por capa e canal no mesmo componente;
- Telha simples de sobreposição, desenvolvidas por capa e canal independentes;
- Telhas planas de sobreposição, que apenas se sobrepõem.

Ainda segundo a NBR 15310 (ABNT, 2009), os exemplos principais de telhas são as telhas francesas (planas de encaixe), telhas romanas (compostas de encaixe), telhas alemãs (planas de sobreposição) e as telhas de simples sobreposição como as telhas capa e canal colonial, telhas plan entre outras.

### 2.2.2 PROCESSO PRODUTIVO

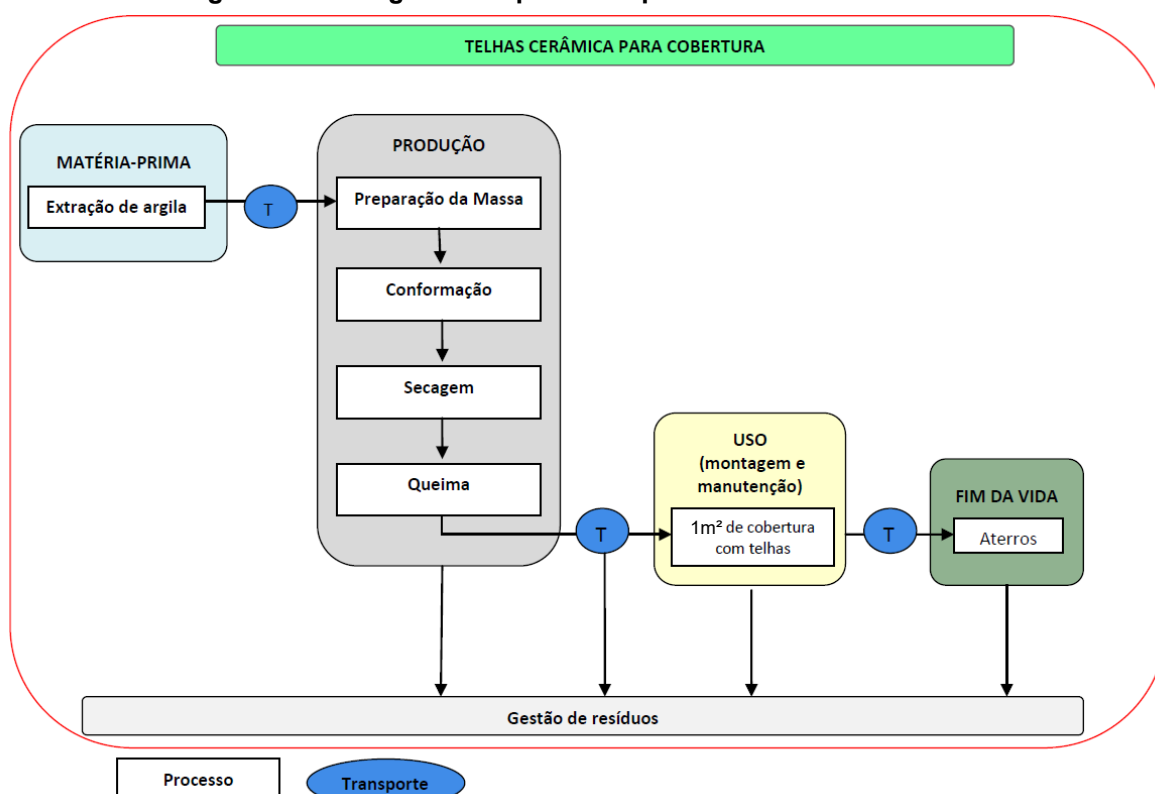
Segundo Idrogo *et al.* (2019), a fabricação de telhas cerâmicas contempla as etapas de coleta de argila, mistura, laminação, extrusão, corte, prensagem e secagem.

Para ANICER (2011), as telhas cerâmicas adotam as seguintes etapas de produção, conforme ilustrado na Figura 3.

O processo de fabricação das telhas cerâmicas consiste na extração matéria-prima (argila) na jazida e transporte até o local de produção onde a massa é

preparada, conformada, seca e encaminhada para a queima onde se torna pronta para distribuição e consequente utilização.

**Figura 3 – Fluxograma do processo produtivo da telha cerâmica**



Fonte: ANICER, 2011

### 2.2.3 MATÉRIA-PRIMA

A principal matéria-prima usada para produção de telhas cerâmicas é a argila que pode ser definida como um material de origem natural, composto de terra, com granulometria fina, geralmente adquire, quando misturado com água, certa plasticidade (SANTOS, 1989).

As telhas cerâmicas são feitas de argila com um pouco de água adicionada e sua extração é realizada com retroescavadeiras, pás carregadeiras e escavadeiras (ANICER, 2011).

A indústria denominada de cerâmica vermelha é a responsável pela fabricação de telhas cerâmicas no Brasil. Segundo Santos (1989), trata-se de uma indústria muito difundida e é um dos poucos campos em que uma única matéria-prima, é conformada na forma final de utilização e queimada sem a adição de outro produto.

#### 2.2.4 PREPARAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA E DA MASSA

Após redução de materiais orgânicos e sais indesejados, a matéria-prima é dosada na quantidade necessária entrar na linha de produção. Segundo Bastos (2003), “a dosagem pode ser feita através da medida de conchadas da retroescavadeira ou através de caixões alimentadores, controlando a respectiva abertura”.

O material misturado dosado é levado aos desintegradores, onde as massas de argila são desintegradas e as pedras, quando existentes, afastadas por centrifugação (ABCERAM, 2019c).

O material obtido é então conduzido ao misturador, onde se inicia o método de homogeneização que, em seguida, é transferido para o laminador, que diminui a granulometria da massa, homogeneiza e corta o bloco de argila em lâminas (BASTOS, 2003).

#### 2.2.5 CONFORMAÇÃO

Para Wenbin Li *et al.* (2018), o processo de extrusão deposita pastas cerâmicas aquosas de carga de sólidos maior que 50% em volume em uma forma onde cada camada depositada é colocada à temperatura ambiente, e posteriormente cada camada é solidificada por calor uniforme, secando sua superfície.

Na moldagem feita por extrusão, seguida de prensagem, de acordo Isaia (2007), consiste na extrusão da matéria-prima com umidade entre 20% e 25%, formando um bloco que é cortado nas medidas apropriadas para a fabricação da telha”.

#### 2.2.6 SECAGEM

Conforme Bastos (2003), a secagem é o método de remoção da água da argila através dos vazios existentes e evaporação para o meio externo que absorve a umidade das peças até que se alcance o equilíbrio.

Bastos (2003), afirma que a secagem natural é o processo de deixar as telhas ao ar livre ou locais cobertos e a secagem artificial é aquela que recebe ar quente de uma fonte de calor para auxiliar na remoção da umidade.

### 2.2.7 QUEIMA E ESTOCAGEM

Isaia (2007), afirma que as telhas cerâmicas, são levadas para queima e aquecidas a temperaturas num intervalo entre 900 °C e 1100 °C após a secagem realizada.

A fase mais relevante do procedimento de fabricação de elementos cerâmicos é a sua queima pelo fato do material adquirir as propriedades físicas como absorção e resistência necessárias para a sua utilização (TOMAZETTI, 2003).

A queima de telhas cerâmicas é realizada em dois tipos de fornos denominados intermitentes ou contínuos. Em fornos intermitentes, o método aplicado é inserir o material no forno e aquecer até a temperatura constante para posteriormente estabilizar e por fim resfriar as peças (FONSECA; FERNÁNDEZ; BERNARDIN, 1994).

Segundo Ripper (1995), depois do processo de queima, as telhas defeituosas devem ser descartadas e sua estocagem realizada em local coberto livre de sujeiras e umidade, acondicionadas em região plana e cobertas com lona.

### 2.2.8 CONTROLE DE QUALIDADE

O Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat - PBQP-H (2019), tem como missão impedir desvios técnicos de materiais e componentes relacionados à construção civil evitando obras civis com problemas de qualidade, prejudicando usuários, as incorporadoras, construtoras e as construções urbanas (PBQP-H, 2019).

Atitudes contra não atendimentos técnicos de fabricação refletem adaptações necessárias à cadeia de produção da construção civil que evidenciam tendências aos fabricantes de materiais para construção civil (PBQP-H, 2019).

A degradação precoce da qualidade dos produtos e aumento de empresas fabricantes de materiais não conformes prejudica o comércio da construção civil e seus usuários, gerando problemas sistemáticos na cadeia produtiva (PBQP-H, 2019).

O Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat - PBQP-H (2019), busca incentivar a capacitação das empresas que procuram atender as normas técnicas específicas com melhorias na tecnologia empregada para produção de materiais.



Antes do incentivo a capacitação de fabricantes os não atendimentos de conformidade de materiais e componentes da construção era de 50%. Em 2019 este percentual é de 20% (PBQP-H, 2019).

De acordo com o Programa Setorial de Qualidade – PSQ (2018), a implementação de programas setoriais da qualidade se destina a evitar desvios normativos de atendimento para a fabricação de diversos materiais.

No caso das telhas cerâmicas o normativo técnico a ser atendido é a norma NBR 15310:2009 - Componentes cerâmicos – Telhas – terminologia, requisitos e métodos de ensaio (ABNT, 2019).

Para o Programa Setorial da Qualidade – PSQ (2018), as telhas cerâmicas são um dos materiais que possuem um baixo atendimento de conformidade, demonstrando um número 32 empresas participantes face ao universo de cerca de 6.000 que atuam no universo da cerâmica conforme ABCERAM, (2019d).

Os indicadores de conformidade evidenciam evolução do setor na qualificação de atendimento aos ensaios e diretrizes normativas. Nos dados da Tabela 1 pode ser observado que das 31 empresas participantes 25 estão dentro da conformidade estabelecida pelo programa.

**Tabela 1 – Indicador de conformidade das empresas fabricantes de telhas cerâmicas**

<b>Np</b>	número de empresas participantes do PSQ-TC	31
<b>Npc</b>	número de empresas em conformidade participantes do PSQ-TC	25
<b>Na</b>	número de empresas não participantes acompanhadas pelo PSQ-TC	32
<b>Nac</b>	número de empresas em conformidade não participantes acompanhadas pelo PSQ-TC	13
<b>Pp</b>	produção das empresas participantes do PSQ-TC	13.020.000
<b>Pa</b>	produção das empresas não participantes acompanhadas pelo PSQ-TC	8.960.000
<b>Pt</b>	produção das empresas participantes e não participantes do PSQ-TC	31.780.000

**Fonte: PSQ (Programa Setorial de Qualidade, 2018)**

Em contrapartida, pode ser observado na Figura 4 que a representatividade das empresas no programa de conformidade é de apenas 41%, evidenciando uma baixa participação da maioria das empresas fabricantes.

Figura 4 – Índice de conformidade do setor

Índice de conformidade do setor	
Ic	80,6%
Rp	41,0%
Ica	44,5%
Ra	69,2%

Fonte: PSQ (Programa Setorial de Qualidade, 2018)

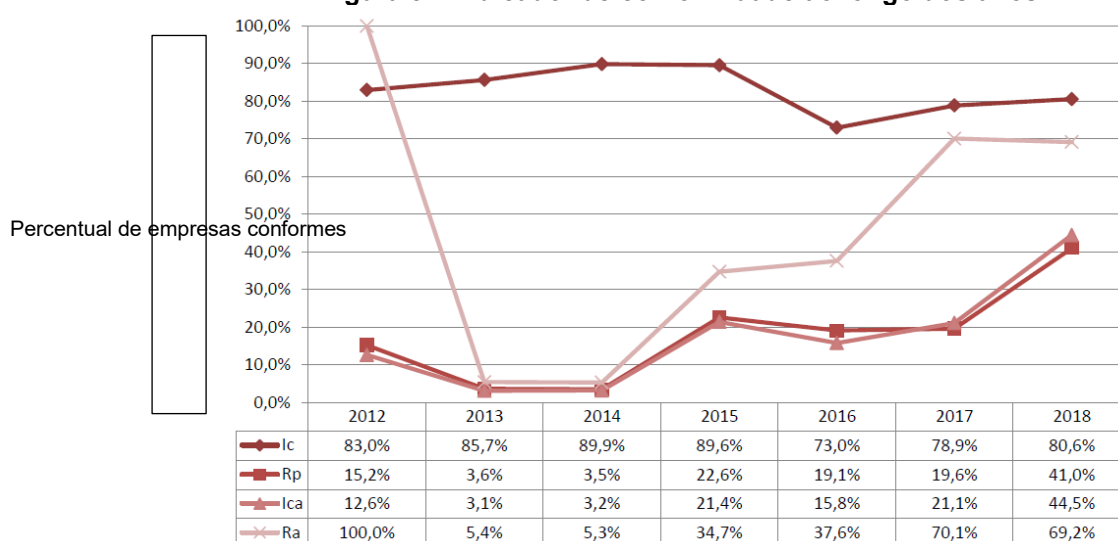
Onde:

- **Ic**: indicador de conformidade do Programa.  $Ic = Npc \div Np$
- **Rp**: representatividade do indicador do programa.  $Rp = Pp \div Pt$
- **Ica**: indicador de conformidade estendido ao setor.  $Ica = Ic \times Rp + (Nac \div Na) \times (Pa \div Pt)$
- **Ra**: representatividade do indicador estendido ao setor.  $Ra = (Pp + Pa) \div Pt$

Na análise da Figura 5, pode ser verificado pela curva superior (losangos) que desde 2012, 80,6% das empresas possuem certificação no setor, mas, em contrapartida, a as duas curvas inferiores (quadrado e triângulo) demonstram uma representatividade do indicador no programa de apenas 41%.

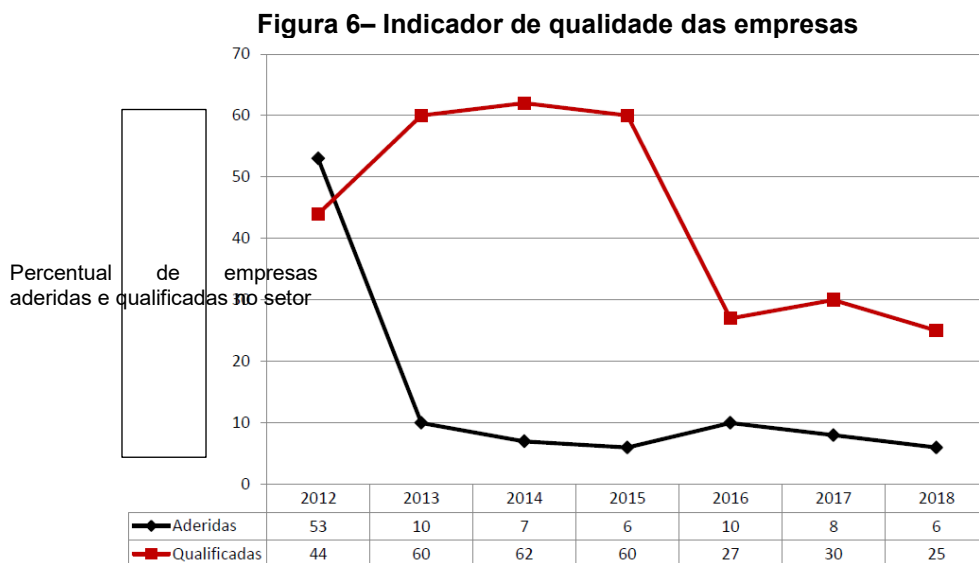
Ou seja, a representatividade do indicador no programa ainda é inferior a metade do universo de fabricantes. Isto demonstra que do total estimado de produção, apenas 41% são empresas participantes e, destes 41% de empresas, 80,6% delas possuem certificação.

Figura 5 – Indicador de conformidade ao longo dos anos



Fonte: PSQ (Programa Setorial de Qualidade, 2018)

Na Figura 6, pode ser verificado pela curva superior (quadrados) que até o ano de 2015 pouco mais de 60% das empresas aderidas tinham obtido a qualificação no setor e após este ano houve uma queda de 50%. Na curva inferior (losango) há a demonstração de que apenas 10% das empresas estavam aderidas ao sistema, demonstrando a falta de continuidade no atendimento a qualidade do setor da cerâmica.



Fonte: PSQ (Programa Setorial de Qualidade, 2018)

Na Tabela 2, pode ser observado que o setor de telhas cerâmicas possui um dos menores índices de conformidade com valor de 58,50% ficando acima apenas de blocos cerâmicos com 49,00%, perfis de PVC para forros com 51,00% e esquadrias de PVC com 36,00%.

**Tabela 2 – Índice de conformidade das empresas aderidas ao PSQ**

(continua)

<b>Programas Setoriais da Qualidade – PSQ's</b>	<b>Índice de conformidade</b>
Portas e Janelas de Correr de Alumínio	não apurado
Esquadrias de PVC	36,00%
Blocos Cerâmicos	49,00%
Perfis de PVC para Forros	51,00%
<b>Telhas cerâmicas</b>	<b>58,50%</b>
Blocos Vazados de Concreto com Função Estrutural e Peças de Concreto para Pavimentação	77,60%
Painéis de Partículas de Madeira (MDP) e Painéis de Fibras de Madeira (MDF)	81,80%

	<b>(conclusão)</b>
Geotêxteis não tecidos	83,00%
Argamassa Colante	83,40%
Esquadrias de Aço	84,00%
Tintas Imobiliárias	86,00%
Pisos Laminados Fornecidos em Réguas	87,10%
Metais Sanitários	88,30%
Aparelhos Economizadores de Água	89,00%
Componentes para Sistemas Construtivos em Chapas de Gesso para Drywall	89,00%
Eletrodutos Plásticos para Sistemas Elétricos de Baixa Tensão em Edificações	89,00%
Fechaduras	89,50%
Louças Sanitárias para Sistemas Prediais	89,70%
Placas Cerâmicas para Revestimento	90,60%
Reservatórios Poliolefinicos para Água Potável de Volume até 3000 L	93,50%
Tubos de PVC para Infraestrutura	96,00%
Tubos e Conexões de PVC para Sistemas Hidráulicos Prediais	96,50%
Cimento Portland	99,00%

**Fonte: adaptado - PSQ (Programa Setorial de Qualidade, 2018)**

### 2.3 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS

Segundo Cruz e Aguiar (2009), as principais manifestações patológicas nos revestimentos de cobertura estão relacionadas às construções com coberturas planas que precisam de impermeabilização e que apresentam manifestações patológicas devido à fissuração, perfurações, formação de pregas, elevações e falta de aderência.

Nas coberturas inclinadas (caracterizadas por telhados principalmente cerâmicos), as manifestações patológicas comuns são as fraturas, acumulação de musgos, detritos e danos por ação do gelo (CRUZ e AGUIAR, 2009).

As manifestações patológicas em coberturas revestidas com telhas cerâmicas podem ser decorrentes da má qualidade das telhas, erros na execução e falta de manutenção preventiva durante a sua vida útil (FERREIRA, 2009).

Uma pesquisa realizada no centro histórico da cidade de Vila Real em Portugal demonstrou que as manifestações patológicas mais identificadas estão relacionadas com o envelhecimento dos materiais e a presença de água, devido a

fissuras, danos nos sistemas de drenagem e fissuras ou ausência de telhas cerâmicas nos telhados, que poderiam ter sido drasticamente reduzidos com uma manutenção regular (QUEIRÓS; PAIVA; PINTO, 2018).

Para Ramos *et al.* (2018), o desempenho e a vida útil de coberturas de telhas cerâmicas são fortemente influenciados pela qualidade dos materiais, do design adequado, das especificações, das condições de execução e da adoção de estratégias de manutenção.

Teixeira (2017), demonstra que as manifestações patológicas comuns em telhados são os encaixes deficientes, a proliferação de fungos, trincas e fissuras, ação dos ventos e eventos atmosféricos adversos, como ventanias e granizo. Evidenciando a importância da análise de absorção das telhas e análise da sua massa saturada.

Para Louzich *et al.* (2016), uma construção exposta ao meio externo, no decorrer do tempo, pode causar a degradação das telhas na cobertura, pela ação do Sol, sujeira e poluição urbana, provocando alterações das características físicas do telhado.

Destaca-se o acúmulo de materiais sobre as telhas, a proliferação de fungos e musgos devido à presença de umidade nos materiais, que tendem a alterar a coloração e a rugosidade dos elementos do telhado (LOUZICH *et al.*, 2016).

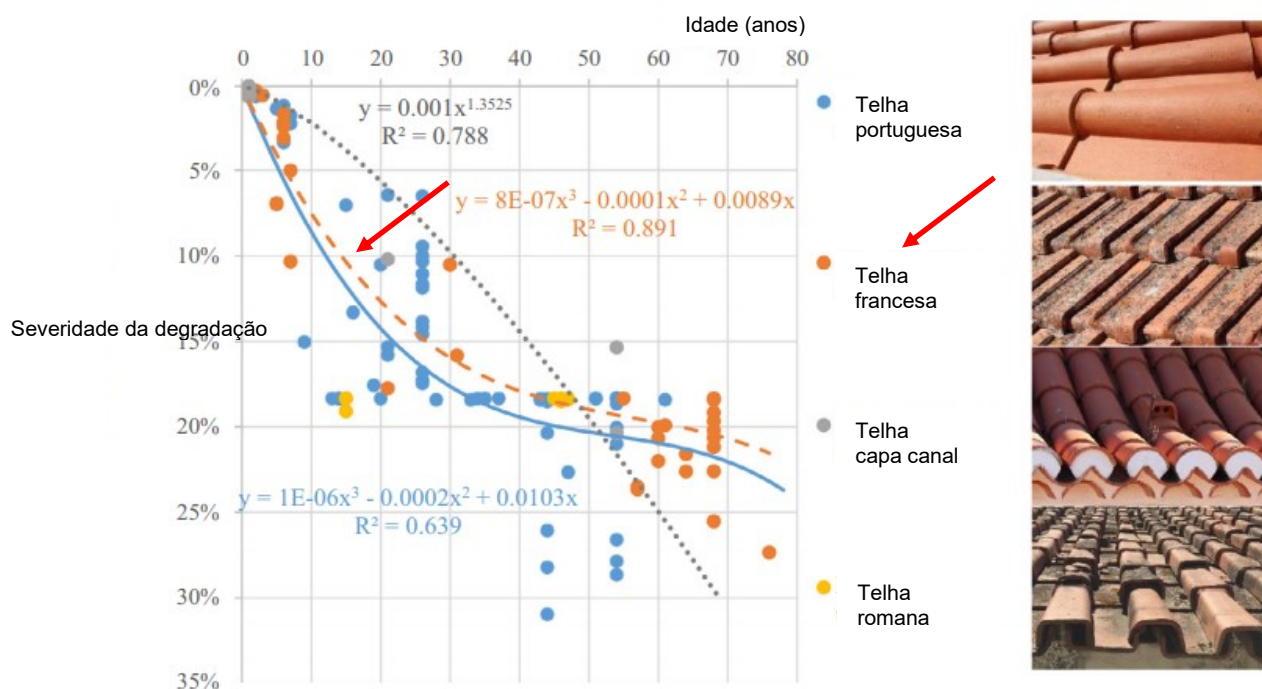
Ferreira (2009), declara que a influência de surgimento de manifestações patológicas é devido às condições atmosféricas como ventos fortes que deslocam seus elementos. das telhas.

Ramos *et al.* (2018), verificou que 27,9% dos telhados estudados possuem grau moderado de manifestações patológicas como desenvolvimento de vegetação e mudança de cor.

A tipologia da telha e o tipo de exposição ambiental também são fatores que determinam a severidade de degradação das telhas cerâmicas (RAMOS *et al.*, 2018).

Na Figura 7 pode ser observado para a telha francesa que há um aumento de 18% de degradação da telha cerâmica francesa nos primeiros 30 anos de idade, evidenciando a perda de funcionalidade das telhas atrelada a falta de manutenção. Após os 30 anos há uma diminuição da velocidade de degradação demonstrando uma estabilização do processo.

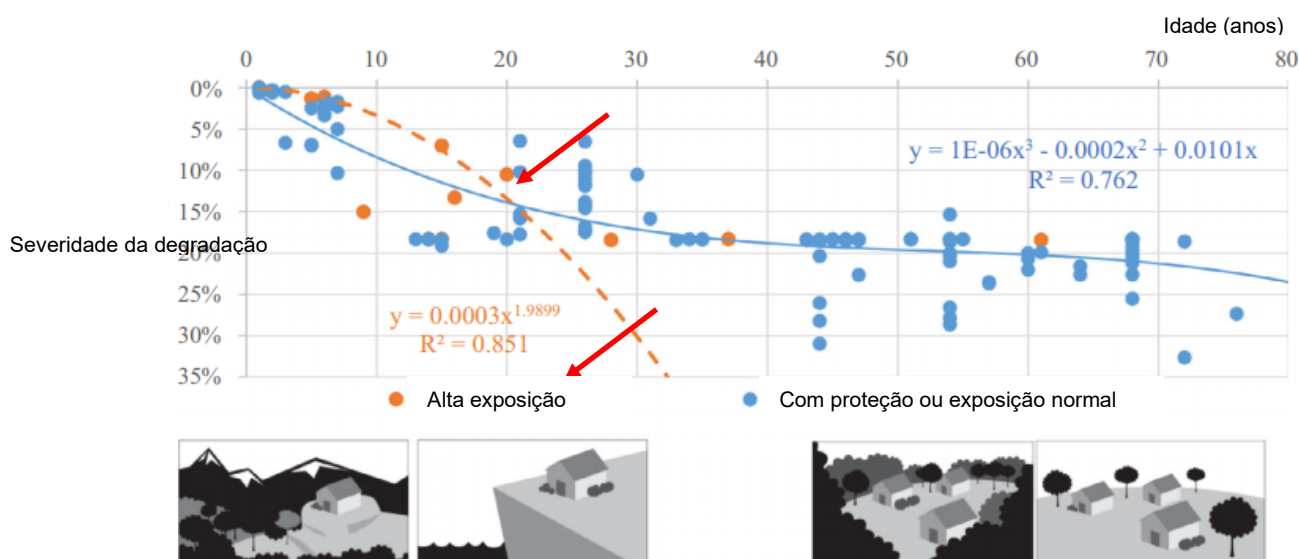
**Figura 7 – Curvas de degradação conforme o tipo de telha**



Fonte: Ramos *et al.* (2018)

Na Figura 8 pode ser observado que telhados mais expostos possuem um aumento rápido na severidade de degradação após os 20 anos de idade das telhas, enquanto telhas com proteção ou exposição normal estabilizam a degradação após os 20 anos de idade.

**Figura 8 – Curvas de degradação conforme o tipo de exposição**



Fonte: Ramos *et al.* (2018)

O estudo de Ramos *et al.* (2018), demonstra que o tipo de telha influencia a vida útil dos revestimentos cerâmicos de telhados e os resultados alcançados mostraram que a telha francesa é mais durável, mas existem vários fatores que podem contribuir para este resultado, como erros de fabricação, projeto e execução.

## 2.4 PRECIPITAÇÃO DE GRANIZO

A maioria dos desastres naturais que ocorrem no Brasil provém de fenômenos atmosféricos relacionados às precipitações, sejam em excesso ou não e, portanto, podem ser considerados como uma das principais causas dos desastres naturais. Entre outros fatores que contribuem para perdas causadas por eventos atmosféricos extremos ligados à precipitação, são encontradas ocorrências de chuvas acompanhadas de granizo que contribuem para perdas significativas nos estados da região sul do país (TEIXEIRA e SATYAMURTY, 2004).

O granizo é uma ocorrência natural que causa danos materiais significativos à população mundial e se manifesta também no Brasil, com predominância na região sul do país causando danos a edificações habitacionais, carros, edifícios públicos e indústrias, provocando perdas significativas (AYOADE, 2010).

Granizos são pedaços de gelo transparentes relativamente opacos, que precipitam com o tamanho variando de ervilhas a bolas de golfe (WALLACE e HOBBS, 2006).

Quando as nuvens do tipo cumulus evoluem para nuvens do tipo cumulonimbus, devido à atuação dos fortes movimentos verticais ascendentes dentro da nuvem, pode-se ocorrer a precipitação de granizo (SPERLING, 2018).

De acordo com Sperling (2018), a convecção é um processo em que calor, umidade, massa, momento e vorticidade são transportados da baixa troposfera até a troposfera superior. Nos trópicos, a precipitação ocorre devido às nuvens convectivas do tipo cumulus.

A possibilidade de ocorrência de granizos com diâmetros acima de 3 cm é um aspecto relevante devido ao aumento do poder destrutivo dos granizos. (AYOADE, 2010).

De acordo com Hutchinson e Koontz (2009), agências de seguros norte-americana permite que as companhias de seguros ofereçam uma redução nas taxas de seguro, caso um tipo de cobertura resistente ao granizo for instalado.

Neste contexto, os donos de propriedades estão começando a entender a importância da instalação de sistemas de coberturas resistentes ao granizo.

No Brasil, problemas relacionados ao granizo substanciais, por exemplo, de acordo com reportagem do portal G1 de Santa Catarina de 16/10/2014, o município catarinense de Lajes, localizado a 228 km da capital Florianópolis deixou centenas de casas destelhadas após a chuva de granizo que atingiu a cidade em 13/10/2014 com duração de 20 minutos (PORTAL G1, 2014).

Desta forma, a ocorrência de um evento atmosférico como o granizo pode causar danos em diversas áreas como: financeira, habitação, serviços públicos etc.

Portanto, de acordo com Motta (1997), todo empreendimento a ser implementado precisa passar por uma análise para determinar sua viabilidade, ou seja, se o investimento aplicado trará algum retorno real para o investidor, ou seja, se o produto elaborado cumprirá com as exigências do meio em que está inserido.

## 2.5 HISTÓRICOS DE CHUVAS DE GRANIZO NO BRASIL E REGIÃO SUL

De acordo com as informações disponibilizadas pelo site eletrônico da Defesa Civil do Brasil, é possível analisar com precisão se há um aumento de eventos atmosféricos extremos como as tempestades de granizo no Brasil.

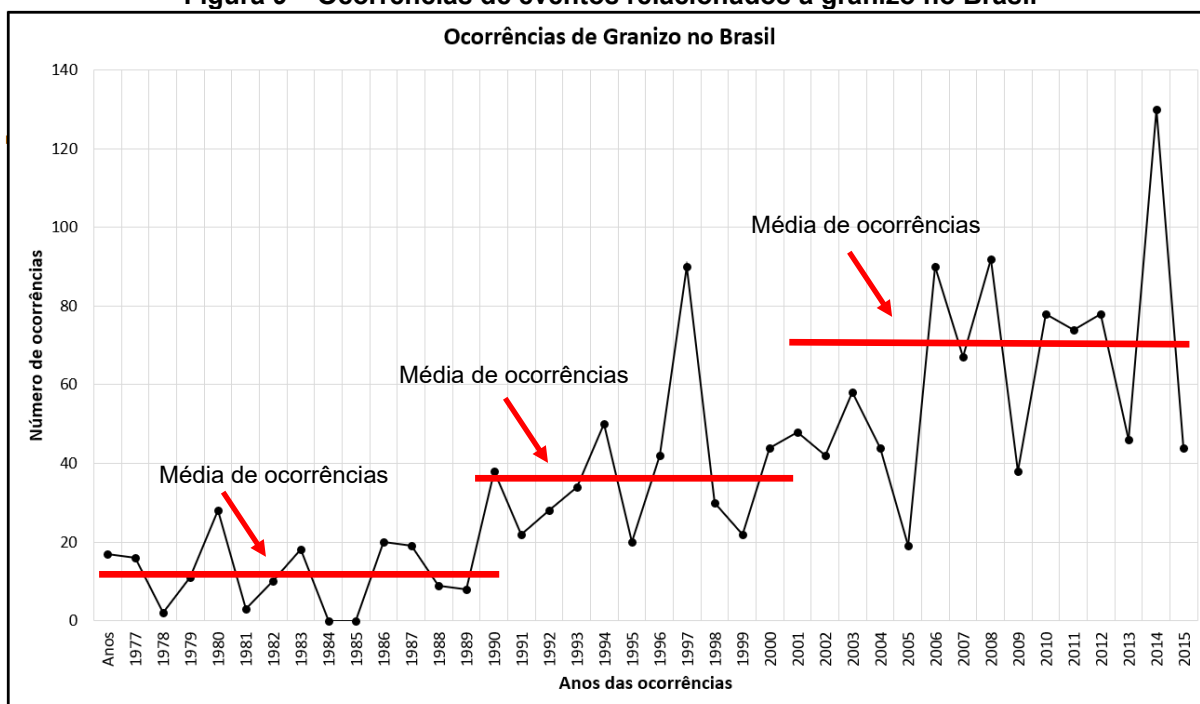
A pesquisa realizada no Sistema Integrado de Informações sobre Desastres da Defesa Civil do Brasil - S2ID (2020), possibilita a consulta de avaliação de danos (sigla AVADAN) referentes à tempestade local/conectiva – granizo em todo o Brasil.

De acordo com o S2ID (2020), seu banco de dados digital possui catalogados 711 casos de eventos de granizo entre os anos de 1997 e 2013. Catalogados também todos os eventos relacionados a chuvas de granizo compreendido entre os anos de 1981 e 2016. Para este intervalo de 35 anos, foi possível contabilizar 1742 eventos relacionados ao granizo.

Na Figura 9, pode ser observado que nos últimos 20 anos o aumento de eventos atmosféricos como chuvas de granizo mais que dobrou no Brasil.



**Figura 9 – Ocorrências de eventos relacionados a granizo no Brasil**



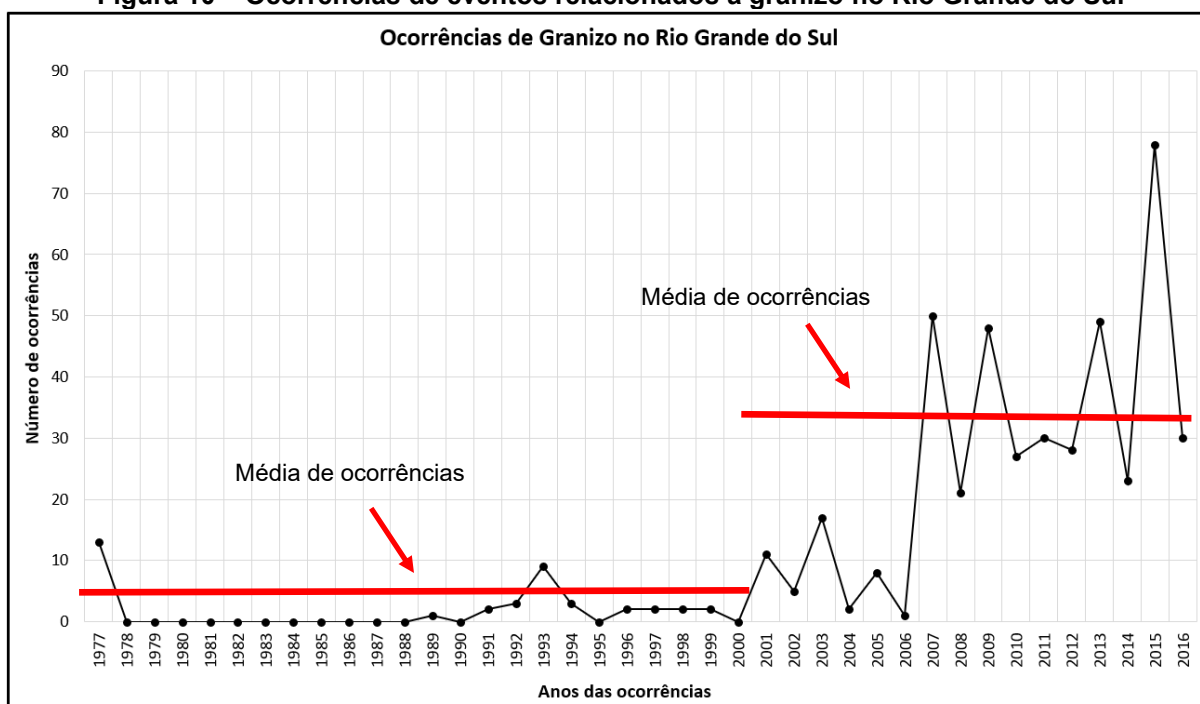
Fonte: Sistema Integrado de Informações sobre Desastres da Defesa Civil do Brasil (S2ID, 2020)

Dos 1742 eventos relacionados a chuvas de granizo, 539 ocorreram no estado do Paraná, 529 em Santa Catarina e 460 no estado do Rio Grande do Sul. Sendo assim, a região sul contabiliza 1528 eventos de um total de 1742 eventos relacionados. Isto representa aproximadamente 88% do total de eventos extremos relacionados a chuvas de granizo somente na região sul do Brasil.

Além disso, nas Figuras 10, 11 e 12 podem ser observados os aumentos expressivos de ocorrências nos últimos anos nos três estados da Região Sul do Brasil e, por consequência, também no Brasil.

Verifica-se que, na Figura 10 que no estado do Rio Grande do Sul houve um aumento de mais de 6 vezes de eventos registrados pela Defesa Civil do Brasil no decorrer dos últimos 20 anos.

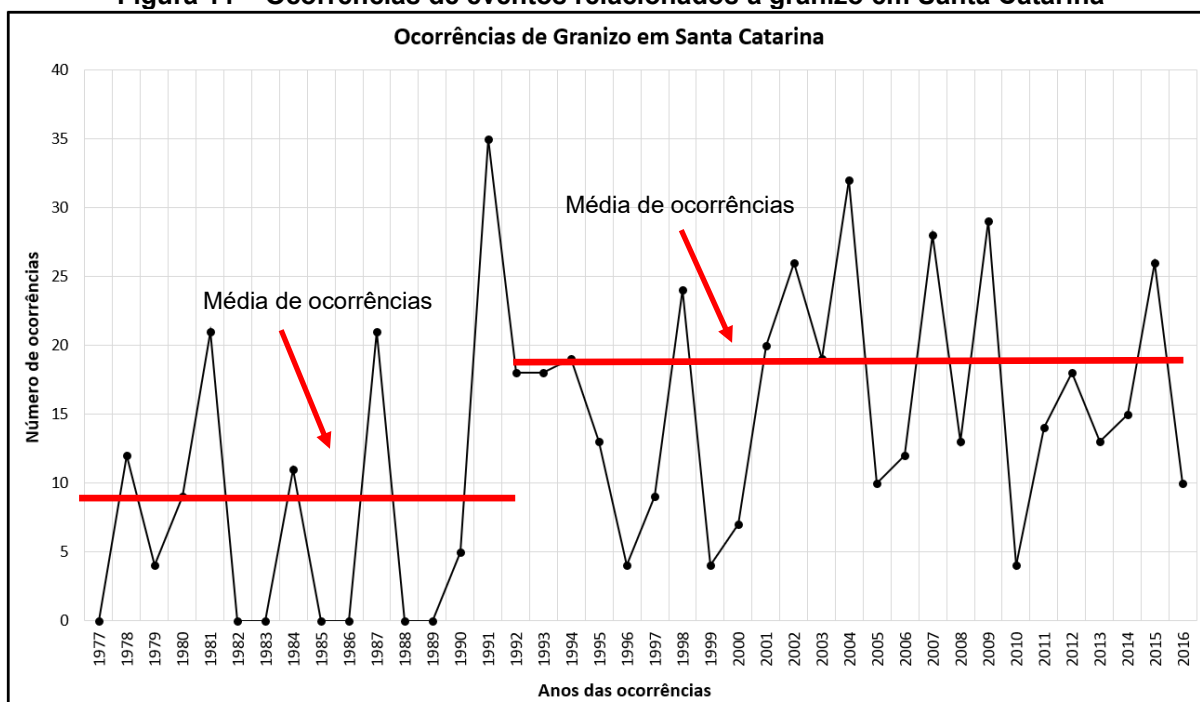
**Figura 10 – Ocorrências de eventos relacionados a granizo no Rio Grande do Sul**



Fonte: Sistema Integrado de Informações sobre Desastres da Defesa Civil do Brasil (S2ID, 2020)

Na Figura 11, referente ao Estado de Santa Catarina pode ser observado um comportamento padrão no decorrer dos anos, mas observa-se picos maiores de número de ocorrências nos últimos 20 anos evidenciando 2 vezes mais ocorrências nos últimos 20 anos.

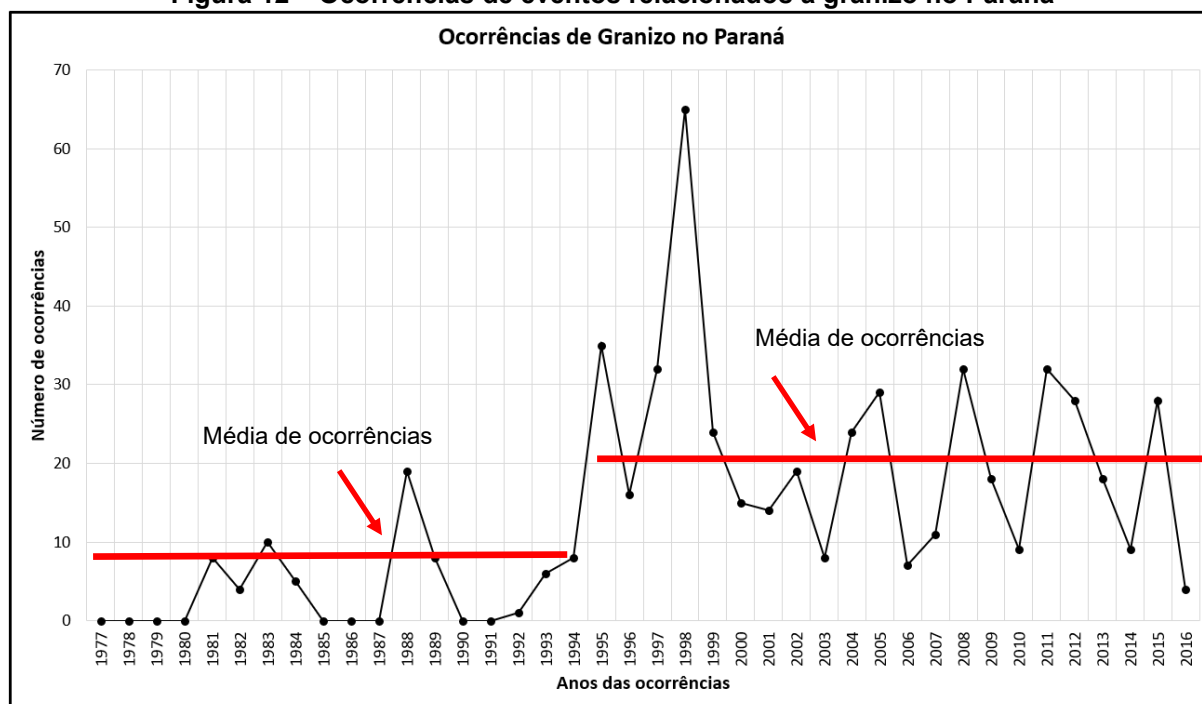
**Figura 11 – Ocorrências de eventos relacionados a granizo em Santa Catarina**



Fonte: Sistema Integrado de Informações sobre Desastres da Defesa Civil do Brasil (S2ID, 2020)

Na Figura 12, que representa os eventos de chuvas de granizo no Estado do Paraná, pode ser observada sua maior elevação a partir do ano de 1994 e a média 2 vezes superior nos últimos 20 anos.

**Figura 12 – Ocorrências de eventos relacionados a granizo no Paraná**



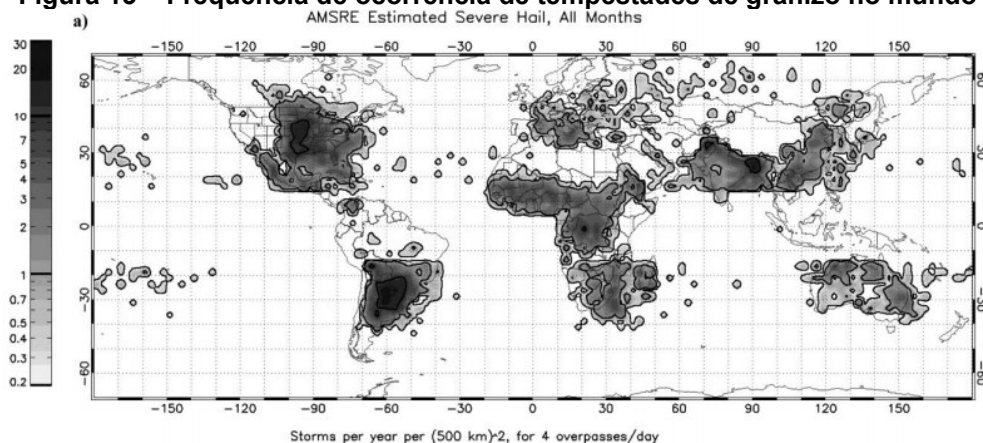
Fonte: Sistema Integrado de Informações sobre Desastres da Defesa Civil do Brasil (S2ID, 2020)

Além disso, nas últimas décadas, o fácil acesso a meio de comunicação e consequente registro das ocorrências é outro fator que pode ser considerado como aumento das ocorrências.

Em contrapartida, pode-se considerar também que, o número baixo de registros em período superior aos últimos 20 anos pode demonstrar que tais eventos aconteciam, mas poderiam não ser registrados, pois devido a tecnologia computacional atual as informações são computadas mais fácil e rapidamente.

Tal fato pode ser comprovado pelo trabalho de Cecil e Blankenship (2012), que desenvolveram um mapa global de locais que são susceptíveis a tempestades de granizo, conforme pode ser observado na Figura 13.

**Figura 13 – Frequência de ocorrência de tempestades de granizo no mundo**



**Fonte: Cecil e Blankenship (2012)**

Verifica-se que, nos subtropicais da América do Sul há um maior número de tempestades de granizo estimadas na climatologia do satélite estudado, com outras regiões ativas, incluindo os Estados Unidos, África tropical e subtropical e da Ásia nas regiões tropicais.

Esse aumento de tempestades severas deixa evidente a importância do estudo da resistência dos telhados a impactos múltiplos, principalmente as coberturas cerâmicas que são predominantemente utilizadas, e à ausência de manutenção neste sistema das edificações.

## 2.6 NORMATIZAÇÃO

A norma NBR 15575– Parte 01 (ABNT, 2013) recomenda prazos de vida útil de projeto de sistemas de coberturas para desempenho mínimo  $\geq 13$  anos e desempenho superior  $\geq 20$  anos. Os fabricantes de telhas cerâmicas divulgam que suas telhas possuem uma durabilidade mínima de 20 anos (ANICER, 2011).

Estudos feitos nos Estados Unidos, Canadá e Europa, com o objetivo de classificar os efeitos de impacto e consequente resistência ao granizo de sistemas de cobertura, fornece métodos de testes para quantificar essa resistência (CRENSHAW e KOONTZ, 2000), e normas específicas nos Estados Unidos, relacionadas ao assunto como ANSI/FM 4473; UL 2218; ASTM D3746).

Outro normativo técnico relevante é a norma NBR 15310 (ABNT, 2009) que estabelece requisitos e critérios dimensionais, físicos e mecânicos para telhas cerâmicas na execução de telhados e estabelece uma metodologia de ensaios.

De acordo com a norma NBR 15310 (ABNT, 2019), e suas referências normativas, os ensaios recomendados são os seguintes.

- **Limite de absorção de água** que consiste em verificar a quantidade que passou ou não de água através da telha, quando a telha é alocada durante um tempo específico a uma pressão contínua de água;

- **Planicidade e retilinearidade** que consistem em verificar possíveis abaulamentos que prejudiquem o encaixe das telhas;

- **Limites dimensionais** que verificam as dimensões básicas e o rendimento médio de cada tipo de telha;

- **Ensaio de carga de ruptura à flexão (ruptura a três pontos)** para verificar a resistência da telha quando submetida a esforços dinâmicos.

Existem também ensaios como potencial de eflorescência e existência de partículas reativas e coloração negro, potencial de resistência ao gelo/degelo e potencial de resistência a maresia (realizados pelo método da norma internacional).

Sendo assim, todos os normativos técnicos brasileiros, relacionados a telhados ou telhas, até 2013, não mencionavam ensaios sobre a análise do impacto múltiplo referente a ocorrências como chuvas de granizo.

A primeira norma técnica brasileira que menciona a determinação do nível de desempenho à ação do granizo é a norma NBR 15575 – Parte 05 em seu item 7.5 (ABNT, 2013).

O anexo C da norma NBR 15575 – Parte 05 (ABNT, 2013) descreve o princípio, aparelhagem, preparação e preservação das amostras e procedimentos para a simulação do granizo.

O procedimento refere-se ao abandono de uma esfera de aço de 25,4 mm de diâmetro lançada em queda livre com alturas e energias recomendadas pela norma que estão representadas na Tabela 3:

**Tabela 3 – Massa do corpo-duro, altura e energia do impacto**

<b>Percursor do impacto</b>	<b>m</b> g	<b>H</b> m	<b>E</b> J
		1,50	1,0 (M)
Corpo-duro (esfera de aço maciça)	65,6	2,30	1,5 (I)
		3,80	2,5 (S)

**Fonte: adaptado da NBR 15575:2013**

Através das recomendações da norma, verifica-se a dificuldade de se aplicar o ensaio no local da obra, pois os telhados possuem diferentes inclinações e, portanto, a sua aplicação no sentido perpendicular a telha acaba sendo comprometida.

Além disso, Teixeira (2017), declara em seu trabalho uma equivalência na utilização de esferas de aço para simular o granizo (gelo). Para uma altura de 1,5 m com uma esfera de aço de 25,4 mm de diâmetro será equivalente a uma “esfera de gelo” de 3,0 cm para atender o critério mínimo da Norma de Desempenho de Edificações – NBR 15575 (ABNT, 2013).

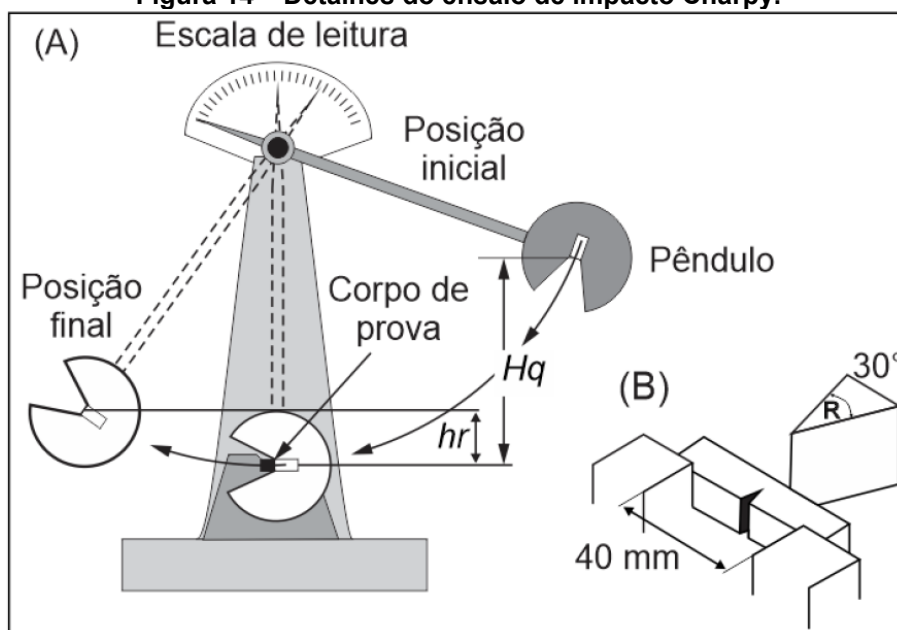
## 2.7 ENSAIOS DE IMPACTO

Para Garcia (2012), alguns materiais sofrem alterações em sua resistência quando atingidos por um impacto de alta velocidade pois, no momento do choque há concentração de tensões gerando pequenas fissuras internas, gerando um local de fragilidade no elemento. A presença de uma trinca, muda o comportamento do material.

Uma tipologia de ensaio que estuda as ocorrências de cargas dinâmicas é o ensaio de impacto que é usado para verificar como o material se comporta, pois no esforço de impacto, não é apenas o esforço aplicado que conta. Há o fator da aplicação do esforço associado com velocidade traduz-se em energia (GARCIA, 2012).

Dentre os ensaios normativos de impacto existentes, a norma NBR ISO 148-1 – Materiais metálicos – Ensaio de impacto por pêndulo Charpy (ABNT, 2021), determina o método de ensaio de impacto de Charpy que consiste em um procedimento que simula um impacto por um peso abandonado em oscilação ou em queda livre. O ensaio Charpy pode ser observado pela Figura 14.

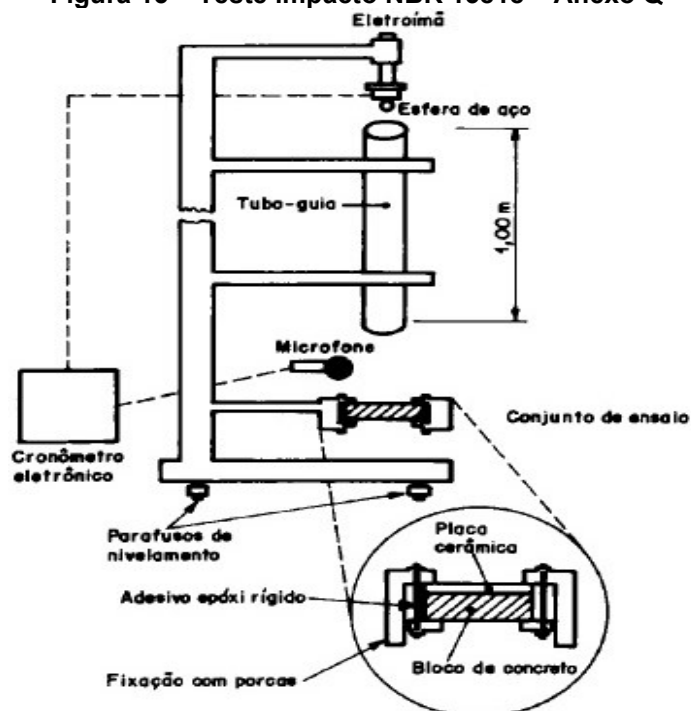
Figura 14 – Detalhes do ensaio de impacto Charpy.



Fonte: GARCIA; SPIM; SANTOS (2012)

Outro teste de impacto encontrado em pesquisas nacionais é o ensaio da norma NBR 13818 (ABNT, 1997) que consiste fundamentalmente em liberar uma esfera de aço (com peso e altura de lançamento conhecidos) e observar visualmente o dano ocorrido na peça. Na Figura 15, pode ser observado o aparelhamento do ensaio.

Figura 15 – Teste impacto NBR 13818 – Anexo Q



Fonte: NBR 13818 (1997)

Crenshaw e Koontz (2000), buscaram desenvolver uma metodologia de ensaio para determinar numericamente a resistência ao granizo dos sistemas de cobertura, mas tiveram dificuldade em identificar um método igualmente satisfatório para todos os materiais de cobertura.

Os métodos utilizando aço de vários diâmetros consistem na queda de alturas pré-determinadas, a fim de produzir impacto com a energia desempenhada por um granizo com o mesmo diâmetro (CRENSHAW e KOONTZ, 2000).

Nos últimos anos, a maior atenção tem sido dada ao impacto com esferas de gelo (HUTCHINSON e KOONTZ, 2009).

Entretanto, recomenda-se cautela na análise da efetiva resistência ao granizo dos materiais pois o aço possui características físicas distintas do gelo como dureza superficial e massa específica (GRAHAM, 2008).

Para Hutchinson e Koontz (2009), os danos provenientes de chuvas de granizo em telhados podem ocorrer por diversos fatores como diâmetro do granizo, tipo de material de cobertura, idade da cobertura, substrato sob a cobertura e temperatura da superfície no ponto de impacto.

## 2.8 VELOCIDADE DO GRANIZO

Para Silveira (2015), quando se observa um corpo caindo de alturas inferiores a menos de 50 m, fatores de resistência do ar são desprezados devido à baixa altitude. Para granizos, a análise muda, pois pedras de gelo caem de alturas de 5 km. Portanto, a análise da resistência do ar é significativa no estudo.

Com o objetivo de obter a velocidade máxima que o granizo chegará ao atingir as coberturas, Silveira (2015), demonstra que quando um objeto se movimenta dentro de um fluido, ele sofre duas forças de arrasto, uma relativa a viscosidade e outra inercial.

O número de Reynolds ( $Re$ ), leva em consideração a velocidade entre o fluido que atravessa e o tipo do material envolve o projétil, o dado mais relevante é a viscosidade do fluido (SILVEIRA, 2015). A Equação 1 pode ser observado como se obtém o número de Reynolds.



$$Re = \frac{\rho_F \cdot v \cdot l}{\mu_F}$$

Equação 1

onde:

$v$  é o módulo da velocidade do corpo em relação ao fluido

$l$  é a dimensão característica do corpo

$\rho_F$  é a densidade do fluido

$\mu_F$  é o coeficiente de viscosidade do fluido.

Para Silveira (2015), na situação de um corpo caindo no ar, com tamanho na ordem de centímetro, resulta a intensidade da força resistente à queda que é a força de arrasto inercial, dada pela Equação 2.

$$F_{arrasto} = \frac{C}{2} \cdot \rho_F \cdot A \cdot v_T^2$$

Equação 2

Como  $C$  é um coeficiente adimensional que depende da forma do corpo,  $A$  é a área do objeto que cai verticalmente à direção do movimento em relação ao solo e aceitando que a velocidade terminal seja na ordem de 10m/s,  $Re$  resulta em  $10^4$  e, portanto,  $C \approx 0,70$  (SILVEIRA, 2015).

Como a densidade do granizo  $\rho_C$  é  $9,1 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$  e a densidade do ar  $\rho_F$  em condições normais vale cerca de  $1,2 \text{ kg/m}^3$ , a expressão para o valor da velocidade máxima, para  $R$  (raio do material) em m, resulta na Equação 3.

$$v_T \approx 1,7 \times 10^2 \sqrt{R}$$

Equação 3

## 2.9 ENERGIA CINÉTICA DO GRANIZO

Quando um corpo cai e atinge a velocidade terminal  $v_T$ , sua energia cinética  $Ec$  em relação ao fluido alcança seu valor máximo conforme a Equação 4. (SILVEIRA, 2015).

$$Ec_{m\acute{a}x} = \frac{m \cdot v_T^2}{2}$$

Equação 4

Como  $m = \rho_c \cdot V = \rho_c \cdot 4 \cdot \pi \cdot R^3/3$  e substituindo a velocidade terminal calculada, obtém-se a energia cinética máxima do granizo onde  $R$  é raio da pedra.

O granizo se forma entre 3 km e 6 km de altura e o crescimento das pedras ocorre pelo fato de que elas são transportadas para o alto por correntes ascendentes de ar com velocidades até 180 km/h. No momento em que as correntes de ar ascendentes não são suficientes para sustentar o granizo, elas caem em direção ao solo (SILVEIRA, 2015).

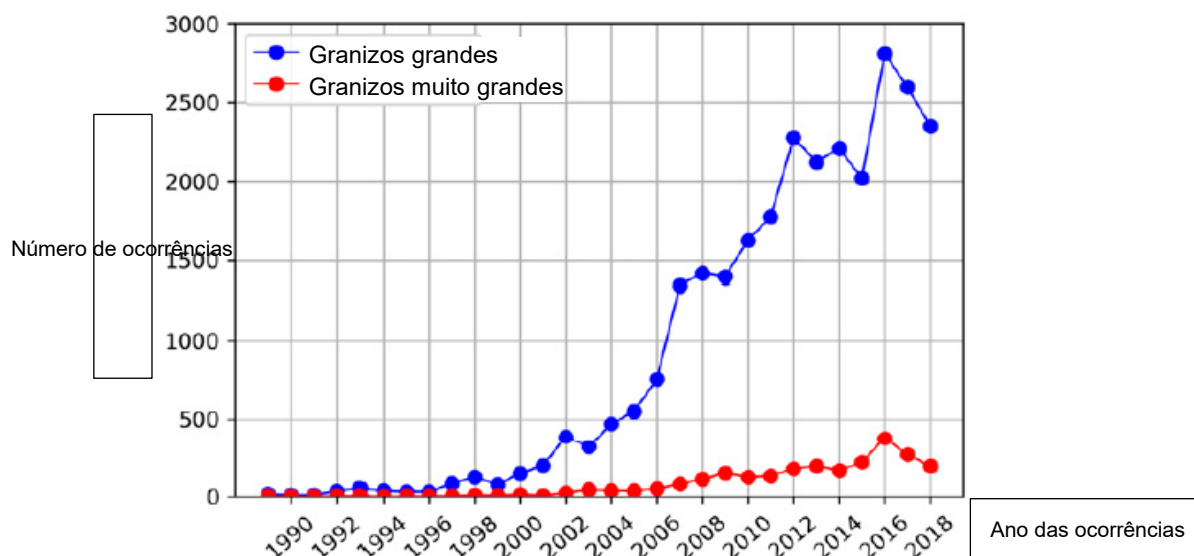
Conforme demonstrado, a queda de um objeto com extensão superior a mil metros é suficiente para que a velocidade máxima do objeto seja atingida.

## 2.10 ENSAIOS DE IMPACTO SIMULANDO GRANIZO

Segundo Saini e Shafei (2019), em várias partes do mundo, o desempenho dos telhados durante os eventos de tempestade de granizo são motivo de preocupação, não apenas para os proprietários, mas também para as indústrias de construção e seguros. Isso ocorre porque um telhado é considerado como a primeira linha de defesa, cuja falha pode expor todo o edifício a condições de exposição inesperadas.

Para Saini e Shafei (2019), as tempestades de granizo são comprovadamente capazes de causar danos extensos aos telhados. Além disso, as pedras de granizo têm uma ampla variedade de diâmetros, que podem exceder 45 mm.

De acordo com Pucik *et al.* (2019), o número anual de relatórios de granizo grandes e muito grandes (Figura 16) mostra um aumento acentuado no período de 30 anos entre 1989 e 2018. O número anual de relatórios de granizo de grande porte triplicou, de 750 relatórios em 2006 para 2400 relatórios em 2018. Desde 2012, o número de ocorrências excede 2000 eventos, enquanto antes do ano de 2000, nunca chegou a 100. Um padrão semelhante é visível para relatórios de granizo muito grandes.

**Figura 16 – Gráficos do número de ocorrências de granizo por ano.**

Fonte: Pucik *et al.*, 2019

Para Uz e Yaldiz (2020), os danos provenientes de de granizo representaram 34% de perdas econômicas causadas por eventos naturais extremos na Austrália, entre 1967 e 2003 e há previsão de aumento do granizo, pois as mudanças climáticas podem piorar seus efeitos.

Neste contexto, é possível perceber que os eventos externos relacionados a chuvas de granizo estão aumentando em todas as regiões do mundo, provocando danos a seguradoras, população, órgãos públicos e economia.

Para Perera *et al.* (2018), o processo de impacto de um objeto sólido pode ser resolvido em efeitos localizados que são controlados pela força de contato e pelos efeitos impulsivos caracterizados pela demanda de deflexão global do impacto.

As previsões da ação preventiva representam um espaço em branco de conhecimento e informações a tais propriedades e só podem ser obtidas experimentalmente, e tais experimentos precisariam ser repetidos para permitir variabilidade entre as amostras (PERERA *et al.*, 2018).

Foram estabelecidas algumas normas internacionais que prescrevem procedimentos experimentais para a capacidade de avaliação de materiais de cobertura para suportar o impacto do granizo. Por exemplo, a norma FM 4473 (ANSI, 2011) é um padrão para teste de resistência ao impacto de materiais rígidos de cobertura que especifica requisitos detalhados dos protocolos de teste e relatório, mas não há requisitos para interpretar a mecânica do dano (ANSI, 2011).

A documentação das observações de experimentos de impacto é limitada a critérios de aprovação/reprovação que possuem base na descrição qualitativa de danos, como fissuras, fraturas ou amassados (ANSI, 2011; FLUELER, 2008; MARSHALL *et al.* 2004).

Greenfeld (1969), foi um dos primeiros a testar esferas de gelo em teste de impacto em telhados construídos nos EUA e publicar seus resultados. Ele utilizou uma pistola de ar comprimido para lançar vários tamanhos esferas de gelo em um alvo a certas velocidades terminais.

Dois tipos de lançadores mecânicos foram utilizados no estudo. Esferas de gelo com 2,5 cm e 3,2 cm de diâmetro foram propelidas com um dispositivo mecânico construído semelhante à arma de um mergulhador que utilizava tubos de borracha perpendicular à amostra com um cronógrafo fixado na extremidade frontal que media a velocidade da esfera de gelo no ar. Na Figura 17, pode ser observado o protótipo do ensaio na época.

**Figura 17 – Protótipo de ensaio para esferas de gelo**



**Fonte: Pucik *et al.*, 2019**

O processo de impacto de um objeto sólido pode ser resolvido em efeitos locais, que são controlados pelo esforço de contato e nos efeitos impulsivos, caracterizados pela demanda de deflexão global do impacto (PERERA *et al.*, 2018).

Para Anghileri *et al.*, 2005, a utilização de *softwares* sofisticados de elementos finitos para análise e simulação de ações de impacto de granizo trazem incertezas sobre qual modelo de material selecionado e como a análise de elementos finitos vai especificar os parâmetros de rigidez dinâmica da pedra de granizo e a estrutura-alvo.

Um dos principais problemas com a modelagem de elementos finitos de granizo é que a execução de diferentes modelagens de material na análise de elementos finitos pode fornecer resultados diferentes (ANGHILERI *et al.*, 2005).

O normativo técnico FM 4473 (ANSI, 2011), descreve procedimentos experimentais para avaliar o impacto sofrido de materiais de cobertura, que é um padrão de teste de resistência ao impacto para materiais rígidos de cobertura (ANSI, 2011).

A documentação das observações dos experimentos de impacto limita-se aos critérios de aprovação / reprovação, com base na descrição qualitativa de danos, como trincas, rompimento ou mossas (ANSI, 2011; FLUELER 2008; MARSHALL *et al.*, 2004).

As informações registradas nos testes de protótipo têm sido muito restritivas, pois são específicas para o cenário de impacto e para a amostra-alvo empregada na configuração do teste. Não é aconselhável generalizar os resultados registrados em experiências físicas. As limitações das atuais metodologias de avaliação descritas são os principais obstáculos ao desenvolvimento de uma estratégia eficaz e confiável para mitigar os danos.

A norma internacional FM 4473 (ANSI, 2011), possui o seguinte protocolo de testes.

- 1) As amostras de teste são montadas em um painel de teste de no mínimo 1,2 m x 1,2 m, simulando aplicações de campo reais e montadas com segurança no dispositivo de teste;
- 2) As amostras de teste devem ser condicionadas entre 15,6 °C e 32,2 °C por um período de tempo suficiente para atingir o equilíbrio térmico;
- 3) Preparação de amostras de esferas de gelo feitas de água destilada de 31,8 mm, 38,1 mm, 44,5 mm e 50,8 mm de diâmetro são colocadas em um freezer a uma temperatura controlada de  $-22^{\circ} \pm 4^{\circ}\text{C}$ .;
- 4) Todas as esferas de gelo aceitáveis estarão livres de rachaduras e bolhas de ar e atenderão aos seguintes critérios dentro de 0 e +10% dos valores listados no Tabela 4.

Tabela 4 – Diâmetro e massas das esferas de gelo

<i>Diâmetro em (mm)</i>	<i>Massa em gramas (g)</i>
31,8	15,30
38,1	26,50
44,5	42,10
50,8	62,90

Fonte: FM 4473 (ANSI, 2011)

- Condições de teste

Manter a temperatura da área de teste entre 15,6 °C e 32,2°C.

Uma velocidade conservadora para o granizo causado pelo vento é mostrada no Tabela 5. Calibre a velocidade do lançador de esferas de gelo para atingir a faixa de energia cinética de impacto mostrada na Tabela 5 (entre *Target Kinetic Energy* e *Target Kinetic Energy + 10%*).

Os limiares materiais de dano podem ser obtidos aumentando o tamanho da esfera de gelo conforme demonstra a Tabela 5.

Tabela 5 – Velocidades das esferas de gelo

Classe	Diâmetro (mm)	Velocidade (m/s)	Velocidade (km/h)	Energia Cinética	
				Objetivo (J)	+10% (J)
1	31,8	32,08	115,48	7,89	8,68
2	38,1	32,08	115,48	13,63	15,00
3	44,5	32,08	115,48	21,65	23,84
4	50,8	32,08	115,48	32,20	35,50

Fonte: FM 4473 (ANSI, 2011)

Calcula-se a energia cinética da esfera de gelo lançada usando a Equação 5.

$$E_{c_{máx}} = \frac{m \cdot v_T^2}{2}$$

Equação 5

Onde:

$E_c$  = energia cinética da esfera de gelo

$m$  = massa da esfera de gelo

$v$  = velocidade do vento da esfera de gelo

### 2.10.1 ENSAIO

- 1) Posicione o conjunto de amostra / parede verticalmente contra a estrutura de reação e prenda com firmeza;
- 2) Posicione o iniciador da esfera de gelo e o conjunto de teste para garantir que a trajetória da esfera de gelo seja perpendicular ( $90^\circ \pm 5^\circ\text{F}$ ) ao painel de teste (veja a Figura 18);

**Figura 18 – Equipamento de ensaio FM 4473 (ANSI, 2011)**



**Fonte: FM 4473 (ANSI, 2011)**

- 3) Determine os locais de impacto-alvo que são particularmente sensíveis ao impacto podendo danificar e impactar as amostras nesses locais;
- 4) Posicione o medidor de velocidade de modo que a velocidade da esfera de gelo seja medida entre o lançador e a amostra de teste. As esferas de gelo devem sair do velocímetro a menos de 1,5 m do local de destino;
- 5) Lance uma esfera de gelo em um ponto de impacto alvo com base no exame de vulnerabilidade. O teste deve ser realizado a partir da menor esfera de gelo desejada, com um mínimo de três impactos;
- 6) Prosseguir com o aumento do tamanho das esferas de granizo até que ocorra "dano reparável" ou "falha";
- 7) Nove impactos adicionais devem ser feitos para validar a classificação "reparável". A falha na validação dessa classificação exige nove impactos adicionais da esfera de granizo do tamanho anterior;

- 8) Cada alvo deve ser impactado com duas esferas de granizo de tamanho diferente, para uma quantidade mínima de doze impactos por tamanho;
- 9) O espaçamento de impacto deve aproximar-se 25,4 mm de distância em locais separados por tamanho;
- 10) Os locais de impacto devem incluir, entre outros, arestas, cantos, áreas não suportadas, sobreposições e juntas;
- 11) A borda externa da esfera de gelo não deve estar mais próxima do que 6,4 mm da borda da amostra;
- 12) Forneça no mínimo 152 mm de distância entre locais de impacto, para que os efeitos de cada local de impacto sejam independentes;
- 13) Impactos que não atinjam ou superem a velocidade exigida devem ser repetidos, até que um total de doze impactos, dentro dos limites de velocidade e energia cinética, sejam alcançados;
- 14) A esfera de gelo deve impactar a amostra dentro de 60 segundos após a remoção do recipiente de armazenamento;
- 15) Após o teste de impacto, inspecione visualmente o topo e a região inferior do corpo de prova;
- 16) Registre qualquer dano à amostra quanto a indentações, rachaduras, perfurações, fraturas, cavacos, desengate dos elementos da volta, etc.

O critério de aprovação definido pela norma internacional possui um protocolo em três níveis, aprovado, reparável ou falha.

**Aprovado:** O corpo de prova não deve mostrar evidência de rachaduras ou rupturas visíveis ou qualquer dano, como fendas, perfurações, fraturas, lascas, desengate dos elementos das voltas ou exposição de materiais não pretendidos.

**Reparável:** Amostras com lascas ou lascas com menos de 6,35 mm de diâmetro ou mossas com menos de 12,7 mm de profundidade são consideradas reparáveis.

**Falha:** Quando uma amostra de teste não atende aos critérios de reparo, uma segunda amostra deve ser testada. A falha final será considerada se a segunda amostra não atender aos critérios de aprovação / reparo.

Flüeler *et al.* (2008), publicaram um estudo demonstrando que as esferas de aço não apresentam resultados assertivos em testes de impacto para simulação de granizo, pois o gelo tende a se fraturar enquanto o aço é um material com uma alta



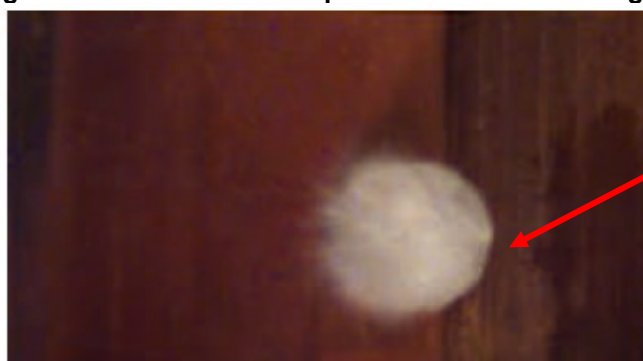
dureza e a sua transferência de esforços muda o desempenho e a configuração de impacto nas coberturas.

Para Flüeler *et al.* (2008), a energia de impacto da queda de uma esfera de aço pode ser calculada para igualar à energia cinética do gelo na forma de granizo. No entanto, como a pesquisa mostrou, métodos que empregam uma esfera de aço nem sempre refletem uma descrição precisa de uma cobertura de telhas submetida ao granizo e a sua capacidade de resistência.

Por que algumas coberturas e sistemas falham quando impactados com aço versus gelo? – a resposta é relativamente simples. As esferas de gelo se destroem após o impacto com uma superfície mais dura (telhas cerâmicas ou concreto) por exemplo (FLÜELER *et al.*, 2008).

A Figura 19 mostra uma esfera de gelo no momento do impacto com uma telha de concreto. É visto o início do esmagamento do gelo na superfície da esfera.

**Figura 19 – Momento do impacto de uma esfera de gelo**



**Fonte: Flüeler *et al.*, 2008**

Para Flüeler *et al.* (2008), quando projéteis de aço são usados, deve-se observar que o aço possui rigidez cerca de 8 vezes maior que o gelo, podendo resultar em uma fissuração na telha. O momento do impacto de um projétil de aço sobre uma telha de concreto é demonstrado na Figura 20.

**Figura 20 – Momento do impacto de uma esfera de aço**



Fonte: Flüeler *et al.*, 2008

Ambos os projéteis de gelo e aço atingiram as telhas com a mesma energia de impacto, portanto, a falha de impacto com aço não reflete com exatidão o dano da telha em relação ao impacto da esfera de gelo (FLÜELER *et al.*, 2008).

Para Flüeler *et al.* (2008), os métodos de teste atuais disponíveis para as telhas e as certificações de resistência ao granizo não funcionarão em todos os telhados e coberturas. Abaixo são listados algumas considerações a serem observadas.

- ✓ Alguns métodos de teste representam uma medida ineficaz de uma capacidade de campo de membranas para suportar granizo;
- ✓ A temperatura, no momento do impacto, afetará os resultados das membranas;
- ✓ A resistência coberturas muda com o envelhecimento;
- ✓ Os danos internos nem sempre são aparentes na superfície de sistemas betuminosos. Com a separação da membrana pode ser necessário avaliar os danos internos do produto;
- ✓ Os fabricantes podem enfrentar uma responsabilidade potencial quando os produtos falham como resultado do tamanho das pedras de granizo relatadas como sendo inferiores aos requisitos. Graham (2008) advertiu fabricantes, projetistas de sistemas de telhado e empreiteiros no sentido de deturpar o desempenho dos sistemas de telhado durante granizo;
- ✓ Como os códigos de construção são uma consideração ao discutir falhas no telhado, parece que as organizações precisam definir claramente qual teste ou método se faz necessário para cada cobertura ou membrana; ou listar quais métodos de teste espelham resultados equivalentes para que uma comparação equitativa seja alcançado;

✓ Para Graham (2008), dos procedimentos de análise atuais, FM 4473 e NBS Series 23 são os mais realistas como testes de resistência ao granizo para todos os telhados e coberturas. As deficiências dos dois procedimentos de teste são temperatura no momento do impacto e métodos de exame;

✓ Resultados obtidos em testes de esferas de aço como indicadores de resistência ao granizo não é aplicável. Enquanto que as esferas de gelo são a simulação mais próxima do granizo, mas não deve considerá-las como uma replicação exata;

✓ Proprietários, consultores e fabricantes de edifícios devem avaliar cuidadosamente uma resistência de granizo dos produtos antes de considerar seu uso em áreas propensas a granizo. Produtos com as certificações podem não funcionar como representadas, pois temperatura e, em alguns casos, o envelhecimento não fazem parte do procedimento de teste no qual a certificação foi baseada (FLÜELER *et al.*, 2008).

## 2.11 ANÁLISE DE VARIÂNCIA E DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA NORMAL

De acordo com os pesquisadores Stahle e Wold (1989), a análise de variância (ANOVA) é um procedimento estatístico que decide se o valor médio de dois ou mais grupos é diferente.

A análise de variância (ANOVA) é um exame estatístico usado com mais frequência em pesquisas quantitativas. Uma pesquisa publicada em *Language Learning and Studies in Second Language Acquisition*, demonstrou que 56% dos quantitativos utilizaram ANOVA (PLONSKY, 2013).

Para Plonsky (2014), a confiança na ANOVA parece estar crescendo ainda mais forte nos últimos anos, ultrapassando os aumentos em outras análises.

A ANOVA usa uma distribuição de probabilidade (valor-p) que é a probabilidade de obter os resultados observados de uma série de dados obtidos. O valor p significa a probabilidade, supondo que a hipótese nula  $H_0$  esteja correta enquanto  $H_1$  é a hipótese alternativa enquanto o valor-p é utilizado como opção de rejeição de  $H_0$ , de acordo com a comparação dos resultados com o nível de significância (WASSERSTEIN e LAZAR, 2016).

Wasserstein e Lazar (2016), afirmam que a ANOVA unilateral é um tipo de ANOVA usado como um filtro F para ajudar a medir o impacto de uma variável na análise dos dados.

A ANOVA unilateral provou sua eficácia na solução do problema de alta dimensionalidade no espaço de recursos (Elssied *et al.*, 2014; Grünauer e Vincze, 2015).

Para Alassaf e Qamar (2020), decisão de recursos relevantes usando ANOVA requer a determinação do limite no qual cada recurso é avaliado individualmente em termos de correlação com as classes.

O uso de ANOVA com teste F ajuda a medir o impacto de uma variável em uma classe-alvo. Consequentemente, cada recurso terá um valor F e um valor-p como uma pontuação ou peso. De acordo com a pontuação calculada, as características relevantes serão demonstradas (ALASSAF e QAMAR, 2020).

Quanto maior o valor F mais significativa é a variável analisada e um valor-p baixo (menor que o nível de significância de 5% por exemplo) será reconhecido como um recurso relevante (GRÜNAUER e VINCZE, 2015).

Por outro lado, alguns estudos usaram somente o valor-p para determinar as características significativas das classes-alvo (ELSSIED *et al.*, 2014).

De acordo com Souza (2019), a distribuição normal é caracterizada pelo conhecimento da média e desvio padrão de uma população onde, a média de uma população  $\pm$  uma unidade do seu desvio padrão tem-se o ponto de inflexão da curva normal e a área sob este gráfico representa 68% dos dados amostrais.

Aumentando para  $\pm 1,96$  unidades do desvio padrão da população temos um percentual de 95% dos dados amostrais.

## 2.12 TESTE T DE STUDENT

Para Whitley e Ball (2002), o teste t de Student é uma das técnicas estatísticas mais populares usadas para testar se a diferença média entre dois grupos é estatisticamente significativa. A hipótese nula afirma que ambas as médias são estatisticamente iguais, enquanto a hipótese alternativa afirma as médias não são estatisticamente iguais.

De acordo com Manghi *et al.* (2016), os modelos de classes de distribuições simétricas permitem reduzir a influência de dados discrepantes, incorporando parâmetros adicionais que ajustam a curtose da distribuição dos dados.

Neste contexto, o teste t de uma amostra é um procedimento estatístico usado para determinar se o valor médio de uma amostra é estatisticamente igual ou diferente com o valor médio de sua população original da qual a amostra foi retirada.

Para MISHRA *et al.* (2019), o teste t de Student e ANOVAs são os métodos estatísticos mais utilizados para analisar os dados e suas similaridades são que a variável dependente deve estar em escala contínua normalmente distribuída, e as comparações são feitas entre as médias.

Quando o tamanho da amostra é pequeno, a média é muito afetada pelos outliers, portanto, é necessário manter o tamanho da amostra suficiente ao usar esses métodos (MISHRA *et al.*, 2019).

De acordo com Whitley e Ball (2002), o teste t de *Student* é uma das técnicas estatísticas mais usadas para testar se a diferença média entre dois grupos é estatisticamente significativa.

De acordo com Wasserstein e Lazar (2016), o valor de P é utilizado como opção de rejeição da hipótese nula, de acordo com a comparação dos resultados com o nível de significância.

## 2.13 CRITÉRIO DE CHAUVENET

Para Lin e Sherman (2007), o critério de Chauvenet utiliza a média, o desvio padrão e o tamanho conhecido de uma amostra de dados, para definir se um valor medido é aceitável ou não, admitindo que tal amostra é retirada de acordo com uma distribuição normal (Lin e Sherman, 2007).

O critério de Chauvenet pode ser definido como se  $|x_i - \mu| \sigma > R$ , rejeite  $x_i$ , em que R é o valor tabelado pelo critério de Chauvenet para a quantidade de amostras utilizadas (LIN e SHERMAN, 2007).

## 2.14 ANÁLISE ESTATÍSTICA POR REGRESSÃO LINEAR

A regressão linear é um procedimento estatístico que estuda a relação entre variáveis de determinado conjunto de dados que irão agregar informações e dados para a obtenção de um resultado à sua variável de pesquisa (DANTAS, 1998).

Estas variáveis independentes, através de processos matemáticos, se referem à sua correlação entre as variáveis e a sua importância na determinação dos resultados de sua pesquisa de dados (DANTAS, 1998).

Para Kutner (2005), a regressão linear múltipla, ao contrário da regressão linear simples que modela apenas uma variável de destino, é possível estabelecer várias correlações linear entre várias variáveis explicativas e uma variável de destino.

Neste contexto, nem todas as variáveis poderão influenciar na determinação dos resultados do seu objeto de estudo, o fundamental é saber observar o fenômeno estudado e analisar as possíveis variáveis que possam ter relação com o seu objetivo (variável dependente).

Além disso, a normalidade da distribuição dos resíduos deve ser investigada pela construção de um gráfico de probabilidade normal. Se a distribuição for normal, os pontos no gráfico seguirão aproximadamente uma linha reta (JEON; SHAFIEEZADEH; DESROCHES, 2014).

A regressão linear múltipla é implementada de forma gradual, onde as variáveis independentes são testadas no modelo com base em sua significância até que um modelo estatístico coerente seja encontrado. (JEON, SHAFIEEZADEH; DESROCHES, 2014).

De acordo com Pires e Branco (2007), Outliers são as observações que se situam mais distantes da maior parte dos elementos que geram imprecisões se podem ou não ter sido geradas pelo modelo estatístico fim de explicar a maioria dos dados amostrais.

Um modelo de regressão múltipla (MLR) deve ser analisado examinando os gráficos de dispersão dos resíduos em comparação com os valores ajustados e com a variável independente. Se os diagramas de dispersão não exibem nenhum padrão sistemático, o modelo MLR é apropriado (JEON; SHAFIEEZADEH; DESROCHES, 2014).

Assim, o objetivo principal deste método de regressão é encontrar variáveis independentes significativas entre as variáveis candidatas que influenciam uma

variável dependente usando a análise de variância e teste dos valores de F que convencionalmente é utilizado 0,05 (5%) ou menos. (JEON, SHAFIEEZADEH; DESROCHES, 2014).

Variáveis utilizadas no modelo de regressão linear múltipla como carga de ruptura à flexão, nº de impactos, local da queda do granizo na telha são fundamentais na determinação do diâmetro do granizo que poderá danificar o telhado (TEIXEIRA, 2017).

Teixeira (2017), realizou um estudo sobre o efeito do impacto em telhas novas por regressão linear múltipla que contemplava telhas de fibrocimento, cerâmicas e concreto com utilização de esferas de aço e relacionando características como absorção, carga de ruptura na flexão e espessura.

O modelo de regressão linear múltipla serve para explicar a variação da variável de estudo (Y) em função das várias variáveis independentes (X) (DANTAS, 1998). A Equação 6 pode ser observada a forma genérica do modelo de regressão.

$$Y = a + bX^1 + cX^2 + \dots + \xi \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

Y: Variável dependente;

X<sup>i</sup>: Variável independente;

a, b, c, d...: Parâmetro de população;

ξ: Erros aleatórios do modelo.

De acordo com Dantas (1998), no modelo de regressão linear devem ser testados:

- ✓ Micronumerosidade: Número de dados efetivamente utilizados para cada variável, de modo a evitar que apenas um dado informado de determinada variável seja o responsável pela sua importância no modelo estatístico;
- ✓ Normalidade: Uma das distribuições que explicam a variação de uma população, pois parte das “populações” de dados pesquisadas ou ensaiadas possui uma distribuição normal;
- ✓ Homocedasticidade: Verificação da distribuição dos resíduos dos dados de uma população com característica de uma distribuição homogênea;

- ✓ Multicolinearidade: Relação entre variáveis com relações lineares predominantemente exatas;
- ✓ Significância: Verificação da qualidade da variável e se deve ser aceita ou não no modelo de regressão;
- ✓ Coeficiente de determinação: Demonstra a equação linear que seja aderente ao conjunto de dados da amostra;
- ✓ Coeficiente de correlação: demonstra o peso na relação de causa e efeito entre variação da variável dependente e variáveis independentes.



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento da pesquisa demonstrando como as telhas foram coletadas, o equipamento desenvolvido, os critérios de amostragem e procedimento experimental.

#### 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais utilizados foram 50 amostras de telhas para cada idade de 0, 5, 25, 30, 34, 45 e 50 anos com o objetivo de obter dados para a análise estatística dos ensaios de impacto, absorção e carga de ruptura à flexão das telhas cerâmicas francesas.

Na Figura 21, podem ser observadas as telhas ensaiadas que ficaram acondicionadas no Laboratório de Materiais de Construção Civil da UTFPR até a data dos ensaios.

**Figura 21 – Materiais utilizados**



**Fonte: autor**

A idade das telhas foi obtida através de prospecção em diversos imóveis reais que tiveram suas telhas removidas na cidade de Curitiba e região metropolitana no estado do Paraná onde foram coletadas 50 telhas de cada idade.

As amostras das telhas foram obtidas através de proprietários de imóveis que permitiram a retirada e/ou troca de 50 telhas usadas para serem usadas buscando caracterizar aleatoriedade. O critério estipulado para idade das telhas foi um intervalo de até 10 anos a fim de verificar as variações de resistência no período estipulado.

As idades das telhas foram obtidas por depoimentos verbais dos próprios moradores dos imóveis e/ou comprovação via imagens aéreas (Google Earth) onde foi possível verificar a presença ou não (pela data) das telhas no imóvel.

A Figura 22 exemplifica esta constatação. Na Figura 22a, pode ser observada a imagem atual de uma cobertura em 2020 e, na Figura 22b, se verifica o primeiro ano de existência do telhado, considerando a data de dezembro de 2015, e a Figura 22c demonstra que, em 2014, não havia a guarita no local.

**Figura 22 – Imagens do telhado da guarita obtidas através do Google Earth**



**22a – Cobertura em 2020**  
Fonte: Autor (2020)



**22b – Cobertura em 2015**  
Fonte: Google (2021)

**Figura 22c – Sem cobertura em 2014**

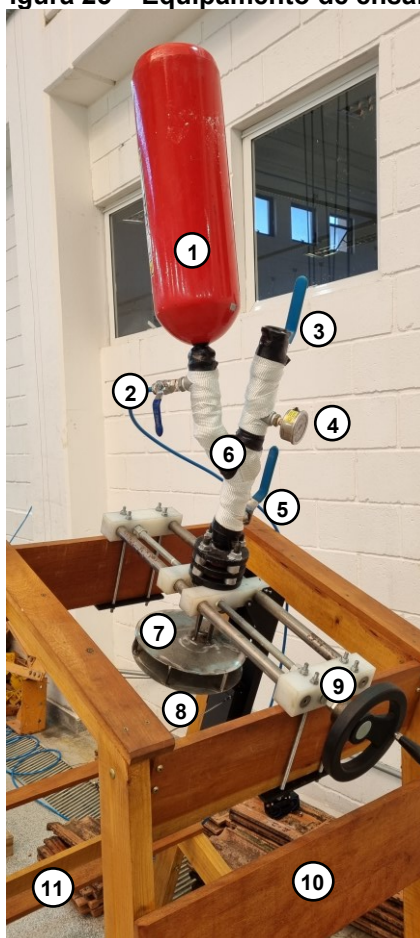


**22c – Sem cobertura em 2014**  
Fonte: Google (2021)

### 3.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Foi projetado e executado um equipamento capaz de promover lançamentos de esferas de gelo de até 4,5 cm de diâmetro equivalente simulando o fenômeno de granizo. O equipamento utilizado para execução dos ensaios foi a estrutura que pode ser observada na Figura 23.

**Figura 23 – Equipamento de ensaio**



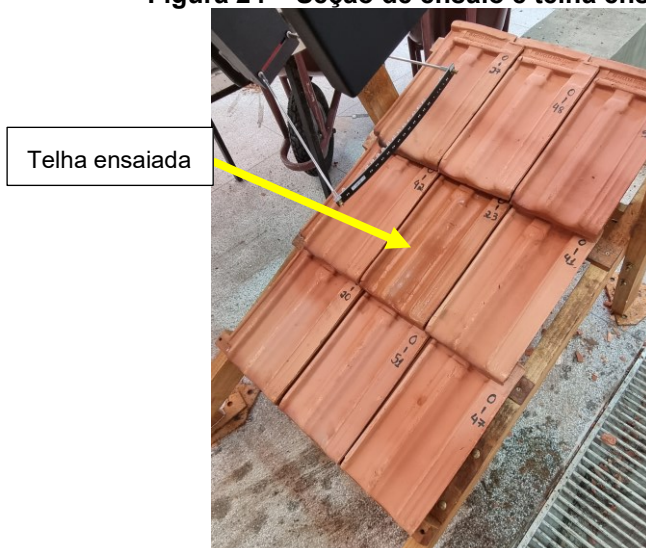
Fonte: autor

O equipamento possuía os seguintes componentes:

1. Câmara de armazenamento de ar comprimido;
2. Válvula para carregamento de ar comprimido;
3. Válvula para carregamento da esfera ao sistema;
4. Barômetro (medidor de pressão do lançador);
5. Válvula de lançamento da esfera de gelo;
6. Câmara de armazenamento de ar comprimido;
7. Sistema de absorção da nuvem de ar comprimido;
8. Cronógrafo (para medição das velocidades de impacto);
9. Sistema suporte do lançador com mecanismos de movimentos verticais e horizontais;
10. Estrutura de madeira para fixação do lançador;
11. Suporte para fixação de nove telhas (simulando comportamento real).

Todo equipamento foi fixado em uma estrutura de madeira que contemplava exatamente a forma de colocação das telhas em um telhado com estrutura de madeira. O total de telhas na seção do telhado foram nove unidades, sendo a telha impactada a da posição central, conforme Figura 24.

**Figura 24 – Seção de ensaio e telha ensaiada**



**Fonte: autor**

### 3.3 METODOLOGIA

Para o lançamento das esferas procedeu-se da seguinte forma.

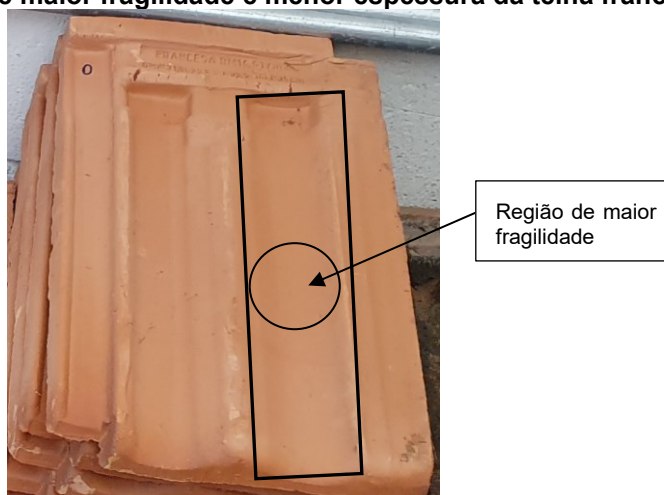
- 1º - Válvula de saída fechada (05) e a válvula de entrada aberta (03).
- 2º - Pesou-se a esfera de gelo e, posteriormente, inseriu-a na tubulação (06)
- 3º - Fechou-se a válvula de entrada (3) e carregou-se o reservatório de ar comprimido (01) e tubulação de lançamento (06) até 4 bar aproximadamente através da válvula de alimentação de ar comprimido (02).
- 4º - Abriu-se a válvula de saída (05) e lançou-se da esfera de gelo na amostra.
- 5º - Leu-se da velocidade no cronógrafo (08)
- 6º - Verificou-se visualmente o estado da telha

Foram realizados testes preliminares de impacto constante em diversos locais das telhas. Os resultados experimentais demonstraram que o local de maior fragilidade foi o local com menor espessura e centro dos apoios verticais das telhas.



A região com menor espessura da telha francesa medida foi o canal côncavo de maior raio da telha em seu ponto central conforme pode ser observado na Figura 25.

**Figura 25 – Região de maior fragilidade e menor espessura da telha francesa**



Fonte: autor

O lançamento perpendicular à telha, foi estipulado por representar a situação de maior energia de impacto, com as telhas em estado máximo de saturação a fim de seguir os mesmos procedimentos de preparação utilizados pela NBR 15310 (ANBT, 2019) para o ensaio de carga de ruptura a flexão.

Através da revisão bibliográfica apresentada sobre os estudos de impacto em telhados e visando à similaridade com o granizo, foi determinada a utilização de esferas de gelo. Na Figura 26, foi observado como o gelo se comportou no momento de impacto.

**Figura 26 – Forma de impacto da esfera de 3,0 cm de gelo na telha**



26a – Esfera intacta antes do impacto



26b – Esfera destruída após o impacto

Fonte: autor

A esfera de gelo, quando impacta o telhado se extingue enquanto o aço, que possui uma maior dureza que o material cerâmico pode promover danos no material ensaiado que não seriam compatíveis com a atuação dos impactos das esferas de gelo.

Após a escolha do gelo como material de impacto, foi determinado como seriam testados os diâmetros a serem utilizados para o lançamento das esferas.

Com o objetivo de padronizar o ensaio e evitar possíveis situações de variabilidade que poderiam prejudicar a confiabilidade e variabilidade dos resultados da pesquisa, ficou definido apenas um diâmetro específico padrão de esfera de gelo.

Desta forma, foram utilizadas esferas de gelo com 3,00 cm de diâmetro que, lançadas com diferentes velocidades, simularam granizos entre 2,5 cm e 4,5 cm de diâmetro.

O intervalo médio do diâmetro equivalente entre 2,5 cm e 4,5 cm da esfera foi obtido e determinado na própria pesquisa através dos testes preliminares.

Inicialmente foram aplicados diâmetros equivalentes entre 1,0 e 2,0 cm, mas estes diâmetros não provocaram danos nas telhas ensaiadas.

Somente diâmetros equivalentes à partir de 2,5 cm começaram a provocar danos nas amostras de telhas cerâmicas.

O experimento registrou, através de um cronógrafo fixado na saída do tubo lançador, a velocidade das esferas e antes de cada lançamento foram medidas as massas de cada esfera de gelo lançada.

Com a velocidade e massa da esfera medidos, foi possível determinar a energia de impacto, através da equação da energia cinética, e conseqüentemente o diâmetro equivalente que atingiu a amostra testada.

A análise dos resultados foi verificada visualmente pelo dano sofrido na telha (falha permanente) ensaiada nas diversas idades de utilização. A sua relação ao número de impactos, massa saturada, absorção, carga de ruptura à flexão pela energia recebida foi determinada através da análise estatística inferencial.

Vale salientar que, nos testes preliminares de observação do funcionamento do equipamento, houve uma variável que influenciou nos resultados obtidos de lançamento das esferas, que foi a abertura manual da válvula de saída.

Foi verificado que, durante a realização das calibrações de pressões para os lançamentos, a velocidade de abertura da válvula interferia diretamente na velocidade e qualidade do material expelido pelo equipamento.

Isto é, quando a abertura era realizada de forma lenta a pressão exercida pelo sistema na abertura, provocava a destruição da esfera de gelo devido ao choque da esfera ao material (aço) de abertura da válvula. Isso demonstrou uma subjetividade na operação do equipamento.

Desta forma, foi utilizada uma abertura manual com a velocidade característica do operador, que foi calibrada com a pressão inserida no sistema para que a velocidade requerida fosse atingida.

Portanto, a forma de abertura deverá sempre ser realizada pelo mesmo operador a fim de evitar discrepâncias nos resultados de lançamento.

Testes realizados de vibração da estrutura de madeira juntamente com o cronógrafo, apresentou medições de velocidades mesmo sem o lançamento das esferas. Com isso, procedeu-se ao posicionamento totalmente isolado da fixação da estrutura demonstrando uma baixa variação das velocidades obtidas.

O material utilizado para congelamento da esfera de gelo também foi objeto de estudo durante a realização dos ensaios preliminares de ajustes do equipamento.

Quando foi utilizada apenas água filtrada ou água proveniente de rede pública se verificou que as esferas de gelo já saíam do lançador totalmente deformadas devido à alta pressão a que foram submetidas e passagem pela válvula de aço de abertura elas se extinguíam.

Na Figura 27, pode ser observado que não há a presença de uma esfera de gelo no momento do impacto.

**Figura 27 - Esfera de gelo de 3,0 cm deformada antes do impacto**



**27a – Ausência da esfera antes do impacto**



**27b – Ausência da esfera no impacto**

Fonte: autor

Sendo assim, buscou-se adaptações de como obter uma esfera de gelo que não fosse frágil a ponto de se desfazer com a pressão exercida na câmara de compressão, e que mantivesse a sua forma, sem alterar substancialmente a sua massa e que não destruísse facilmente.

Ou seja, o objetivo era manter sua forma até o momento do impacto e que ela se destruísse apenas quando impactasse a telha.

Adaptações com adições de 20% de farinha na água, água 100% destilada, água com 20% de amido de milho por exemplo, não encontraram bons resultados.

O melhor resultado obtido foi com a inserção de fibra de algodão com 5% em volume. Na Figura 28, pode ser observado o resultado obtido mostrando a esfera intacta indo de encontro à telha.

**Figura 28 – esfera de gelo intacta antes do impacto**



**Fonte: autor**

O transporte das esferas de gelo foi realizado em caixas de isopor juntamente com gelo seco, assim foi possível manter as esferas de gelo em temperatura constante sem que houvesse derretimento.

Com todas as variáveis definidas, realizou-se uma série de testes a fim de determinar qual a pressão de ar era necessária para acumular no reservatório onde a esfera de gelo fosse lançada na velocidade mais próxima do que se demonstrou através da pesquisa realizada por Silveira (2015).



Para Silveira (2015), o resultado da velocidade de impacto de uma esfera de granizo de 3,0 cm de diâmetro aproximado chegaria ao solo com uma velocidade aproximada de 29,5 m/s (ou aproximadamente 106 km/h) e 5,64 J de energia de impacto.

Assim, buscou-se determinar qual seria a pressão média que a câmara de lançamento deveria ter para que se conseguisse obter valores variando entre  $\pm 10\%$ , e definir qual a pressão a ser utilizada para os diversos diâmetros.

Ficou definida que a pressão de 5 bar ou aproximadamente 5,10 kgf/cm<sup>2</sup> a esfera atingia a velocidade característica para o diâmetro de 3,0 cm. Além disso, a capacidade de pressão do cilindro era de 12 bar, ou seja, a capacidade máxima de diâmetro de lançamento do equipamento foi de 5,0 cm.

Na Tabela 6, podem ser observadas as velocidades que cada esfera de 3,0 cm devem atingir para cada diâmetro equivalente, representando assim, a velocidade real que cada diâmetro equivalente deve atingir e sua energia característica.

Pela equação 4 é possível verificar que o crescimento da velocidade a ser atingida para atendimento das energias equivalentes será cada vez maior para cada classe de impacto descrita na Tabela 6. Estes cálculos serviram de base para o experimento de impacto.

**Tabela 6 – Velocidades e energias das esferas de gelo**

Classe de impacto	Diâmetro (mm)	Velocidade (m/s)	Velocidade (km/h)	Energia cinética	
				Objetivo (J)	+10% (J)
1	30	9,23	33,24	0,55	0,61
2	30	14,43	51,96	1,34	1,47
3	30	20,80	74,87	2,79	3,06
4	30	28,35	102,06	5,17	5,68
5	30	36,95	133,05	8,81	9,69

Fonte: autor

Para determinar o modelo matemático apropriado para demonstrar o diâmetro de granizo que foi capaz de promover danos irreparáveis (trincas, furos ou rompimento) nas diversas idades das telhas francesas cerâmicas testadas e a sua idade, foi utilizado o tratamento estatístico inferencial (regressão linear múltipla) com o auxílio do *software* TS-Sisreg® (TEIXEIRA, 2017).

### 3.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Foi realizada uma metodologia experimental, baseada na norma FM 4473 (ANSI, 2011), que descreve os procedimentos durante a fase de ensaios para obtenção dos resultados.

Antes da realização dos ensaios experimentais, realizou-se um estudo piloto do experimento pretendido com o objetivo de determinar o tamanho da amostra a ser testada para cada idade de telha e quais variáveis seriam efetivamente significativas para o experimento.

As ferramentas estatísticas utilizadas para determinar o tamanho da amostra, critérios de aceitação e significância das variáveis foram a análise de variância, teste t de *Student* e o critério de Chauvenet.

Através deste estudo foi possível a otimização do tempo gasto e assertividade na escolha das variáveis, tornando o processo objetivo, confiável e eficiente.

Inicialmente foram definidas como variáveis explicativas a carga de ruptura à flexão, o percentual de absorção, a massa saturada, a idade e o número de impactos necessários até o rompimento das telhas. Como variável dependente foi definido o diâmetro equivalente necessário para o dano irreparável nas telhas.

Para a determinação do tamanho da amostra a ser ensaiada para os testes de impacto, primeiramente foram escolhidas aleatoriamente 10 telhas de cada grupo de idade em que foram realizados os testes de absorção e carga de ruptura à flexão (respectivamente).

A aleatoriedade foi comprovada através da utilização do *software* R com o comando “*sample*” para as 50 telhas. A ordem dos números de identificação das amostras para cada idade, obtida do comando “*sample*” é apresentada pela Figura 29.

**Figura 29 – Obtenção de dados aleatórios para cada idade (0, 5, 25, 30, 34, 45 e 50 anos)**

```

0 anos  sample(50:50)
[1] 1 40 28 24 43 49 33 4 2 15 34 19 10 12 48 30 29 36 27 3 26 20 9 11 31 38 5 22 14 23 42 46 47 18 37 45 32 25 17 44 21 16 8 41 7 50 39 35 13 6

5 anos  sample(50:50)
[1] 43 50 4 30 6 45 29 10 12 28 5 44 25 22 37 3 18 2 17 19 21 33 39 7 16 23 13 14 38 15 9 8 20 27 24 47 1 35 31 26 40 11 46 42 32 36 49 41 48 34

25 anos sample(50:50)
[1] 10 1 17 42 9 13 5 3 36 35 18 25 34 47 6 21 7 26 11 37 23 48 28 16 39 49 46 4 40 15 41 14 8 19 12 45 22 20 2 50 38 44 43 31 32 27 30 29 24 33

30 anos sample(50:50)
[1] 39 4 48 50 41 45 26 43 21 10 25 14 11 36 2 38 49 32 12 33 18 29 8 27 40 6 23 47 35 16 3 19 46 28 44 1 24 5 15 37 17 13 31 9 22 34 30 42 20 7

34 anos sample(50:50)
[1] 15 18 20 3 25 12 48 47 10 40 45 36 22 26 4 19 23 49 8 7 14 31 34 28 43 29 37 9 38 46 1 41 13 39 24 50 30 16 17 42 32 44 35 21 5 11 6 27 33 2

45 anos sample(50:50)
[1] 50 5 14 6 10 9 3 31 23 7 45 21 22 34 13 17 39 33 42 30 41 44 47 27 15 25 29 20 2 24 36 11 38 49 16 18 1 37 19 32 26 28 40 48 4 43 8 12 35 46

50 anos sample(50:50)
[1] 30 28 26 29 23 24 44 21 47 19 37 5 8 36 15 17 12 25 42 38 34 50 31 10 41 14 6 35 40 3 45 2 32 46 18 7 27 1 9 11 43 13 22 48 4 20 39 16 33 49

```

Fonte: autor

Todas as telhas foram identificadas aleatoriamente com números de 1 a 50 e, evidenciada, também, a idade de cada conjunto de telha. Na Figura 30, pode ser observada a forma de identificação dos dados amostrais.

**Figura 30 – Identificação das telhas**



Fonte: autor

Ficou definido na pesquisa que cinco telhas de cada idade serviriam para calibração do lançamento das esferas, análise preliminar dos resultados e posicionamento das telhas no suporte de madeira.

Posteriormente, foram utilizadas cinco telhas para determinação da absorção e mais cinco para a carga de ruptura a flexão. Na Tabela 7, podem ser observados os números das amostras selecionadas para o ensaio de absorção para cada idade de telha.

**Tabela 7 – Amostras aleatórias para os ensaios de absorção e carga de ruptura à flexão**

Idade (anos)	nº da amostra	nº da amostra	nº da amostra	nº da amostra	nº da amostra
0	49	33	04	02	15
5	12	29	28	45	10
25	5	13	35	3	36
30	43	10	21	26	45
34	48	47	2	10	40
45	31	9	7	3	23
50	24	21	19	44	47

Fonte: autor

De maneira sintética, os ensaios foram realizados num conjunto de cinco telhas de cada tipologia. Resumidamente, a determinação da absorção das telhas foi obtida seguindo os preceitos da NBR 15310 (ABNT, 2009).

As cinco telhas foram colocadas em estufa por 24 h, depois foram obtidas as suas massas secas e posteriormente foram colocadas imersas em água, onde, após um período de 24 h foram pesadas para obtenção da massa saturada.

Com a diferença entre a massa saturada e massa seca foi possível determinar o percentual de absorção de cada idade de telha. Na Figura 31, pode ser observado o ensaio de pesagem da telha saturada realizado.

**Figura 31 – Pesagem das telhas saturadas**

Fonte: autor

Para o ensaio de determinação do esforço de carga de ruptura à flexão das telhas procedeu-se da seguinte forma.

Após 24 h imersas em água, as telhas (nas diversas idades) foram submetidas ao ensaio de carga de ruptura à flexão em prensa hidráulica e conforme a NBR 15310 (ABNT, 2009).

Desta forma, obtiveram-se os valores de carga de ruptura à flexão que estão no apêndice A deste trabalho. Na Figura 32, pode ser observado o ensaio de carga de ruptura à flexão realizado.

**Figura 32 – Ensaio de carga de ruptura à flexão**



**Fonte: autor**

Após a realização dos ensaios de percentual de absorção e carga de ruptura à flexão, determinou-se que, o desvio-padrão estimado de absorção da telha para cada idade como a característica para determinar o tamanho da população a ser ensaiada. Para esta pesquisa, determinou-se um grau de confiança escolhido de 95%.

O erro calculado baseado na estimativa do desvio-padrão amostral foi obtido através do método probabilístico aleatório representado pela Equação 7.

$$e = z \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

**Equação 7**

Onde:

e = erro (10% do valor máximo permitido por norma de 20% = 2%)

z = grau de confiança de 95% = 1,96

$\sigma$  = desvio-padrão de absorção médio (1,93% - obtido para as 5 amostras de cada idade)

n = tamanho da amostra aleatória

Portanto, foi possível determinar o tamanho mínimo da amostra a ser ensaiada através da Equação 8.

$$n = \left( z \cdot \frac{\sigma}{e} \right)^2$$

Equação 8

$$n = \left( 1,96 \cdot \frac{1,93}{2} \right)^2 \rightarrow n = 3,58$$

Com a equação acima, obteve-se uma amostra com tamanho mínimo de quatro telhas a serem ensaiadas para cada idade. Desta forma, foram definidas 5 amostras para a determinação das características do material a ser ensaiado.

Após a montagem do equipamento, procedeu-se à execução do ensaio com o lançamento das esferas de gelo sobre as telhas cerâmicas francesas das diferentes idades. A realização deste ensaio se baseou no procedimento da norma internacional FM 4473 (ANSI, 2011).

Foram realizados até 12 impactos até o rompimento ou dano permanente de cada amostra, ou seja, houve um tratamento estocástico destes dados, pois não se sabia como os resultados dos testes iriam evoluir.

Todas as amostras ensaiadas para o impacto ficaram, no mínimo, 24 h imersas em água e tiveram suas massas saturadas obtidas antes de cada teste de resistência ao impacto. As amostras ensaiadas de cada idade de telhas foram um total de 30 telhas para o teste de impacto.

Este montante foi definido considerando uma população referente ao telhado de uma residência usual de 150m<sup>2</sup>, ou seja, estimou-se 2.500 telhas em média com uma variação de 500 telhas em torno da média. Desta forma, considerou-se populações de telhas variando entre 2.000 e 3.000 telhas com um grau de confiança escolhido de 95%, ou seja,  $z = 1,96$ .

O erro calculado baseado na estimativa do desvio-padrão amostral foi obtido através da Equação 9.

$$e = z \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Equação 9

Onde:

$e$  = erro (250 telhas – 10% da média populacional)

$z$  = grau de confiança de 95% = 1,96

$\sigma$  = desvio-padrão de população de telhas em telhados de residências médias

(500)

$n$  = tamanho da amostra aleatória

Portanto, foi possível determinar o tamanho mínimo da amostra a ser ensaiada através da Equação 10:

$$n = \left( z \cdot \frac{\sigma}{e} \right)^2 \quad \text{Equação 10}$$

$$n = \left( 1,96 \cdot \frac{500}{250} \right)^2 \rightarrow n = 15,36$$

Com a equação acima, obteve-se uma amostra com tamanho mínimo de 16 telhas a serem ensaiadas para cada idade. Desta forma, foram definidos 30 dados para cada amostra de idade para o teste de impacto.

Para a realização do ensaio de aplicação do esforço de impacto nas telhas procedeu-se ao protocolo da norma FM 4473 (ANSI, 2011).

1. As amostras de teste foram montadas na parte inferior do suporte das telhas, simulando aplicações de campo reais;
2. Os testes de impacto foram aplicados a uma temperatura entre 10°C e 35°C;
3. Preparação de amostras de esferas de gelo foram feitas de água com adição de 5% de fibra sintética (algodão) com 30 mm de diâmetro e colocadas em um recipiente com gelo seco a uma temperatura de (-60°C a -10°C);
4. Foram selecionadas esferas de gelo livres de defeitos e atenderam ao critério de massa dentro do intervalo de -10% e +10% dos valores listados na Tabela 8;

**Tabela 8 – Critério para seleção das esferas de gelo**

<i>Diâmetro em (mm)</i>	<i>Massa em gramas (g)</i>	<i>-10% (g)</i>	<i>+10% (g)</i>
30	12,90	11,61	14,19

**Fonte: autor**

5. Foi determinado o local de impacto alvo particularmente sensível para danificar as amostras;
6. Posicionado o medidor de velocidade de modo que a velocidade da esfera de gelo seja medida entre o lançador e a amostra de teste. As esferas de gelo saíram do cronógrafo a menos de 1 m do local de impacto;

7. Esfera de gelo lançada em um ponto de impacto-alvo com base no exame de vulnerabilidade;
8. O processo prosseguiu até que ocorresse "sem dano" ou "dano irreparável";
9. Cada alvo foi impactado sempre com a mesma tipologia da esfera, para uma quantidade mínima de doze impactos por tamanho;
10. A esfera de gelo impactou a amostra dentro de 60 segundos após a remoção do recipiente de armazenamento;
11. Após o teste de impacto, inspecionou-se visualmente as superfícies superior e inferior do corpo de prova;
12. Os danos foram registrados e tabelados.

O critério para aprovação foi que o corpo de prova não devia mostrar evidência de rachaduras ou rupturas visíveis ou qualquer dano.

Para a falha o critério utilizado foi quando amostra apresentou evidências de rachaduras ou rupturas visíveis ou qualquer dano. Na Figura 33, pode ser observado o ensaio de impacto realizado quando a esfera de gelo atingiu e rompeu a telha.

**Figura 33 – Ensaio de impacto**



**Fonte: autor**

Após a conclusão dos ensaios, procedeu-se à compilação dos resultados obtidos de absorção, carga de ruptura a flexão, número de impactos e massa saturada para as sete idades com análise estatística inferencial por regressão linear através do *software* TS-Sisreg.



#### 4 RESULTADOS E ANÁLISES

Após a realização do procedimento experimental, procedeu-se à compilação dos dados que estão demonstrados nas Tabelas 9 e 10 referente aos ensaios de carga de ruptura à flexão e absorção respectivamente.

Com o objetivo de minimizar eventuais discrepâncias ao ensaio de carga de ruptura à flexão foi adotado o critério de Chauvenet para verificar a existência de algum dado discrepante.

O critério de Chauvenet estabelece a determinação de *outliers* para o limite de 1,65 vezes o desvio padrão da amostra para 5 observações. Desta forma o único *outlier* obtido foi o dado 5 para a idade de 30 anos.

Na Tabela 9, podem ser observados os resultados obtidos para o ensaio de carga de ruptura à flexão para cada idade de telha com a respectiva média, desvio-padrão e coeficiente de variação com o dado discrepante removido em vermelho.

**Tabela 9 – Resultados para o ensaio de carga de ruptura à flexão (N)**

Idade (anos)	Flexão 01	Flexão 02	Flexão 03	Flexão 04	Flexão 05	Média	Desvio-padrão	Coef. de variação
0	948,76	918,91	1382,10	1418,78	808,87	<b>1095,48</b>	<b>283,51</b>	<b>25,88%</b>
5	540,90	596,86	611,78	579,45	604,94	<b>586,79</b>	<b>28,35</b>	<b>4,83%</b>
25	933,83	948,13	1560,53	1162,01	1370,29	<b>1.194,96</b>	<b>271,38</b>	<b>22,71%</b>
30	890,93	977,35	991,65	959,32	459,46	<b>954,81</b>	<b>44,60</b>	<b>4,67%</b>
34	739,85	718,72	644,73	738,61	804,51	<b>729,28</b>	<b>57,27</b>	<b>7,85%</b>
45	1218,58	830,01	753,53	534,06	797,68	<b>826,77</b>	<b>247,70</b>	<b>29,96%</b>
50	409,72	1295,68	670,84	474,38	793,32	<b>728,79</b>	<b>351,93</b>	<b>48,29%</b>

Fonte: autor

Os coeficientes de variação obtidos para carga de ruptura a flexão demonstraram que 57% das idades estudadas possuem dispersões maiores que 22%, sem apresentar correlações com as idades, corroborando com a justificativa de falhas na fabricação e baixa certificação de qualidade das empresas do setor de telhas cerâmicas.

A análise de variância (ANOVA) foi calculada com o objetivo de verificar se havia diferenças estatísticas entre as diversas idades dos grupos estudados para um nível de significância de 95%.

Como o nível de significância do experimento era de 95%, o valor de P menor que 0,05 comprova que houve diferença entre os grupos estudados. Na Tabela 10 é possível verificar que o nível de significância é menor que 0,05.

Outra forma de comprovar a existência de diferença da variável no experimento é comparar o valor de F obtido com o F crítico. Na Tabela 10 pode ser observado que, para uma significância de 95%, o valor de F obtido foi maior que o F crítico, evidenciando que há diferença entre os grupos das diversas idades da variável de carga de ruptura à flexão.

**Tabela 10 – Tabela ANOVA para carga de ruptura à flexão em todas as idades**

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	1321157,185	6	220192,8642	5,264811763	0,001054	2,459108
Dentro dos grupos	1129234,548	27	41823,50179			
Total	2450391,733	33				

**Fonte: autor**

Desta forma a ANOVA, entre todos os grupos de idades, permitiu verificar a existência de variações significativas, mas não determinou se todos, ou apenas algumas das idades, comprovam estatisticamente alguma diferença estatisticamente significativa.

Para essa verificação foram realizadas as análises de variância (ANOVA) entre a amostra controle (telhas novas) e as demais idades estudadas com objetivo de subsidiar a análise do teste t de *Student*. Os resultados das ANOVAs estão no apêndice C deste trabalho.

O teste t de *Student* foi realizado a fim de verificar quais grupos são diferentes em relação ao grupo de controle das telhas novas. Os resultados obtidos dos grupos que diferem à amostra de controle podem ser observados na Tabela 11 evidenciados em negrito.

Tabela 11 – Resultados do teste t de *Student* para variável carga de ruptura à flexão (N)

Idade (anos)	t de <i>Student</i> (calculado)	t de <i>Student</i> bi-caudal (crítico)	Diferença significativa? (sim ou não)
0→5	3,99	± 2,78	<b>sim</b>
0→25	-0,57	± 2,31	não
0→30	0,97	± 2,36	não
0→34	2,83	± 2,78	<b>sim</b>
0→45	1,60	± 2,31	não
0→50	1,60	± 2,31	não

Fonte: autor

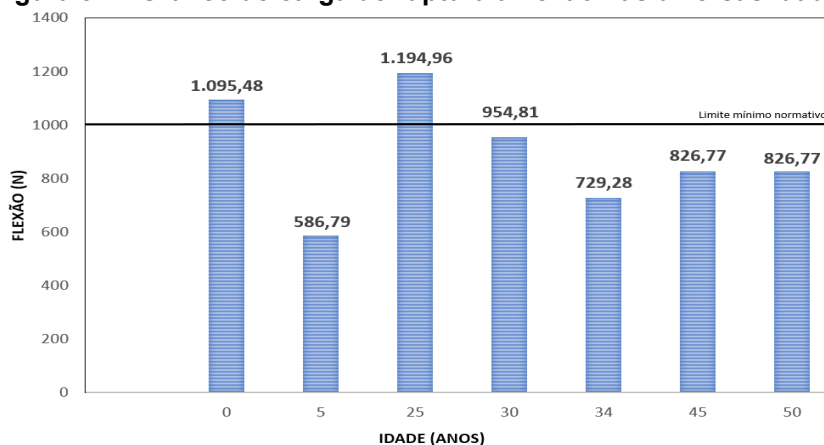
Nos resultados apresentados na Tabela 11, pode ser observada que as idades de 5 e 34 anos demonstraram estatisticamente diferenças significativas quando comparadas ao grupo de controle para a variável carga de ruptura à flexão.

Desta forma pode-se concluir que a idade das telhas não tem influência sobre a carga de ruptura à flexão ou seja, a exposição às intempéries não influencia essa característica, pois em outras idades não ocorreram diferenças estatisticamente relevantes.

Também foi verificado que as telhas com idade de 5 anos, apesar de recentes, possui o segundo menor valor de resistência de carga de ruptura à flexão. Isso pode ser explicado pelo fato de as telhas possuírem a segunda menor média de massa saturada de todas as telhas ensaiadas e maior percentual de absorção.

Nos resultados apresentados na Figura 34, pode ser observada uma variação de resultados nos testes de carga de ruptura à flexão através dos dados obtidos de coeficiente de variação na ordem de até 50%, mas sem indicar uma tendência conforme as idades aumentam.

Figura 34 – Gráfico de carga de ruptura à flexão nas diversas idades

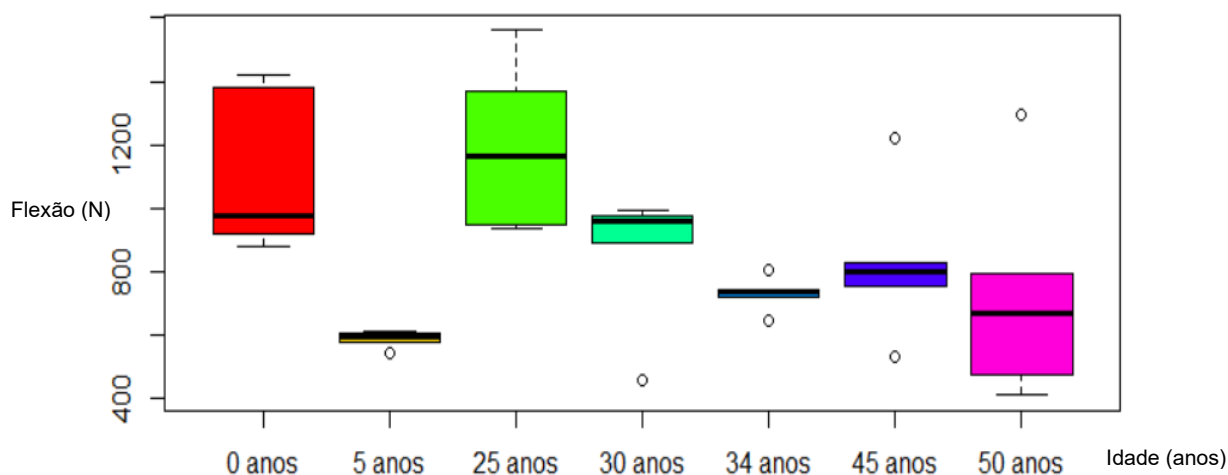


Fonte: autor

De acordo com a NBR 15310 (ABNT, 2009), o limite inferior de resistência de ruptura à flexão de telhas cerâmicas não pode ser inferior a 1000 N. Os valores verificados na média obtida para as sete diferentes idades foram que cinco não atenderam a este requisito.

Dentre os resultados mais baixos obtidos é possível observar que as características comuns que determinaram este fenômeno foram os menores valores de massa saturada e/ou maiores valores de absorção.

**Figura 35 – Gráfico do comando *boxplot* para carga de ruptura à flexão nas diversas idades**



Fonte: autor (extraído do software R)

Observa-se no gráfico da Figura 35 comportamentos independentes das idades das telhas. Mostrando sim, que o tempo de uso das telhas não tem influência sobre a resistência à flexão. Ou seja, a exposição às mais diversas intempéries não influencia essa propriedade.

Ainda, observa-se “outliers” para as idades de 5 anos, 30 anos, 34 anos, 45 anos e 50 anos. O critério para determinação desses pontos foi o limite de Chauvenet que considera para este tamanho de amostra 1,65 vezes o desvio padrão da amostra.

Concluída a análise da resistência à flexão foi realizada a análise do percentual de absorção. Na Tabela 12 pode ser observado os resultados obtidos para o ensaio de absorção para cada idade de telha.

Tabela 12 – Resultados para o ensaio de absorção (%)

Idade (anos)	Absorção 01	Absorção 02	Absorção 03	Absorção 04	Absorção 05	Média	Desvio-padrão	Coef. de Variação
0	17,61	15,02	16,92	17,96	15,50	<b>16,60</b>	<b>1,29</b>	<b>7,77%</b>
5	27,65	27,84	25,15	28,29	27,14	<b>27,21</b>	<b>1,22</b>	<b>4,48%</b>
25	23,43	22,03	23,38	23,46	23,68	<b>23,19</b>	<b>0,66</b>	<b>2,85%</b>
30	20,87	21,92	22,68	21,28	29,63	<b>23,27</b>	<b>3,61</b>	<b>15,51%</b>
34	22,24	22,92	23,16	23,11	23,33	<b>22,95</b>	<b>0,42</b>	<b>1,83%</b>
45	23,85	21,53	20,63	17,74	17,76	<b>20,29</b>	<b>2,60</b>	<b>12,81%</b>
50	23,13	22,00	29,57	28,96	29,55	<b>26,64</b>	<b>3,75</b>	<b>14,08%</b>

Fonte: autor

Os coeficientes de variação obtidos para absorção demonstraram que 100% das idades estudadas possuem dispersões menores que 16%, demonstrando uma equivalência entre as observações realizadas.

Seguindo o mesmo critério realizado para a carga de ruptura à flexão, foi calculada a análise de variância (ANOVA) do percentual de absorção a fim de comprovar a normalidade dos dados obtidos.

De forma análoga aos critérios e análises estatística de variância realizados para carga de ruptura à flexão é possível verificar na Tabela 13 que o nível de significância é menor que 5% e, portanto, há diferença entre os grupos estudados para a variável absorção.

Na Tabela 13 pode ser observado que para uma significância de 95% o valor de F obtido foi cerca de 6 vezes maior que o F crítico, evidenciando a importância da variável absorção.

Tabela 13 – Tabela ANOVA para percentual de absorção em todas as idades

ANOVA						
Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	396,29	6	66,05	12,25	9,811E-7	2,45
Dentro dos grupos	151,01	28	5,39			
Total	547,30	34				

Fonte: autor

Seguindo o mesmo critério foram realizadas as análises de variância (ANOVA) par a par entre a amostra controle (telhas novas) e as demais idades estudadas para a análise do teste t de *Student*. Os resultados das ANOVAs estão no apêndice D deste trabalho.

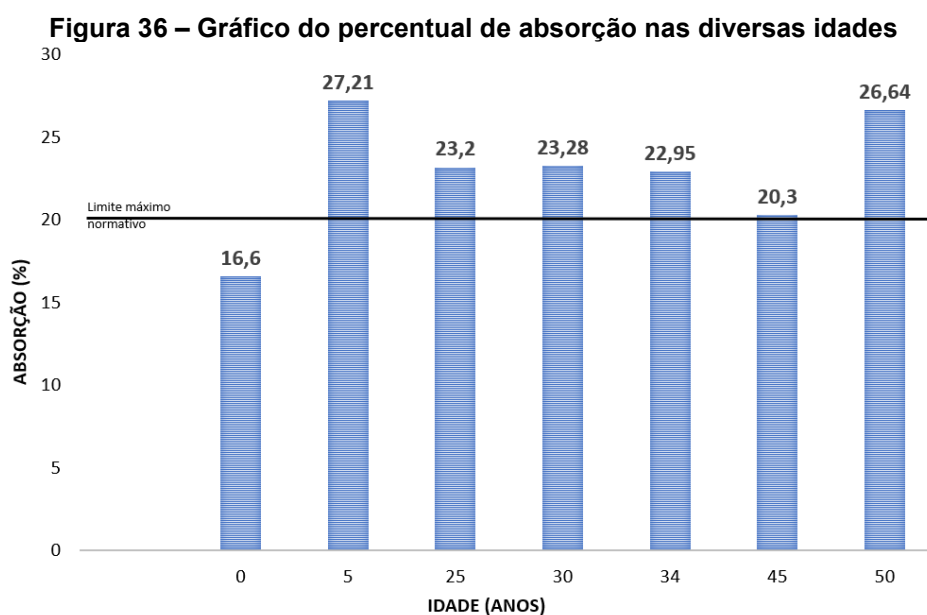
Os resultados obtidos do teste t de *Student* dos grupos que diferem à amostra de controle podem ser observados na Tabela 14 evidenciados em negrito.

**Tabela 14 – Resultados do teste t de *Student* para variável absorção (%)**

Idade (anos)	t de <i>Student</i> (calculado)	t de <i>Student</i> bi-caudal (crítico)	Diferença significativa? (sim ou não)
<b>0→5</b>	-13,33	± 2,31	<b>sim</b>
<b>0→25</b>	-10,16	± 2,31	<b>sim</b>
<b>0→30</b>	-3,89	± 2,31	<b>sim</b>
<b>0→34</b>	-10,44	± 2,31	<b>sim</b>
<b>0→45</b>	-2,84	± 2,31	<b>sim</b>
<b>0→50</b>	-5,66	± 2,31	<b>sim</b>

Fonte: autor

Nos resultados apresentados na Tabela 14, podem ser observadas que todas as idades demonstraram estatisticamente diferenças significativas quando comparadas ao grupo de controle para a variável absorção. Na Figura 36 podem ser observados os percentuais de absorção acima do limite normativo.



Fonte: autor

De acordo com a NBR 15310 (ABNT, 2009) o limite de absorção das telhas cerâmicas francesas não pode ser superior a 20%.

A Figura 36 demonstra resultados de absorção superiores ao limite estabelecido por norma com variações que superam até 7% em valores absolutos. Apenas as telhas novas atenderam a este critério, as demais idades superaram o limite de 20% sugerindo perda de massa com o aumento da idade.

Foi verificado que os coeficientes de variação, em sua maioria, aumentaram de acordo com o aumento da idade das telhas, e que atingem valor máximo de 15,51%, evidenciando que as telhas cerâmicas analisadas possuem uma menor variabilidade dos resultados de absorção em relação a carga de ruptura à flexão.

A Figura 36 também sugere que as telhas podem aumentar sua absorção durante o tempo, pois somente a telha nova atendeu este requisito, mas em contrapartida não é possível verificar uma tendência nas maiores idades sugerindo também variabilidade na fabricação.

Com o objetivo de encontrar mais uma variável explicativa para cada resultado foi realizada a medição da massa saturada de cada telha ensaiada onde observou-se uma diferença de 500 g em média entre algumas idades. Isto representou até 20% de diferença entre as massas úmidas das telhas testadas. A Tabela 15 demonstra as variações obtidas.

**Tabela 15 – Massas saturadas para cada idade das telhas ensaiadas**

<b>Idade (anos)</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>25</b>	<b>30</b>	<b>34</b>	<b>45</b>	<b>50</b>
<b>Massa saturada (kg)</b>	<b>2,797</b>	<b>2,594</b>	<b>2,999</b>	<b>2,463</b>	<b>3,092</b>	<b>2,799</b>	<b>2,574</b>

Fonte: autor

Com isso, foi utilizada na inferência estatística a variável massa saturada de cada telha ensaiada a fim de verificar a sua influência nos resultados. Isto ocorreu pelo fato que, em todas as idades, os fabricantes e suas dimensões eram distintos.

Finalizados os testes de impacto foram utilizadas no teste estatístico inferencial as variáveis média de carga de ruptura à flexão, média de absorção, massa saturada, idade e número de impactos até a ruptura.

O número total de resultados das telhas ensaiadas rompidas foi de 172 dados onde, após o tratamento estatístico de regressão linear múltipla, obteve-se 153 dados efetivamente utilizados para a análise estatística e resultando na seguinte equação.

$$\text{Ø} = 2,627 + 0,000838 * \text{Valores de flexão} + 0,06142 * \text{nº de impactos} - 0,07076 * \text{Percentual de absorção} + 0,4836 * \text{Peso saturada}$$

Na Tabela 16, adaptada da tela de resultados do *software* TS-Sisreg, podem ser observados os resultados obtidos de determinação R<sup>2</sup>, correlação linear, desvio-padrão e normalidade dos resíduos. Além disso, pode ser observado o total de dados obtidos e os dados efetivamente considerados.

**Tabela 16 – Resultados estatísticos**

Variáveis		Dados	
Total	Consideradas	Total	Considerados
6	5	172	153
Graus de Liberdade			148
Determinação		Correlação	
Linear	Não Linear	Ajustado	Linear
0,777099	0,777099	0,771075	0,881532
Fisher-Snedecor		Desvio Padrão	
F calculado	Significância	Linear	Não Linear
128,99	0,01	0,23	0,23
Normalidade dos Resíduos			
(-1) a +1	(-1,64) a +1,64	(-1,96) a +1,96	
60%	92%	98%	

**Fonte: autor (adaptado do software TS-Sisreg)**

Na Tabela 16, pode ser observada uma determinação R<sup>2</sup> obtida de 0,78. Isso comprova que as variáveis adotadas estão com um forte poder de explicação do fenômeno analisado, pois valores próximos de 1,00 demonstram um poder de explicação máximo das variáveis adotadas.

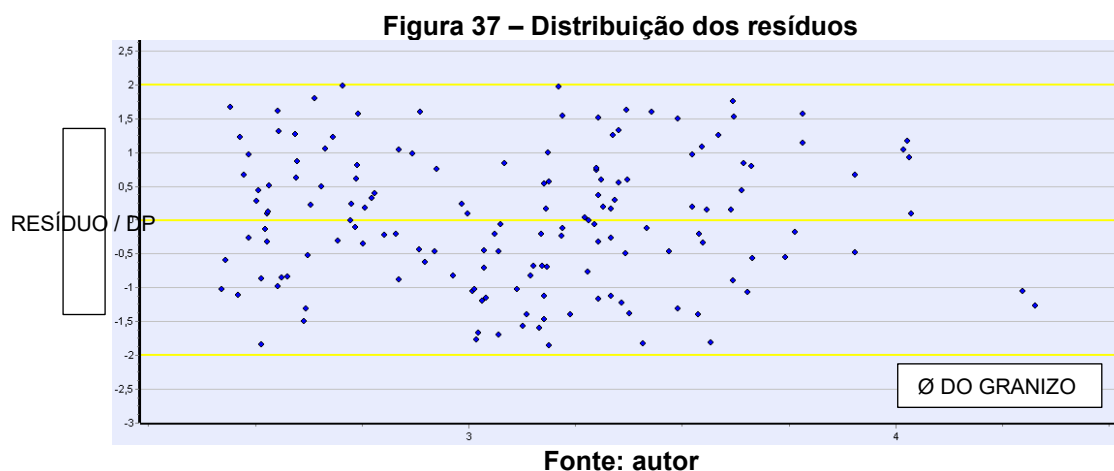
Na Tabela 16, pode ser observado o fenômeno da normalidade estatística obtida. Ou seja, o resultado obtido foi que 98% dos dados amostrais considerados estão entre  $\pm 1,96$  dos desvios da média.

O apêndice B demonstra (na coluna resíduo/desvio padrão) que nenhum dado considerado de toda a amostra ficou fora do intervalo de  $\pm 1,96$ .

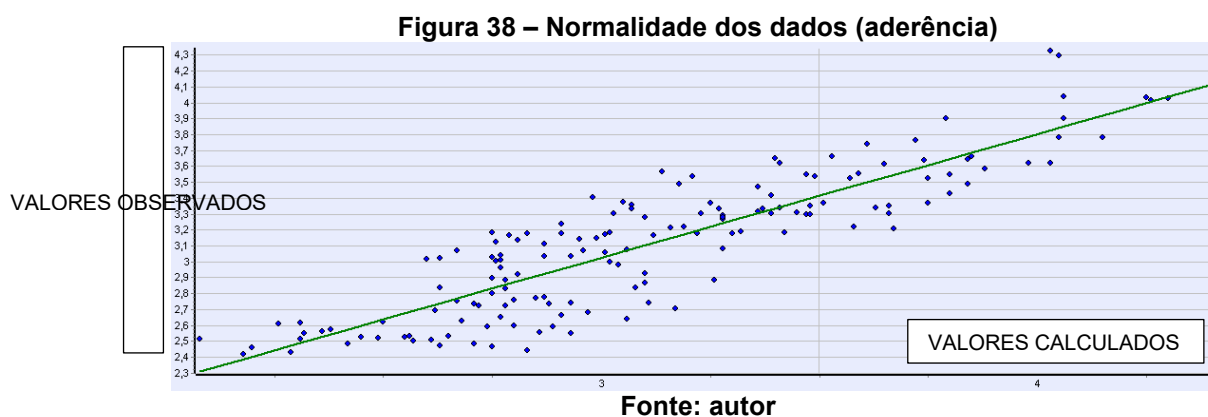
Na Figura 37, observa-se a distribuição dos dados obtidos e resíduos em relação ao desvio-padrão. Além disso, na demonstração da distribuição dos dados



amostrais pode ser observada a ausência de heterocedasticidade, ou seja, há comprovadamente uma distribuição aleatória dos dados.

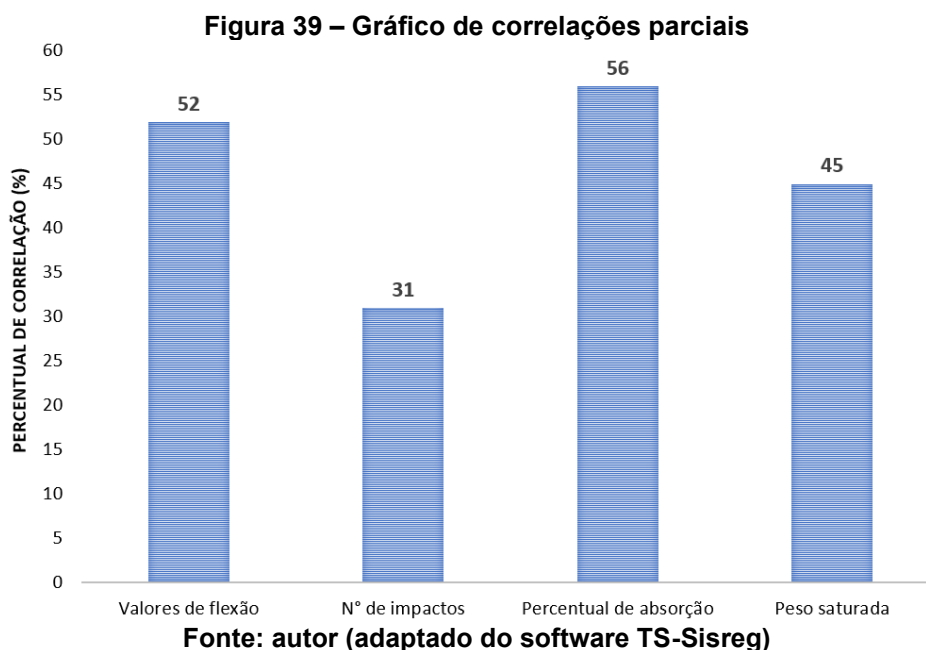


Na Figura 38, pode ser observado o gráfico de aderência. É possível verificar que os dados amostrais obtidos estão próximos à reta média. Isso também confirma a distribuição normal do fenômeno analisado.



Na Figura 39, pode ser observada a correlação parciais entre as variáveis. Verifica-se que os percentuais de correlação variam entre 31% e 56%. Teixeira (2017), obteve valores de correlação das variáveis entre 34% e 62% para testes em telhas novas de diversas, demonstrando equivalência explicativa das variáveis escolhidas.

Na Figura 39, é possível observar também o percentual de absorção é um fator fundamental na análise isolada das variáveis em relação à variável dependente, pois possui o maior percentual de correlação e a variável nº de impactos teve o menor poder de explicação do fenômeno por possuir o menor percentual de correlação.



Na Tabela 17, são observados os resultados das variáveis utilizadas e as suas escalas, significância e o teste “T. Observado” obtidos na análise estatística inferencial.

**Tabela 17 – Variáveis utilizadas**

Variável	Escala	T. Observado	Significância (%)
Valores de flexão	x	7,41	0,01
Nº de impactos	x	3,93	0,01
Percentual de absorção	x	-8,31	0,01
* Idade	x	-----	-----
Peso saturada	x	6,13	0,01
Diâmetro do granizo	y	-----	-----

\* variável desconsiderada

**Fonte: autor (adaptado do software TS-Sisreg)**

Conforme pode ser observado na Tabela 17, a variável idade foi desconsiderada na análise de regressão pois apresentou baixo poder de explicação do fenômeno analisado. Isto comprova as análises estatísticas realizadas para carga de ruptura a flexão e absorção que não demonstraram tendências significativas com o aumento da idade das telhas.

O percentual de absorção demonstrou um valor “T. Observado” negativo pelo fato de ser uma variável inversamente proporcional ao resultado esperado de impacto,

ou seja, quanto maior o valor de percentual de absorção menor a resistência ao impacto das telhas.

As significâncias apresentadas evidenciaram valores menores que 5%, ou seja, retrataram uma alta precisão das variáveis utilizadas que tiveram poder de explicação do fenômeno.

O “T. Observado” é a demonstração da representação da variável no modelo estatístico obtido. Pela Tabela 16, verifica-se que todas as variáveis possuem poder de explicação relativamente equivalentes.

Os valores, em módulo, de “T. Observado” demonstraram que as variáveis absorção, massa satura e carga de ruptura a flexão possuem um maior peso das variáveis utilizadas.

Com todas as análises estatísticas realizadas procedeu-se à escolha da equação que melhor representou o fenômeno de impacto realizado e, posteriormente, elaborou-se a análise do comportamento dos resultados com o esperado na hipótese inicial.

A hipótese inicial era verificar se as características físicas das telhas juntamente com sua idade e número de impactos possuía relevância para análise de resistência ao impacto.

O impacto considerado de uma unidade foi resultado das observações realizadas no procedimento experimental onde foi constatado um comportamento diretamente proporcional, ou seja, quanto maior o número de impactos necessários para romper as telhas, maior a sua resistência ao impacto. Desta forma, uma telha rompida com um impacto demonstrou o menor diâmetro capaz de danificar as telhas.

Com os resultados obtidos foi possível verificar que a hipótese inicial foi atendida, pois foi comprovado que as variáveis absorção, impacto, flexão e massa saturada utilizadas conjuntamente demonstraram coerência com as hipóteses esperadas. As simulações para cada idade podem ser observadas para cada característica das telhas ensaiadas na Tabela 18.

Tabela 18 – Diâmetros de rompimento para cada idade das telhas ensaiadas

Ruptura à flexão (N)	Nº de impactos (unid.)	% de absorção	Idade (anos)	Massa saturada (kg)	Ø da esfera (cm)	Ø (cm) do Intervalo de confiança
1.095,48	1	16,60	0	2,797	<b>3,78</b>	<b>3,70 / 3,87</b>
1.194,96	1	23,20	25	2,999	<b>3,50</b>	<b>3,44 / 3,56</b>
826,77	1	20,30	45	2,799	<b>3,30</b>	<b>3,25 / 3,35</b>
729,28	1	22,95	34	3,092	<b>3,17</b>	<b>3,12 / 3,22</b>
954,81	1	23,28	30	2,463	<b>3,03</b>	<b>2,99 / 3,08</b>
826,77	1	26,64	50	2,574	<b>2,74</b>	<b>2,70 / 2,78</b>
586,79	1	27,21	5	2,594	<b>2,51</b>	<b>2,47 / 2,55</b>

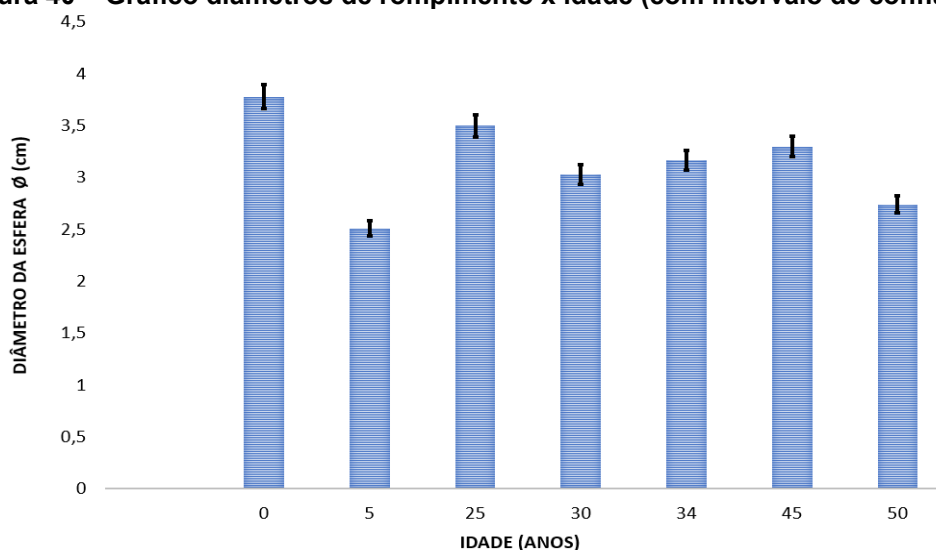
Fonte: autor

A Tabela 18 e Figura 40 demonstram que, o diâmetro de rompimento da telha usada com maior absorção e menor percentual de absorção (5 anos) está 35% abaixo da resistência de uma telha nova.

Ficou evidenciado na Tabela 18 que a carga de ruptura à flexão e massa saturada tem influência positiva para a resistência ao granizo, enquanto o percentual de absorção possui influência negativa. Desta forma, telhas cerâmicas serão mais resistentes ao granizo quanto maior a resistência a flexão, maior massa saturada e menor o percentual de absorção.

Conforme demonstrado na Figura 40, é possível verificar que, no avanço das idades de exposição das telhas estudadas, não houve uma tendência de queda para a resistência ao impacto de granizo, corroborando com os resultados obtidos nas análises estatísticas e regressão linear múltipla.

**Figura 40 – Gráfico diâmetros de rompimento x idade (com intervalo de confiança)**



Fonte: autor

Através da análise inferencial de regressão múltipla, obteve-se a equação que descreve o fenômeno de impacto de pedras de gelo simulando granizo em telhas cerâmicas francesas.

*Diâmetro do granizo = 2,6271937 + 0,00083800283 \* Valores de flexão + 0,061420736 \* nº de impactos - 0,070757827 \* Percentual de absorção + 0,48362756 \* Peso saturada*

Podendo ser escrita de forma simplificada da seguinte forma:

**$\varnothing = 2,627 + 0,000838 * \text{Valores de flexão} + 0,06142 * \text{n}^\circ \text{ de impactos} - 0,07076 * \text{Percentual de absorção} + 0,4836 * \text{Peso saturada}$**

Onde:

$\varnothing$  = diâmetro da esfera de granizo em cm que rompe a telha

Flexão = valor de carga de ruptura à flexão em N

Nº impactos = número de impactos sofridos até a ruptura

% absorção = Percentual de absorção da telha

Massa saturada = massa da telha totalmente saturada em kg

Coeficiente de determinação / aderência (R) = 0,777099

Correlação (R<sup>2</sup>) = 0,881532

Determinação ajustada (R) = 0,771075

Desvio padrão ( $\tau$ ) = 0,23

Fischer Snedecor = 128,99 < 0,01%

Portanto, a confiança atingida do modelo foi de 99,99%.

## 5 CONCLUSÕES

O método experimental proposto pela norma FM 4473 (ANSI, 2011), demonstrou que a metodologia de ensaio e análise em 3 níveis está focada em materiais dúcteis como aço e asfalto e, como a telha cerâmica é um material frágil, a metodologia de análise foi diferente pois, só houve possibilidade de análise dicotômica dos danos ao material frágil (ruptura ou não ruptura).

As análises estatísticas ANOVA, t de *Student* e regressão linear múltipla foram fundamentais na análise dos dados demonstrando que a idade de exposição não interfere na resistência ao granizo de telhas cerâmicas.

A metodologia proposta gerou resultados coerentes, com alta correlação entre as condições de carga de ruptura à flexão, percentual de absorção, número de impactos e massa saturada das telhas cerâmicas. O modelo proposto levou a conclusão de que diâmetros superiores a 2,5 cm começam a provocar danos permanentes nos telhados cerâmicos, o que está de acordo com o conhecimento empírico e a literatura relacionada com este assunto.

O modelo estatístico demonstrou que telhas cerâmicas francesas novas com absorção de 16,6%, carga de ruptura à flexão de 1.194 N e 3,3 kg de massa saturada resistem a impactos de gelo até 4,11 cm em média, enquanto telhas, com percentuais de absorção de 27,21%, valores de carga de ruptura à flexão de 518,31 N e 2,26 kg de saturada reduzem esta resistência para diâmetros de 2,31 cm, ou seja, cerca de 45% de redução na sua resistência a impactos.

Pode-se estimar que telhas cerâmicas com valores limites de flexão de 1000N, absorção de 20% e massa saturada de 2,5 kg não irão resistir a um impacto de granizo da ordem de 3,32 cm.

Um percentual de absorção de 7% acima do limite normativo de 20%, possibilita também um declínio de 20% de resistência ao impacto, pois, quanto mais poroso o material menor a sua resistência mecânica e, portanto, menor a sua capacidade de absorver a energia de impacto.

A idade do telhado não interferiu significativamente na resistência ao impacto de granizo, mas sugeriu alterações nas características físicas das telhas, principalmente absorção, que determinaram a sua resistência ao impacto de granizo.

Sugerem-se, para prosseguimento deste trabalho, algumas alternativas de trabalhos futuros. Melhoria da abertura da válvula de saída do ensaio de impacto para

análise das telhas a fim de diminuir a interferência humana na velocidade de lançamento. Estudo de outras tipologias de telhas submetidas ao impacto com diferentes idades. Análise microscópica das telhas após esforços de impactos, e o desenvolvimento de materiais alternativos (compósitos) com características de alto valor de carga de ruptura à flexão, baixa absorção de água que possam ser utilizados em telhados.

## REFERÊNCIAS

“R. Dep. Heitor Alencar Furtado - Campina do Siqueira, Curitiba - PR, 81290-000” (01/09/2021). **Google Maps. Google**. Consultado em <https://www.google.com/maps/place/R.+Dep.+Heitor+Alencar+Furtado+-+Campina+do+Siqueira,+Curitiba+-+PR,+81290-000/@-25.4428746,-49.3533909,18z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x94dce21c80c40769:0xbab1708cbcbc83db!8m2!3d-25.4428836!4d-49.352737>

ANGHILERI, Marco *et al.* A survey of numerical models for hail impact analysis using explicit finite element codes. **International Journal of Impact Engineering**, v. 31, n. 8, p. 929-944, 2005.

ANSI (American National Standards Institute). **FM 4473** – Test Standard of Impact Resistance of Testing of Rigid Roofing Materials by impacting with Freezer Ice Balls. 2011.

ANSI (American National Standards Institute). **UL 2218** – Impact Resistance of Prepared Roof Covering Materials. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA (ABCERAM). Considerações Gerais. **Cerâmica no Brasil**. 2019 b. Disponível em: <https://abceram.org.br/consideracoes-gerais/>. Acesso em: 16 dez. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA (ABCERAM). Considerações Gerais. **Cerâmica no Brasil**. 2019 c. Disponível em: <https://abceram.org.br/processo-de-fabricacao/>. Acesso em: 16 dez. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA (ABCERAM). Considerações Gerais. **Cerâmica no Brasil**. 2019 d. Disponível em: [https://abceram.org.br/ceramica-vermelha\\_/](https://abceram.org.br/ceramica-vermelha_/). Acesso em: 16 dez. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA (ABCERAM). **Definição e Classificação**. 2019 a. Disponível em: <https://abceram.org.br/definicao-e-classificacao/>. Acesso em: 15 dez. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13818**: Placas Cerâmicas para Revestimento – Especificação e Métodos de Ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15310**: Componentes cerâmicos - Telhas - Terminologia, requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.



ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1**: Norma de Desempenho de Edificações – Parte 1 – Prazos de vida útil de projetos de sistemas de coberturas. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-5**: Norma de Desempenho de Edificações – Parte 5 – Anexo “C”. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 148 - 1**: Materiais metálicos – Ensaio de impacto por pêndulo Charpy. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA (ANICER). **Dados do Setor**. 2019. Disponível em: <https://www.anicer.com.br/anicer/setor/>. Acesso em 17 dez. 2019.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA (ANICER). **Relatório Anual**. 2011. Disponível em: [https://www.anicer.com.br/wp-content/uploads/2016/11/relatorio\\_2011.pdf](https://www.anicer.com.br/wp-content/uploads/2016/11/relatorio_2011.pdf). Acesso em: 14 nov. 2019.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA (ANICER). **Telhas Cerâmicas - Manual técnico**. Porto Alegre, 2000.

ASTM D3746, Standard Test Method for Impact Resistance of Bituminous Roofing Systems. 2015

AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. 13ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010 332 p.;

BASTOS, F. A. **Avaliação do processo de fabricação de telhas e blocos cerâmicos visando a certificação do produto**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

CECIL, D.J.; BLANKENSHIP, C. B. **Toward a global climatology of severe hailstorms as estimated by satellite microwave imagers**. Journal of Climate, v.25, n.2, p.687-703, 2012

CRENSHAW, V.; KOONTZ, J. D. **Simulated Hail Damage and Impact Resistance Test Procedures for Roof Coverings and Membranes**. Dallas, Texas, 2000.

CRUZ, Hélder Maurício Antunes; AGUIAR, J. L. Patologias em pavimentos e cobertura de edifícios. 2009.

DANTAS, Rubens Alves. **Engenharia de Avaliações: uma introdução à metodologia científica**. Pini, 2005.

ELSSIED, Nadir Omer Fadl; IBRAHIM, Othman; OSMAN, Ahmed Hamza. A novel feature selection based on one-way anova f-test for e-mail spam classification. **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**, v. 7, n. 3, p. 625-638, 2014.

FARRENY, Ramon *et al.* Roof selection for rainwater harvesting: quantity and quality assessments in Spain. **Water research**, v. 45, n. 10, p. 3245-3254, 2011.

FERREIRA, Joaquim José Antunes. **Reabilitação de coberturas em tribunais**. 2009. Tese de Doutorado.

FLÜELER, Peter *et al.* Hail impact resistance of building materials testing, evaluation and classification. In: **11DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components ISTANBUL. Turkey: Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey**. 2008.

FONSECA, J. F.; FERNÁNDEZ, T. H.; BERNARDIN, A. M. **Manual para a produção de cerâmica vermelha**. Florianópolis: UFSC/SEBRAE, 1994.

GARCEZ, Nuno *et al.* Pathology, diagnosis and repair of pitched roofs with ceramic tiles: Statistical characterisation and lessons learned from inspections. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 807-819, 2012.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A.; **Ensaio de Materiais**. 2.ed. Rio de GONÇALVES, Luísa *et al.* Assessment of the state of conservation of buildings through roof mapping using very high spatial resolution images. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 8, p. 2795-2802, 2009.

GRAHAM, Mark S. Concerns with Impact Testing. **Professional Roofing**, v. 38, n. 10, p. 24, 2008.

GREENFELD, Sidney H. **Hail resistance of roofing products**. Building Research Division, US Institute for Applied Technology, 1969.

GRIMMER, Anne E. **The preservation and repair of historic clay tile roofs**. US Department of the Interior, National Park Service, Cultural Resources, Preservation Assistance, 1993.

GRÜNAUER, Andreas; VINCZE, Markus. Using dimension reduction to improve the classification of high-dimensional data. **arXiv preprint arXiv:1505.06907**, 2015.

HASSANAIN, M. A.; FROESE, T. M.; VANIER, D. J. Information analysis for roofing systems maintenance management integrated system. In: **Proceedings of the 8 th International Conference on Durability of Building Components and Materials**. 1999. p. 2677-2687.

IDROGO, Aurelia Altemira Acuna; DA CUNHA BEZERRA, Maria Clara; ACUÑA, Gioconda Sunción. Estudo sobre os desperdícios presentes no processo de fabricação de telhas em uma indústria de cerâmica vermelha. **Brazilian Journal of Business**, v. 1, n. 3, p. 1087-1103, 2019.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Fabricação de produtos cerâmicos não-refratários para uso estrutural na construção**. 2008. Disponível em: <https://www.anicer.com.br/anicer/setor/dados-oficiais/>. Acesso em 17 dez. 2019.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Cobertura com estrutura de madeira e telhados com telhas cerâmicas – Manual de Execução**. Divisão de Edificações, São Paulo: IPT, 1988. 59p.

ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). **Materiais de construção civil e princípios de ciências e engenharia de materiais**. Ibracon, 2007.

JEON, Jong-Su; SHAFIEEZADEH, Abdollah; DESROCHES, Reginald. Statistical models for shear strength of RC beam-column joints using machine-learning techniques. **Earthquake engineering & structural dynamics**, v. 43, n. 14, p. 2075-2095, 2014.

KOONTZ, Jim D.; HUTCHINSON, Thomas W.; RCI, RRC. Hail Impact Testing of EPDM Roof Assemblies. In: **RCI 24th International Convention and Trade Show, March**. 2009. p. 12-19.

KUTNER, M. H. *et al.* Standardized multiple regression model. **Applied linear statistical models**, v. 5, p. 271-277, 2005.

LI, Wenbin *et al.* Characterization of zirconia specimens fabricated by ceramic on-demand extrusion. **Ceramics International**, v. 44, n. 11, p. 12245-12252, 2018.

LIN, Lily; SHERMAN, Paul D. Cleaning data the Chauvenet way. **The Proceedings of the SouthEast SAS Users Group, SESUG Proceedings, Paper SA11**, p. 1-11, 2007.

LOUNIS, Z.; VANIER, D. J.; LACASSE, M. A. A discrete stochastic model for performance prediction of roofing systems. In: **Proc. CIB World Congress**. 1998. p. 203-313.

LOUZICH, K. M. D. *et al.* Absortância de telhas cerâmicas novas e deterioradas pela exposição às intempéries: impacto no desempenho térmico das edificações. In: XVI ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2016, São Paulo. **Anais...** 2016.

MANGHI, Roberto F.; PAULA, Gilberto A.; CYSNEIROS, Francisco José A. On elliptical multilevel models. **Journal of Applied Statistics**, v. 43, n. 12, p. 2150-2171, 2016.

MARSHALL, Timothy P. *et al.* Hail damage to tile Roofing. In: **22nd conference on severe local storms**. 2004.

MELO, M.M.; LANNA; C.A.F. **Telhas Cerâmicas**. Como Construir. Técnica. São Paulo, 2002.

MISHRA, Prabhaker *et al.* Application of student's t-test, analysis of variance, and covariance. **Annals of cardiac anaesthesia**, v. 22, n. 4, p. 407, 2019.

MORGADO, J. *et al.* Maintenance planning of pitched roofs in current buildings. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 143, n. 7, p. 05017010, 2017.

MOTTA, R. S. **Manual para valoração econômica de recursos ambientais**. Rio de Janeiro, IPEA/MMA/PNUD/CNPq, 1997.

National Roofing Contractors Association (NRCA). USA, 2000.

PBQP-H (Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat). **Princípios e Objetivos**. 2019. Disponível em: [http://pbqp-h.mdr.gov.br/projetos\\_simac.php](http://pbqp-h.mdr.gov.br/projetos_simac.php). Acesso em: 22 dez. 2019.

PERERA, Shihara *et al.* Probabilistic modelling of forces of hail. **Natural hazards**, v. 91, n. 1, p. 133-153, 2018.

PIRES, Ana M.; BRANCO, João A. Introdução aos Métodos Estatísticos Robustos. 2007.

PLONSKY, Luke. Study quality in quantitative L2 research (1990–2010): A methodological synthesis and call for reform. **The Modern Language Journal**, v. 98, n. 1, p. 450-470, 2014.

PLONSKY, Luke. Study quality in SLA: An assessment of designs, analyses, and reporting practices in quantitative L2 research. **Studies in Second Language Acquisition**, v. 35, n. 4, p. 655-687, 2013.

PORTAL G1. Chuva com granizo destelha casas e causa queda de árvores em Piratuba. G1 SC, Santa Catarina, 13 out. 2014. Disponível em: <http://g1.globo.com/sc/santa-catarina/noticia/2014/10/chuva-com-granizo-destelha-casas-e-causa-queda-de-arvores-em-piratuba.html>. Acesso em: 12 jan. 2020.

PRIETO, A. J. et al. The influence of pathological situations on churches' functionality: An approach based on historical records. **International Journal of Architectural Heritage**, v. 11, n. 4, p. 566-587, 2017.

PSQ (Programa Setorial da Qualidade). **Projetos. Sistemas de Qualificação de Empresas de Materiais, Componentes e Sistemas Construtivos SiMaC**. 2018. Disponível em: [http://pbqp-h.mdr.gov.br/projetos\\_simac\\_psqqs.php](http://pbqp-h.mdr.gov.br/projetos_simac_psqqs.php). Acesso em: 10 dez. 2018.

PUCIK, Tomas *et al.* Large hail incidence and its economic and societal impacts across Europe. **Monthly Weather Review**, v. 147, n. 11, p. 3901-3916, 2019.

QAMAR, Ali Mustafa; ALASSAF, Manar. Improving Sentiment Analysis of Arabic Tweets by One-Way ANOVA. **Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences**, 2020.

QUEIRÓS, Andreia; PAIVA, Anabela; PINTO, Jorge. Pathologies in old buildings of the historic city center of Vila Real. In: **8th International Conference on Safety and Durability of Structures**. 2018. p. 25.

RAMOS, Rui *et al.* Methodology for the service life prediction of ceramic claddings in pitched roofs. **Construction and Building Materials**, v. 166, p. 386-399, 2018.

RIPPER, E. **Manual prático de materiais de construção**. São Paulo: Pini, 1995.

RODRIGUES, Sandra Cristina Antunes. **Modelo de regressão linear e suas aplicações**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade da Beira Interior.

S2ID (Sistema Integrado de Informações sobre Desastres). **Avaliação de Danos**. 2020. Disponível em: <https://s2id.mi.gov.br/paginas/index.xhtml>. Acesso em: 12 jan. 2020.

SAINI, Dikshant; SHAFEI, Behrouz. Prediction of extent of damage to metal roof panels under hail impact. **Engineering Structures**, v. 187, p. 362-371, 2019.

SANTOS, P. S. **Ciência e Tecnologia de Argilas**. v.1. 2ª edição. São Paulo: Edgar Blücher, 1989.

SHOHET, Igal M.; PACIUK, Monica. Service life prediction of exterior cladding components under standard conditions. **Construction Management and Economics**, v. 22, n. 10, p. 1081-1090, 2004.

SILVA, A.; DE BRITO, Jorge; GASPARGAR, P. L. Service life prediction model applied to natural stone wall claddings (directly adhered to the substrate). **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 9, p. 3674-3684, 2011.

SILVEIRA, F. L. Velocidade das pedras de Granizo - **Instituto de Física – UFRGS**, Rio Grande do Sul, outubro, 2015

SOUSA, Áurea. O papel da distribuição normal na Estatística. **Correio dos Açores**, p. 14-14, 2019.

SPERLING, V. B. **Processos físicos e elétricos das tempestades de granizo na região sul do Brasil**. Tese de Doutorado em Meteorologia - INPE – São José dos Campos. 2018.

STAHLE, Lar; SVANTE Wold. Analysis of variance (ANOVA). **Chemometrics and intelligent laboratory systems**, v. 6, n. 4, p. 259-272, 1989.

TEIXEIRA, M. C. **Proposta para análise da resistência de telhas de cerâmica, fibrocimento, cerâmicas e de concreto quando submetidas a chuvas de granizo**. 2017. Monografia (Pós-graduação em Patologias das Construções) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

TEIXEIRA, M. S.; SATYAMURTY, P. **Episódios de chuvas intensas na região sul do Brasil**. Parte I: Configuração sinópticas associadas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 13. Fortaleza. Anais. 2004. CD-ROM. On-line. (INPE-12104-PRE/7450). Disponível em: Acesso em: 21 dez. 2019.

TOMAZETTI, R.R. **Análise da produção de cerâmica vermelha da região central do estado do Rio Grande do Sul**. 2003. 207 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

UZ, M. E.; YALDIZ, Y. RETRACTED ARTICLE: Experimental Determination of Effects of Impact Inducing Characteristics of Natural Hailstones. **Experimental Techniques**, v. 44, n. 4, p. 529-529, 2020.

WALLACE, John M; HOBBS, Peter V. **Atmospheric science**: an introductory survey. 2nd ed. Burlington, MA: Academic Press, c2006. 483 p.;

WASSERSTEIN, Ronald L.; LAZAR, Nicole A. The ASA statement on p-values: context, process, and purpose. 2016.

WHITLEY, Elise; BALL, Jonathan. Statistics review 5: Comparison of means. **Critical Care**, v. 6, n. 5, p. 1-5, 2002.

















## APÊNDICE B

### TABELA DE RESÍDUOS DE DADOS DA AMOSTRA

(continua)

Dado	Valor Observado	Valor Calculado	Resíduo	Resíduo Relativo	Resíduo / Desvio Padrão	Varição Total	Varição Residual	Varição Explicada
172	4,3	4,03	0,27	6,35%	1,16	3,83%	0,91%	4,67%
166	4,26	4,02	0,24	5,70%	1,03	3,58%	0,72%	4,40%
164	4,25	4,03	0,22	5,13%	0,93	3,52%	0,58%	4,36%
168	4,15	3,78	0,37	8,88%	1,57	2,92%	1,67%	3,28%
171	4,06	4,04	0,02	0,57%	0,1	2,44%	0,01%	3,13%
170	4,06	3,9	0,16	3,84%	0,66	2,44%	0,30%	3,05%
163	4,05	4,3	-0,25	-6,06%	-1,05	2,39%	0,74%	2,86%
169	4,05	3,78	0,27	6,63%	1,14	2,39%	0,88%	2,82%
105	4,03	3,62	0,41	10,20%	1,75	2,28%	2,07%	2,35%
167	4,03	4,33	-0,3	-7,34%	-1,26	2,28%	1,07%	2,63%
42	3,98	3,62	0,36	9,02%	1,53	2,04%	1,58%	2,17%
123	3,88	3,58	0,3	7,61%	1,26	1,60%	1,07%	1,75%
130	3,85	3,66	0,19	4,88%	0,8	1,47%	0,43%	1,77%
129	3,84	3,49	0,35	9,12%	1,49	1,43%	1,51%	1,41%
107	3,84	3,64	0,2	5,13%	0,84	1,43%	0,48%	1,71%
121	3,8	3,43	0,37	9,82%	1,59	1,28%	1,71%	1,16%
116	3,8	3,55	0,25	6,68%	1,08	1,28%	0,79%	1,42%
162	3,79	3,9	-0,11	-3,01%	-0,49	1,24%	0,16%	1,55%
109	3,75	3,52	0,23	6,03%	0,96	1,10%	0,63%	1,24%
32	3,75	3,37	0,38	10,16%	1,62	1,10%	1,78%	0,90%
114	3,74	3,64	0,1	2,72%	0,43	1,07%	0,13%	1,33%
40	3,72	3,76	-0,04	-1,14%	-0,18	1,00%	0,02%	1,28%
54	3,67	3,21	0,46	12,56%	1,96	0,84%	2,61%	0,33%
44	3,66	3,35	0,31	8,48%	1,32	0,81%	1,18%	0,70%
50	3,66	3,3	0,36	9,73%	1,52	0,81%	1,55%	0,60%
128	3,65	3,61	0,04	0,99%	0,15	0,78%	0,02%	1,00%
37	3,63	3,34	0,29	8,09%	1,25	0,72%	1,06%	0,63%
113	3,61	3,74	-0,13	-3,61%	-0,55	0,67%	0,21%	0,80%
117	3,59	3,56	0,03	0,95%	0,15	0,61%	0,01%	0,79%
81	3,58	3,22	0,36	10,09%	1,54	0,59%	1,60%	0,30%
126	3,57	3,52	0,05	1,30%	0,2	0,56%	0,03%	0,72%
104	3,53	3,66	-0,13	-3,80%	-0,57	0,47%	0,22%	0,54%
46	3,51	3,37	0,14	3,98%	0,6	0,42%	0,24%	0,48%
124	3,49	3,54	-0,05	-1,37%	-0,2	0,38%	0,03%	0,48%
35	3,48	3,3	0,18	5,19%	0,77	0,36%	0,40%	0,35%
48	3,48	3,35	0,13	3,71%	0,55	0,36%	0,20%	0,41%
115	3,47	3,55	-0,08	-2,24%	-0,33	0,34%	0,07%	0,42%
77	3,47	3,3	0,17	4,96%	0,73	0,34%	0,36%	0,34%

(continua)

Dado	Valor Observado	Valor Calculado	Residuo	Residuo Relativo	Residuo / Desvio Padrão	Varição Total	Varição Residual	Varição Explicada
61	3,45	3,31	0,14	4,08%	0,6	0,31%	0,24%	0,32%
63	3,42	3,18	0,24	6,88%	1	0,25%	0,68%	0,13%
122	3,41	3,62	-0,21	-6,12%	-0,89	0,24%	0,53%	0,15%
74	3,41	3,34	0,07	2,01%	0,29	0,24%	0,06%	0,29%
127	3,4	3,65	-0,25	-7,39%	-1,07	0,22%	0,77%	0,06%
47	3,39	3,3	0,09	2,54%	0,37	0,21%	0,09%	0,24%
110	3,39	3,42	-0,03	-0,80%	-0,12	0,21%	0,01%	0,26%
79	3,37	3,33	0,04	1,13%	0,16	0,18%	0,02%	0,22%
36	3,36	3,47	-0,11	-3,24%	-0,46	0,16%	0,15%	0,17%
30	3,36	3,31	0,05	1,38%	0,2	0,16%	0,03%	0,20%
53	3,32	3,19	0,13	3,98%	0,56	0,11%	0,21%	0,09%
38	3,32	3,19	0,13	3,98%	0,56	0,11%	0,21%	0,09%
57	3,3	3,18	0,12	3,78%	0,53	0,09%	0,19%	0,06%
84	3,28	3,08	0,2	6,01%	0,84	0,07%	0,48%	-0,04%
78	3,28	3,28	0	0,00%	0	0,07%	0,00%	0,09%
68	3,28	3,27	0,01	0,29%	0,04	0,07%	0,00%	0,09%
41	3,28	3,29	-0,01	-0,44%	-0,06	0,07%	0,00%	0,09%
45	3,27	3,33	-0,06	-1,93%	-0,27	0,07%	0,05%	0,07%
24	3,26	2,89	0,37	11,49%	1,6	0,06%	1,72%	-0,42%
29	3,25	3,37	-0,12	-3,60%	-0,5	0,05%	0,17%	0,02%
49	3,23	3,3	-0,07	-2,29%	-0,32	0,04%	0,07%	0,03%
55	3,22	3,18	0,04	1,24%	0,17	0,03%	0,02%	0,03%
106	3,21	3,54	-0,33	-10,17%	-1,39	0,02%	1,31%	-0,34%
64	3,19	3,22	-0,03	-0,90%	-0,12	0,02%	0,01%	0,02%
103	3,18	3,49	-0,31	-9,69%	-1,31	0,01%	1,16%	-0,32%
8	3,17	2,7	0,47	14,68%	1,98	0,01%	2,66%	-0,75%
65	3,16	3,22	-0,06	-1,76%	-0,24	0,01%	0,04%	0,00%
118	3,14	3,57	-0,43	-13,55%	-1,81	0,00%	2,22%	-0,63%
67	3,12	3,17	-0,05	-1,56%	-0,21	0,00%	0,03%	-0,01%
17	3,11	2,74	0,37	11,87%	1,57	0,00%	1,67%	-0,48%
58	3,1	3,28	-0,18	-5,76%	-0,76	0,00%	0,39%	-0,11%
25	3,1	2,87	0,23	7,47%	0,99	0,00%	0,66%	-0,19%
11	3,1	2,92	0,18	5,67%	0,75	0,00%	0,38%	-0,11%
16	3,08	2,84	0,24	7,92%	1,04	0,00%	0,73%	-0,20%
76	3,07	3,33	-0,26	-8,58%	-1,12	0,01%	0,85%	-0,24%
39	3,07	3,36	-0,29	-9,36%	-1,22	0,01%	1,01%	-0,28%
155	3,06	2,64	0,42	13,77%	1,79	0,01%	2,18%	-0,61%
86	3,06	3,07	-0,01	-0,48%	-0,06	0,01%	0,00%	0,01%
52	3,05	3,38	-0,33	-10,66%	-1,39	0,01%	1,30%	-0,36%
98	3,04	2,98	0,06	1,88%	0,24	0,02%	0,04%	0,01%
51	3,03	3,3	-0,27	-9,00%	-1,16	0,02%	0,91%	-0,24%
99	3,02	3	0,02	0,75%	0,1	0,03%	0,01%	0,03%

(continua)

Dado	Valor Observado	Valor Calculado	Residuo	Resíduo Relativo	Resíduo / Desvio Padrão	Varição Total	Varição Residual	Varição Explicada
102	3,02	3,18	-0,16	-5,40%	-0,69	0,03%	0,33%	-0,06%
101	3,01	3,06	-0,05	-1,67%	-0,21	0,03%	0,03%	0,03%
56	3,01	3,17	-0,16	-5,32%	-0,68	0,03%	0,31%	-0,05%
59	2,99	3,15	-0,16	-5,38%	-0,69	0,04%	0,32%	-0,04%
131	2,98	3,41	-0,43	-14,34%	-1,82	0,05%	2,24%	-0,58%
18	2,97	2,68	0,29	9,69%	1,23	0,06%	1,01%	-0,22%
97	2,96	3,07	-0,11	-3,66%	-0,46	0,07%	0,14%	0,04%
90	2,95	3,14	-0,19	-6,59%	-0,83	0,08%	0,46%	-0,04%
70	2,93	3,03	-0,1	-3,58%	-0,45	0,09%	0,13%	0,08%
27	2,93	2,74	0,19	6,54%	0,82	0,09%	0,45%	-0,01%
147	2,93	2,55	0,38	12,93%	1,61	0,09%	1,76%	-0,38%
62	2,91	3,18	-0,27	-9,11%	-1,13	0,12%	0,86%	-0,10%
13	2,91	2,66	0,25	8,49%	1,05	0,12%	0,75%	-0,07%
60	2,91	3,24	-0,33	-11,27%	-1,4	0,12%	1,32%	-0,23%
142	2,89	2,59	0,3	10,27%	1,26	0,14%	1,08%	-0,13%
15	2,88	2,74	0,14	4,98%	0,61	0,15%	0,25%	0,12%
93	2,87	3,11	-0,24	-8,43%	-1,03	0,16%	0,72%	0,01%
95	2,87	3,04	-0,17	-5,79%	-0,71	0,16%	0,34%	0,12%
20	2,87	2,78	0,09	3,17%	0,39	0,16%	0,10%	0,18%
7	2,86	2,55	0,31	10,71%	1,3	0,18%	1,15%	-0,10%
21	2,85	2,77	0,08	2,69%	0,33	0,19%	0,07%	0,23%
80	2,83	3,18	-0,35	-12,19%	-1,47	0,22%	1,46%	-0,13%
136	2,83	2,44	0,39	13,78%	1,66	0,22%	1,87%	-0,25%
71	2,81	2,92	-0,11	-3,87%	-0,46	0,26%	0,15%	0,29%
94	2,81	3,14	-0,33	-11,61%	-1,39	0,26%	1,30%	-0,05%
4	2,8	2,76	0,04	1,54%	0,18	0,27%	0,02%	0,34%
158	2,8	2,6	0,2	7,21%	0,86	0,27%	0,50%	0,21%
72	2,79	3,17	-0,38	-13,46%	-1,6	0,29%	1,73%	-0,12%
19	2,78	2,88	-0,1	-3,72%	-0,44	0,31%	0,13%	0,36%
14	2,78	2,83	-0,05	-1,77%	-0,21	0,31%	0,03%	0,39%
2	2,78	2,72	0,06	2,02%	0,24	0,31%	0,04%	0,39%
28	2,77	2,65	0,12	4,20%	0,5	0,33%	0,17%	0,37%
83	2,77	3,04	-0,27	-9,78%	-1,15	0,33%	0,90%	0,16%
87	2,77	3,01	-0,24	-8,73%	-1,03	0,33%	0,72%	0,21%
88	2,77	2,96	-0,19	-6,99%	-0,82	0,33%	0,46%	0,29%
73	2,76	3,13	-0,37	-13,29%	-1,56	0,35%	1,65%	-0,03%
96	2,76	3,01	-0,25	-8,95%	-1,05	0,35%	0,75%	0,23%
134	2,75	2,46	0,29	10,40%	1,22	0,37%	1,00%	0,18%
92	2,75	3,03	-0,28	-10,17%	-1,19	0,37%	0,96%	0,19%
10	2,75	2,9	-0,15	-5,33%	-0,62	0,37%	0,26%	0,39%
66	2,75	3,19	-0,44	-15,88%	-1,86	0,37%	2,34%	-0,20%
22	2,75	2,8	-0,05	-1,87%	-0,22	0,37%	0,03%	0,46%



(conclusão)

Dado	Valor Observado	Valor Calculado	Resíduo	Resíduo Relativo	Resíduo / Desvio Padrão	Varição Total	Varição Residual	Varição Explicada
139	2,74	2,59	0,15	5,30%	0,62	0,39%	0,26%	0,42%
12	2,72	2,72	0	-0,05%	-0,01	0,43%	0,00%	0,55%
146	2,71	2,48	0,23	8,36%	0,97	0,45%	0,63%	0,40%
6	2,71	2,73	-0,02	-0,91%	-0,1	0,45%	0,01%	0,58%
132	2,68	2,63	0,05	1,92%	0,22	0,52%	0,03%	0,66%
100	2,67	3,07	-0,4	-14,98%	-1,7	0,54%	1,96%	0,14%
1	2,67	2,75	-0,08	-3,07%	-0,35	0,54%	0,08%	0,67%
133	2,65	2,53	0,12	4,46%	0,5	0,59%	0,17%	0,71%
5	2,63	2,84	-0,21	-7,86%	-0,88	0,64%	0,52%	0,68%
156	2,63	2,47	0,16	5,94%	0,67	0,64%	0,30%	0,74%
89	2,63	3,02	-0,39	-14,89%	-1,67	0,64%	1,88%	0,29%
9	2,62	2,69	-0,07	-2,78%	-0,31	0,67%	0,07%	0,85%
150	2,61	2,51	0,1	3,98%	0,44	0,70%	0,13%	0,86%
85	2,6	3,02	-0,42	-16,03%	-1,78	0,73%	2,13%	0,32%
148	2,57	2,5	0,07	2,62%	0,29	0,81%	0,06%	1,03%
135	2,56	2,53	0,03	1,16%	0,13	0,84%	0,01%	1,08%
154	2,55	2,53	0,02	0,90%	0,1	0,87%	0,01%	1,12%
145	2,5	2,62	-0,12	-4,89%	-0,52	1,04%	0,18%	1,28%
157	2,49	2,52	-0,03	-1,29%	-0,14	1,07%	0,01%	1,37%
149	2,45	2,53	-0,08	-3,14%	-0,33	1,21%	0,07%	1,54%
140	2,42	2,48	-0,06	-2,62%	-0,27	1,32%	0,05%	1,69%
144	2,38	2,58	-0,2	-8,21%	-0,83	1,48%	0,47%	1,77%
141	2,36	2,56	-0,2	-8,51%	-0,86	1,56%	0,49%	1,87%
137	2,32	2,55	-0,23	-9,96%	-0,98	1,73%	0,66%	2,04%
151	2,31	2,62	-0,31	-13,31%	-1,31	1,77%	1,16%	1,95%
161	2,31	2,51	-0,2	-8,76%	-0,86	1,77%	0,50%	2,14%
160	2,29	2,43	-0,14	-6,12%	-0,6	1,86%	0,24%	2,33%
143	2,26	2,61	-0,35	-15,60%	-1,5	2,00%	1,52%	2,14%
159	2,2	2,46	-0,26	-11,78%	-1,1	2,29%	0,82%	2,71%
138	2,18	2,42	-0,24	-11,04%	-1,02	2,39%	0,71%	2,88%
153	2,08	2,51	-0,43	-20,79%	-1,84	2,93%	2,29%	3,11%

Fonte: autor

## APÊNDICE C

### ANOVA E TESTE T DE STUDENT

**Tabela 19 – ANOVA para carga de ruptura à flexão (5 anos)**

#### RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Nova	5	5477,42	1095,484	80380,73
5 anos	5	2933,93	586,786	803,7738

#### ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	646934,138	1	646934,138	15,93738	0,0039932	5,31765507
Dentro dos grupos	324738,0248	8	40592,25311			
Total	971672,1629	9				

Fonte: autor

**Tabela 20 – Teste t de Student para carga de ruptura à flexão (5 anos)**

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes

	<i>Nova</i>	<i>5 anos</i>
Média	1095,484	586,786
Variância	80380,73243	803,77378
Observações	5	5
Hipótese da diferença de média	0	
gl	4	
Stat t	3,99216475	
P(T<=t) bi-caudal	0,016235624	
t crítico bi-caudal	2,776445105	

Fonte: autor

Tabela 21 – ANOVA para carga de ruptura à flexão (25 anos)

RESUMO				
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Nova	5	5477,42	1095,484	80380,73
25 anos	5	5974,79	1194,958	73645,42

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	24737,69169	1	24737,69169	0,321214	0,586424	5,31765507
Dentro dos grupos	616104,5918	8	77013,07398			
Total	640842,2835	9				

Fonte: autor

Tabela 22 – Teste t de Student para carga de ruptura à flexão (25 anos)

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes

	<i>Nova</i>	<i>25 anos</i>
Média	1095,484	1194,958
Variância	80380,73243	73645,41552
Observações	5	5
Variância agrupada	77013,07397	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	8	
Stat t	-0,566757606	
P(T<=t) bi-caudal	0,586423994	

Fonte: autor

Tabela 23 – ANOVA para carga de ruptura à flexão (30 anos)

## RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Nova	5	5477,42	1095,484	80380,73
30 anos	4	3819,25	954,8125	1988,744

## ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	43974,37981	1	43974,37981	0,939942	0,3645906	5,59144785
Dentro dos grupos	327489,1614	7	46784,16591			
Total	371463,5412	8				

Fonte: autor

Tabela 24 – Teste t de Student para carga de ruptura à flexão (30 anos)

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes

	<i>Nova</i>	<i>30 anos</i>
Média	1095,484	954,8125
Variância	80380,73243	1988,743892
Observações	5	4
Variância agrupada	46784,16591	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	7	
Stat t	0,96950581	
P(T<=t) bi-caudal	0,364590567	

Fonte: autor

**Tabela 25 – ANOVA para carga de ruptura à flexão (34 anos)**

RESUMO				
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Nova	5	5477,42	1095,484	80380,73
34 anos	5	3646,42	729,284	3279,636

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	335256,1	1	335256,1	8,014693	0,0221153	5,31765507
Dentro dos grupos	334641,4724	8	41830,18406			
Total	669897,5724	9				

**Fonte: autor**

**Tabela 26 – Teste t de Student para carga de ruptura à flexão (34 anos)**

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes

	<i>Nova</i>	<i>34 anos</i>
Média	1095,484	729,284
Variância	80380,73243	3279,63568
Observações	5	5
Hipótese da diferença de média	0	
gl	4	
Stat t	2,831023384	
P(T<=t) bi-caudal	0,047295934	
t crítico bi-caudal	2,776445105	

**Fonte: autor**

Tabela 27 – ANOVA para carga de ruptura à flexão (45 anos)

RESUMO				
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Nova	5	5477,42	1095,484	80380,73
45 anos	5	4133,86	826,772	61353,76

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	180515,3474	1	180515,3474	2,547232	0,1491543	5,31765507
Dentro dos grupos	566937,9732	8	70867,24665			
Total	747453,3206	9				

Fonte: autor

Tabela 28 – Teste t de Student para carga de ruptura à flexão (45 anos)

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes

	<i>Nova</i>	<i>45 anos</i>
Média	1095,484	826,772
Variância	80380,73243	61353,76087
Observações	5	5
Variância agrupada	70867,24665	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	8	
Stat t	1,59600514	
P(T<=t) bi-caudal	0,149154292	

Fonte: autor

**Tabela 29 – ANOVA para carga de ruptura à flexão (50 anos)**

RESUMO				
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Nova	5	5477,42	1095,484	80380,73
50 anos	5	4133,86	826,772	61353,76

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	180515,3474	1	180515,3474	2,547232	0,1491543	5,31765507
Dentro dos grupos	566937,9732	8	70867,24665			
Total	747453,3206	9				

Fonte: autor

**Tabela 30 – Teste t de Student para carga de ruptura à flexão (50 anos)**

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes

	<i>Nova</i>	<i>50 anos</i>
Média	1095,484	826,772
Variância	80380,73243	61353,76087
Observações	5	5
Variância agrupada	70867,24665	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	8	
Stat t	1,59600514	
P(T<=t) bi-caudal	0,149154292	

Fonte: autor

## APÊNDICE D

### ANOVA E TESTE T DE STUDENT (% DE ABSORÇÃO)

Tabela 31 – ANOVA para % de absorção (5 anos)

#### RESUMO

<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Nova	5	83,01	16,602	1,66962
5 anos	5	136,07	27,214	1,50133

#### ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	281,53636	1	281,53636	177,5722481	9,6116E-07	5,317655072
Dentro dos grupos	12,6838	8	1,585475			
Total	294,22016	9				

Fonte: autor

Tabela 32 – Teste t de Student para % de absorção (5 anos)

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes

	<i>Nova</i>	<i>5 anos</i>
Média	16,602	27,214
Variância	1,66962	1,50133
Observações	5	5
Hipótese da diferença de média	0	
gl	8	
Stat t	-13,32562374	
P(T<=t) bi-caudal	9,6116E-07	
t crítico bi-caudal	2,306004135	

Fonte: autor



**Tabela 33 – ANOVA para % de absorção (25 anos)**

RESUMO				
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Nova	5	83,01	16,602	1,66962
25 anos	5	115,98	23,196	0,43803

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	108,70209	1	108,70209	103,1500391	7,5593E-06	5,317655072
Dentro dos grupos	8,4306	8	1,053825			
Total	117,13269	9				

**Fonte: autor**

**Tabela 34 – Teste t de Student para % de absorção (25 anos)**

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes

	<i>Nova</i>	<i>25 anos</i>
Média	16,602	23,196
Variância	1,66962	0,43803
Observações	5	5
Hipótese da diferença de média	0	
gl	6	
Stat t	-10,15628077	
P(T<=t) bi-caudal	5,30144E-05	
t crítico bi-caudal	2,446911851	

**Fonte: autor**

**Tabela 35 – ANOVA para % de absorção (30 anos)**

RESUMO				
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Nova	5	83,01	16,602	1,66962
30 anos	5	116,38	23,276	13,08503

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	111,35569	1	111,35569	15,09431806	0,00464096	5,317655072
Dentro dos grupos	59,0186	8	7,377325			
Total	170,37429	9				

Fonte: autor

**Tabela 36 – Teste t de Student para % de absorção (30 anos)**

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes

	<i>Nova</i>	<i>30 anos</i>
Média	16,602	23,276
Variância	1,66962	13,08503
Observações	5	5
Hipótese da diferença de média	0	
gl	5	
Stat t	-3,885140675	
P(T<=t) bi-caudal	0,011581605	
t crítico bi-caudal	2,570581836	

Fonte: autor

**Tabela 37 – ANOVA para % de absorção (34 anos)**

RESUMO				
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Nova	5	83,01	16,602	1,66962
34 anos	5	114,76	22,952	0,17977

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	100,80625	1	100,80625	109,0156754	6,1444E-06	5,317655072
Dentro dos grupos	7,39756	8	0,924695			
Total	108,20381	9				

Fonte: autor

**Tabela 38 – Teste t de Student para % de absorção (34 anos)**

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes

	<i>Nova</i>	<i>34 anos</i>
Média	16,602	22,952
Variância	1,66962	0,17977
Observações	5	5
Hipótese da diferença de média	0	
gl	5	
Stat t	-10,4410572	
P(T<=t) bi-caudal	0,000138937	
t crítico bi-caudal	2,570581836	

Fonte: autor

**Tabela 39 – ANOVA para % de absorção (45 anos)**

RESUMO				
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Nova	5	83,01	16,602	1,66962
45 anos	5	101,51	20,302	6,80737

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	34,225	1	34,225	8,074800135	0,0217577	5,317655072
Dentro dos grupos	33,90796	8	4,238495			
Total	68,13296	9				

Fonte: autor

**Tabela 40 – Teste t de Student para % de absorção (45 anos)**

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes

	<i>Nova</i>	<i>45 anos</i>
Média	16,602	20,302
Variância	1,66962	6,80737
Observações	5	5
Hipótese da diferença de média	0	
gl	6	
Stat t	-2,841619281	
P(T<=t) bi-caudal	0,029504186	
t crítico bi-caudal	2,446911851	

Fonte: autor

**Tabela 41 – ANOVA para % de absorção (50 anos)**

RESUMO				
<i>Grupo</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Nova	5	83,01	16,602	1,66962
50 anos	5	133,21	26,642	14,07127

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	252,004	1	252,004	32,01902815	0,00047668	5,317655072
Dentro dos grupos	62,96356	8	7,870445			
Total	314,96756	9				

Fonte: autor

**Tabela 42 – Teste t de Student para % de absorção (50 anos)**

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes

	<i>Nova</i>	<i>50 anos</i>
Média	16,602	26,642
Variância	1,66962	14,07127
Observações	5	5
Hipótese da diferença de média	0	
gl	5	
Stat t	-5,658535866	
P(T<=t) bi-caudal	0,002395706	
t crítico bi-caudal	2,570581836	

Fonte: autor