

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA OCEÂNICA

MODELOS PARA ESTIMATIVA DO GRAU DE SATURAÇÃO DO CONCRETO EM FUNÇÃO
DAS CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS DE DOIS MACRO AMBIENTES DISTINTOS E SUA
CONTRIBUIÇÃO NA ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL DE PROJETO

por

Felipe Favretto

Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica

Rio Grande, março, 2019

MODELOS PARA ESTIMATIVA DO GRAU DE SATURAÇÃO DO CONCRETO EM FUNÇÃO
DAS CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS DE DOIS MACRO AMBIENTES DISTINTOS E SUA
CONTRIBUIÇÃO NA ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL DE PROJETO

Por

Felipe Favretto
Engenheiro civil

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica (PPGEO) da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Área de Concentração: Engenharia Costeira

Orientador: Prof. Dr. Fábio Costa Magalhães

Co-orientador: Prof. Dr. André Tavares da Cunha Guimarães

Aprovada por:

Prof. Dr. Mauro de Vasconcellos Real
PPGEO/FURG

Prof. Dr. Antônio Marcos de Lima Alves
EE/FURG

Prof. Dr. Miguel Angel Climent Llorca
Ingenieria Civil / Universidad de Alicante

Prof. Dr. Liércio André Isoldi
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica

Rio Grande, 22 de março de 2019

"MODELOS PARA ESTIMATIVA DO GRAU DE SATURAÇÃO DO CONCRETO EM FUNÇÃO DAS CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS DE DOIS MACRO AMBIENTES DISTINTOS E SUA CONTRIBUIÇÃO NA ESTIMATIVA DE VIDA ÚTIL DE PROJETO"

Felipe Favretto

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de:

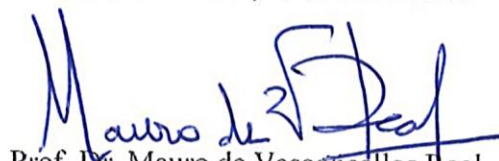
MESTRE EM ENGENHARIA OCEÂNICA

Tendo sido aprovada em sua forma final pela Coordenação de Pós Graduação em Engenharia Oceânica

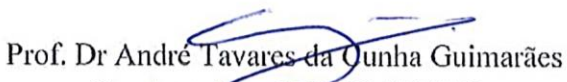

Prof. Dr. Liércio André Isoldi
Coordenador do PPGeo - FURG

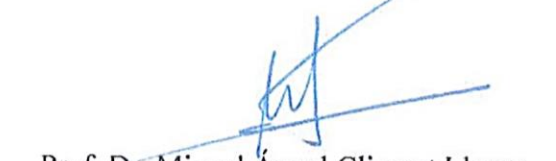
Banca Examinadora:


Prof. Dr. Fábio Costa Magalhães
Orientador – IFRS, PPGeo / FURG


Prof. Dr. Mauro de Vasconcellos Real
PPGeo / FURG


Prof. Dr. Antônio Marcos de Lima Alves
EE - FURG


Prof. Dr. André Tavares da Cunha Guimarães
Coorientador – PPGeo / FURG


Prof. Dr. Miguel Ángel Climent Llorca
Membro Externo – Universidad de Alicante

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Ao Centro de Investigación del Mar (CIMAR) da Universidade de Alicante, Espanha, por permitir a instalação da estação de exposição de testemunhos de concreto em ambiente marinho.

Aos professores Miguel Ángel Climent e Guillem De Vera da Universidade de Alicante por coletar e ceder os dados de medição do GS da estação de Santa Pola.

Ao meu orientador Fábio Costa Magalhães pela dedicação e instrução neste trabalho.

Ao meu co-orientador André Tavares da Cunha Guimarães pelo conhecimento transmitido.

Ao professor Mauro de Vasconcellos Real pela contribuição prestada.

A minha namorada Carolina pelo companheirismo no mestrado.

Ao meu pai pela parceria e apoio em todas as jornadas.

RESUMO

A garantia da durabilidade de elementos estruturais de concreto armado sujeitos a condições ambientais de severa agressividade apresenta-se como uma das principais dificuldades enfrentadas pela cadeia da construção civil. Dentre os mecanismos de deterioração de estruturas de concreto, destaca-se a corrosão das armaduras decorrente da despassivação provocada pela penetração de agentes agressivos, como o caso dos íons cloreto. A estimativa de vida útil de elementos de concreto armado surge como uma temática fundamental na avaliação da vida útil, na definição de intervenções, manutenções ou mesmo nas situações de projeto de novas estruturas. Embora outros processos resultem na penetração de íons cloreto no concreto, é praticamente consenso que a difusão é o mecanismo predominante. Um modelo clássico de modelagem da penetração de cloretos é a 2ª Lei de Fick, na qual a difusibilidade do concreto é um fator fundamental. Guimarães (2000) demonstrou que o grau de saturação (GS) do concreto é um parâmetro que exerce forte influência sobre o coeficiente de difusão de cloretos. Embora tenham sido desenvolvidas metodologias de medição do GS, estas se apresentam onerosas em termos de tempo e recursos financeiros. O objetivo deste trabalho é apresentar estimativas do grau de saturação do concreto com base nas condições ambientais a que o material é exposto e posteriormente analisar a influência deste parâmetro na avaliação da estimativa de vida de elementos estruturais. São utilizados dados meteorológicos e medições do GS obtidas em duas regiões litorâneas (Rio Grande, Brasil e Santa Pola, Espanha). Busca-se com este trabalho, obter estimativas do grau de saturação a partir das variáveis ambientais e avaliar a variabilidade do grau de saturação do concreto, permitindo contribuir para a avaliação probabilística da durabilidade de elementos estruturais de concreto armado. Obtiveram-se modelos de estimativa de GS para todas as famílias de concreto estudadas, para cada ambiente, e também para ambos os ambientes em conjunto. Através da análise probabilística pode-se constatar a grande influência do modelo de GS utilizado na estimativa de vida útil, comprovando a necessidade da correta utilização deste parâmetro.

Palavras-chaves: Concreto; Ataque por cloretos; Grau de saturação; Durabilidade.

ABSTRACT

The assurance of the reinforced concrete structural elements durability subjected to ambient conditions of severe aggressiveness it is one the majors difficulties that the civil engineer find. Among the damage mechanisms of concrete structures, the corrosion of steel reinforcement deserves a better attention. This process happens because of the depassivation, caused by the penetration of aggressive agents, as the case of the chloride ions. The estimate of useful life of the elements of the reinforced concrete appears like one of the fundamentals thematics in the avaliation of the residual useful life, in the definitions of interventions, maintenance or even in the situations that a new structure design is necessary. Although other process results in the penetration of chloride ions in the concrete, the consensus is that the diffusion is the predominant mechanism of this process. A classical model of chloride penetration is the 2nd Fick's law in which the diffusion in concrete is the fundamental factor. Guimarães (2000) showed that the saturation degree is one parameter that exerts a high influence in the chloride diffusion coefficient. Although new methods of GS measuring have been created, they are expensive in terms of time and financial resources. The aim of this research is to show estimates of the concrete saturation degree based on ambient conditions that the material is exposed and furthermore to analyze the influence of this parameter in the estimate of useful life in the structural elements. This research utilizes meteorological and GS data from two coastal areas (Rio Grande, Brazil and Santa Pola, Spain). The study will also provide estimates of the saturation degree from ambient variables and measure the saturation degree variation, which will provide a contribution to the probabilistic measure of the durability elements in reinforced concrete structures. Were obtained models for GS estimation for all concrete families studied, for each environment, and also for both environments together. Through the probabilistic analysis, we can verify the great influence of the GS model used in the estimation of useful life, demonstrating the necessity of the correct use of this parameter.

Keywords: Concrete, Chloride attack; Saturation degree; Durability.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. Considerações iniciais.....	17
1.2. Importância do tema.....	18
1.3. Justificativa	18
1.4. Objetivos	18
1.4.1. Objetivo geral.....	18
1.4.2. Objetivos específicos	19
1.5. Delimitações e pressuposto	19
1.6. Limitações da pesquisa	19
1.7. Estrutura do trabalho	19
2. DURABILIDADE E VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS EM AMBIENTE MARÍTIMO	20
2.1. Agentes agressivos	22
2.1.1. Íons cloreto.....	22
2.2. Mecanismos de transporte no concreto	23
2.2.1. Difusão	23
2.3. Modelos de iniciação pelo ataque de íons cloreto.....	25
2.3.1. Iniciação por difusão	26
2.3.2. Coeficiente de difusão de cloretos	27
Tipo de cimento	27
Adições.....	28
Relação água cimento.....	28
Cura do concreto	29
Temperatura Ambiente	29
Umidade	30
2.3.3. Grau de saturação do concreto e sua influência no coeficiente de difusão de cloretos	30
2.3.4. Variáveis ambientais que influenciam o grau de saturação do concreto	40
2.4. Confiabilidade aplicada à avaliação da vida útil de serviço no estado limite de serviço	40
2.4.1. Conceitos de confiabilidade estrutural	41
2.4.2. Método de Simulação de Monte Carlo (MCS)	42
2.4.3. Critério de falha	43
3. METODOLOGIA	45
3.1. Ambientes de estudo	45
3.1.1. Estação de Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brasil	45
3.1.2. Estação de Santa Pola, Alicante, Espanha.....	47
3.2. Testemunhos utilizados	49
3.2.1. Caracterização dos testemunhos utilizados em Rio Grande	49

3.2.2. Caracterização dos testemunhos utilizados em Santa Pola, Alicante.....	51
3.1. Obtenção e compilação dos dados	52
3.2. Correlação (r)	54
3.3. Regressão linear simples e múltipla.....	54
3.4. Erro dos modelos	55
3.5. Aplicação probabilística.....	56
3.5.1. Modelagem do mecanismo de penetração de cloretos.....	56
3.5.2. Dados utilizados para a calibração do modelo.....	57
3.6. Resumo da metodologia adotada	59
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	60
4.1. Correlação (r).....	60
4.2. Regressão linear simples.....	68
4.3. Regressão linear múltipla.....	71
4.4. Erro dos modelos	75
4.5. Aplicação probabilística.....	78
4.5.1. Modelagem do mecanismo de penetração de cloretos.....	78
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	89
5.1. Principais conclusões	89
5.2. Sugestão para trabalhos futuros	90
6. REFERÊNCIAS.....	91
APÊNDICE A1 – Gráficos de dispersão e regressão linear simples, estação de Rio Grande para médias semanais das variáveis.....	98
APÊNDICE A2 – Gráficos de dispersão e regressão linear simples, estação de Rio Grande para médias sazonais das variáveis.....	106
APÊNDICE B1 – Gráficos de dispersão e regressão linear simples, estação de Santa Pola, Alicante para médias semanais das variáveis.....	114
APÊNDICE B2 – Gráficos de dispersão e regressão linear simples, estação de Santa Pola, Alicante para médias sazonais das variáveis.....	116
APÊNDICE C1 – Gráficos de dispersão e regressão linear simples, estação de Santa pola, Alicante e estação de Rio Grande para médias semanais de CPs iguais.....	118
APÊNDICE C2 – Gráficos de dispersão e regressão linear simples, estação de Santa pola, Alicante e estação de Rio Grande para médias sazonais de CPs iguais.....	120
APÊNDICE D – Tabelas estatísticas e coeficientes da regressão linear múltipla estação de Rio Grande para médias sazonais das variáveis.....	122
APÊNDICE E – Tabelas estatísticas e coeficientes da regressão linear múltipla estação de Santa Pola, Alicante para médias sazonais das variáveis.....	130
APÊNDICE F – Tabelas estatísticas e coeficientes da regressão linear múltipla para dados	

agrupados da estação de Rio Grande e da estação de Santa Pola, Alicante para médias sazonais das variáveis.	132
---	-----

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Vida útil da estrutura pelo processo de corrosão (Fonte: Tuutti, 1980).	21
Figura 2.2- Zonas de agressividade marinha às estruturas de concreto armado (Fonte: Lima e Morelli, 2016).	21
Figura 2.3- Perfil de concentrações para o estado estacionário (Fonte: Adaptado de Jastrzebski, 1987).	24
Figura 2.4- Perfil de concentrações para o regime não estacionário (Fonte: Jastrzebski, 1987).	25
Figura 2.5- Modelos matemáticos de determinação do processo de iniciação da corrosão de armaduras ocasionado pela ação de íons cloretos (Fonte: Magalhães, 2018).	26
Figura 2.6- Coeficiente efetivo de difusão de cloretos em relação ao fator água cimento (Fonte: Macdonald e Northwood, 1995).	29
Figura 2.7- Redes de poros da pasta de cimento endurecida com diferentes valores de GS (Fonte: Guimarães, 2000).	31
Figura 2.8- Valores médios do coeficiente de difusão efetivo em função do GS e intervalo de confiança de 95 % do GS (Fonte: Guimarães, 2000).	32
Figura 2.9- Variação do coeficiente de difusão relativo em função do grau de saturação (Fonte: Adaptado de Martys, 1999).	33
Figura 2.10- Relação entre os coeficientes de difusão e o coeficiente de difusão máximo (grupo saturado) – $D / D_{\text{máx}}$ (Fonte: Guimarães e Helene, 2001).	34
Figura 2.11- Influência do GS na pasta de cimento (GUIMARÃES, 2000) e na argamassa (GUIMARÃES e HELENE, 2001)(Fonte: Guimarães, 2005).	34
Figura 2.12- Variação do coeficiente de difusão em função do grau de saturação (Fonte: Adaptado de Climent et al., 2002).	35
Figura 2.13- Coeficiente de difusão de cloretos em função do grau de saturação do concreto (Fonte: Adaptado de Nielsen e Geiker, 2003).	35
Figura 2.14- Variação do coeficiente de difusão em função da variação do GS para concretos de mesma consistência e diferentes relações a/c (Fonte: Guimarães, 2005).	36
Figura 2.15 - Variação do coeficiente de difusão em função da variação do GS para concretos de mesma relação a/c e diferentes consistências (Fonte: Guimarães, 2005).	36
Figura 2.16 - Nomograma para obter o coeficiente de redução do coeficiente de difusão do cloreto - RGS – valor da média anual considerando a variação sazonal do GS. Concreto executado com cimento pozolânico, vibração manual, exposto no extremo sul do Brasil (Adaptado de: Guimarães, 2005).	37
Figura 2.17 - Coeficiente de difusão em função do Grau de saturação (Fonte: Mercado-Mendoza et. al., 2012).	38
Figura 2.18 - Coeficiente de difusão em função do Grau de saturação (Fonte: Mercado-Mendoza et. al., 2014).	38
Figura 2.19 - Coeficiente de difusão em função do Grau de saturação CEM-1 (Fonte: Mercado-Mendoza et. al., 2014).	39
Figura 2.20 - Coeficiente de difusão em função do Grau de saturação CEM-V (Fonte: Mercado-Mendoza et. al., 2014).	39
Figura 2.21 – Função densidade de probabilidades da margem de segurança (Fonte: Adaptado de Ang e Tang, 1984).	42
Figura 2.22 – Modelo esquemático do método de simulação de Monte Carlo considerando-se duas variáveis de entrada (Fonte: Adaptado de Magalhães, 2018).	43
Figura 2.23 – Perfil de confiabilidade de um elemento de concreto armado sujeito à penetração de cloretos (Fonte: Adaptado de Thoft-Christensen, 2001).	44
Figura 3.1 - Estação de medição do GS (Fonte: Souza, 2005).	46
Figura 3.2 - Estação de medição do GS da Universidade Federal do Rio Grande-FURG (Fonte: Guimarães et al., 2010).	46
Figura 3.3 - Distância da base meteorológica a estação de exposição (Fonte: Peraça, 2009).	47
Figura 3.4 - Estação de medição do GS (Fonte: Vílchez, 2011).	48
Figura 3.5 - Localização da estação de medição do GS em Santa Pola, Alicante, Espanha (Fonte: Vílchez, 2011).	48

Figura 3.6 - Localização da estação meteorológica em Santa Pola, Alicante, Espanha (Fonte: Vélchez, 2011).	49
Figura 3.7 - Extração e fatiamento dos testemunhos (Fonte: Souza, 2005).	50
Figura 3.8 - Perfil de penetração de cloretos nos pontos analisados no cais do TECON (Fonte: Guimarães, 2000).	58
Figura 3.9 - Fluxograma da metodologia proposta.	59
Figura 4.1 - Gráfico da variação temporal das variáveis (Rio Grande) 2004-2007.	67
Figura 4.2 - Gráfico da variação temporal das variáveis (Santa Pola) 2010 a 2015.	67
Figura 4.3 - Gráfico de dispersão GS x TM família 1 e 2 para média semanal (Rio Grande).	68
Figura 4.4 - Gráfico de dispersão GS x TM família 12 para média sazonal (Rio Grande).	69
Figura 4.5 - Gráfico de dispersão GS x TP para CP 30 para média semanal (Santa Pola).	69
Figura 4.6 - Gráfico de dispersão GS x TM para CP 30 para média sazonal (Santa Pola).	70
Figura 4.7 - Gráfico de dispersão GS x TP CP 30 (Santa Pola) e CPs 1 e 2 (Rio Grande) para média semanal.	70
Figura 4.8 - Gráfico de dispersão GS x TP CP 30 (Santa Pola) e CPs 1 e 2 (Rio Grande) para média sazonal.	71
Figura 4.9 – Histograma Função Densidade de Probabilidade da temperatura máxima para média sazonal da estação de Rio Grande.	79
Figura 4.10 - Convergência da média e desvio padrão da concentração de cloretos para diversos valores de cobertura.	81
Figura 4.11 - Perfis de penetração de cloretos obtidos da simulação de cada modelo proposto e perfil medido por Guimarães (2000).	82
Figura 4.12 - Perfis de penetração de cloretos obtidos da simulação de cada modelo proposto corrigidos para o ponto PS e perfil medido por Guimarães (2000).	83
Figura 4.13 – Probabilidade de falha do modelo $R_{gs}=1$ para diferentes cobrimentos.	84
Figura 4.14 – Probabilidade de falha do modelo $R_{gs}=0,205$ para diferentes cobrimentos.	84
Figura 4.15 – Probabilidade de falha do modelo 1* e 2* para diferentes cobrimentos.	85
Figura 4.16 – Probabilidade de falha do modelo GS (30) para diferentes cobrimentos.	85
Figura 4.17 – Probabilidade de falha do modelo GS 1*, 2* e (30) para diferentes cobrimentos.	86
Figura 4.18 – Probabilidade de falha do modelo GS 1 a 28* para diferentes cobrimentos.	86
Figura 4.19 – Probabilidade de falha do modelo GS (30, 31, 35 e 36) para diferentes cobrimentos.	87
Figura 4.20- Probabilidade de falha do modelo GS 1*, 2*, 3*, 4*, 7*, 8* e (30, 31, 35, 36) para diferentes cobrimentos.	87
Figura 4.21 - Probabilidade de falha dos modelos utilizados na simulação para diferentes cobrimentos.	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Traços do concreto utilizado nos testemunhos.....	50
Tabela 3.2 - Identificação dos testemunhos em Rio Grande-RS, (SOUZA,2005).....	51
Tabela 3.3 - Identificação dos testemunhos de Santa Pola, (VÍLCHEZ, 2011).....	51
Tabela 3.4 - Dados da medição de inverno de 2005 do testemunho 1, (Fonte: Peraça, 2009)	52
Tabela 3.5 - Dados compilados das variáveis ambientais de Rio Grande-RS.	53
Tabela 3.6 - Dados compilados das variáveis ambientais de Santa Pola.	53
Tabela 3.7: Microambientes identificados na análise (Fonte: adaptado Bretanha, 2004).....	57
Tabela 3.8 - Parâmetros e distribuição de probabilidades das variáveis utilizadas na avaliação da confiabilidade.....	58
Tabela 4.1 - Resultado das correlações para médias semanais das variáveis (Rio Grande) 2004-2007. Continua.....	60
Tabela 4.2 - Resultado das correlações para médias semanais das variáveis (Rio Grande) 2004-2007. Conclusão.....	61
Tabela 4.3 - Resultado das correlações para médias sazonais das variáveis (Rio Grande) 2004-2007. Continua.....	62
Tabela 4.4 - Resultado das correlações para médias sazonais das variáveis (Rio Grande) 2004-2007. Conclusão.....	63
Tabela 4.5 - Resumo das correlações, Rio grande.	64
Tabela 4.6 - Resultado das correlações para médias semanais das variáveis (Santa Pola).....	64
Tabela 4.7 - Resultado das correlações para médias sazonais das variáveis (Santa Pola).....	65
Tabela 4.8 - Resultado das correlações para médias semanais das variáveis (Rio Grande + Santa Pola).....	65
Tabela 4.9 - Resultado das correlações para médias sazonais das variáveis (Rio Grande + Santa Pola).....	66
Tabela 4.10 - Estatística de regressão dos CPs 1 e 2 (Rio Grande) x TAS, TM e TMÍN	72
Tabela 4.11- ANOVA dos CPs 1 e 2 (Rio Grande) x TAS, TM e TMÍN	72
Tabela 4.12 – Coeficientes da regressão dos CPs 1 e 2 (Rio Grande) x TAS, TM e TMÍN	72
Tabela 4.13 - Estatística de regressão do CP 30 (Santa Pola) x TM, TMín e TMéd.....	72
Tabela 4.14 - ANOVA do CP 30 (Santa Pola) x TM, TMín e TMéd.	72
Tabela 4.15 – Coeficientes da regressão do CP 30 (Santa Pola) x TM, TMín e TMéd.	72
Tabela 4.16 – Coeficientes da regressão dos CPs 1 e 2 (Rio Grande) e 30 (Santa Pola) x TP, HI e PA.....	73
Tabela 4.17 - ANOVA dos CPs 1 e 2 (Rio Grande) e 30 (Santa Pola) x TP, HI e PA.....	73
Tabela 4.18 – Coeficientes da regressão dos CPs 1 e 2 (Rio Grande) e 30 (Santa Pola) x TP, HI e PA.....	73
Tabela 4.19 – Resumo dos modelos de GS para estação de Rio Grande.....	74
Tabela 4.20 – Resumo dos modelos de GS para estação de Santa Pola, Santa Pola.....	74
Tabela 4.21 – Resumo dos modelos de GS para ambas as estações de medição.....	74
Tabela 4.22 - Erro médio dos modelos de GS da estação de Rio Grande.....	75
Tabela 4.23 - Erro médio dos modelos de GS da estação de Santa Pola.	75
Tabela 4.24 - Erro médio dos modelos de ambas as estações de medição em conjunto.....	75
Tabela 4.25 - Erro médio do GS da estação de Rio Grande estimado pelo modelo 1 a 28.....	76
Tabela 4.26 - Erro médio do GS da estação de Santa Pola estimado pelo modelo 30, 31, 35 e 36. ...	76
Tabela 4.27 - Erro médio do GS de ambas as estações de medição em conjunto estimado pelo modelo (30, 31, 35 e 36) e 1*,2*,3*,4*,7*,8*.	76
Tabela 4.28 - Erro médio do GS de todos os CPs estudados estimado pelo modelo (30, 31, 35 e 36) e 1*,2*,3*,4*,7*,8*.....	77
Tabela 4.29 – Resumo dos modelos de GS utilizados	78
Tabela 4.30 - Parâmetros estatísticos das variáveis de entrada dos modelos de GS.....	79
Tabela 4.31 – Correlação das variáveis de entrada dos modelos de GS.	79
Tabela 4.32 – Valores de truncagem de GS.....	80

LISTA DE SÍMBOLOS

CO_2	Gás carbônico
CaCl_2	Cloreto de cálcio
C	Concentração do soluto [kmol/m^3]
$\frac{dc}{dL}$	Gradiente de Concentração [kg/m^4 ou moles/m^4]
D	Coeficiente de difusão [m^2/s]
J	Velocidade de transporte de massa [$\text{kg}/\text{m}^2.\text{s}$ ou $\text{moles}/\text{m}^2.\text{s}$]
L	Espessura [m]
t	Tempo [s]
x	Distância a partir do ponto de referência [m]
$C_{s(t)}$	Concentração superficial de cloretos a um determinado tempo [t]
$C_{(x,t)}$	Concentração de íons cloreto em relação à massa de cimento [%]
C_0	Concentração inicial de íons cloreto no interior do concreto [%]
C_s	Concentração superficial de cloretos admitida como constante [%]
$erfc$	Complemento da função erro de Gauss
a/c	Relação água cimento
A_d	Absorção diária
$A_{\text{máx}}$	Absorção máxima
M_d	Massa diária da amostra
P_f	Probabilidade de falha
N_f	Número de falhas
N_s	Número de simulações
Fr	Função de distribuição acumulada de R
M	Margem de segurança
R	Capacidade resistente
S	Ação a qual a estrutura é submetida
μ	Média da variável
σ_M	Desvio padrão da margem de segurança

σ_R	Desvio padrão da carga de ruptura
σ_S	Desvio padrão da carga das ações
β	Índice de confiabilidade
Φ	Probabilidades acumulada
$g_{(x,t)}$	Estado limite pela entrada de agentes agressivos
C_{crit}	Concentração crítica de cloretos considerada limite para dar início ao processo de corrosão
$C_{(x,t)}$	Concentração de cloretos na armadura
$ERRO(\%)$	Erro percentual do modelo no ponto estudado.
$Y_{EST.}$	Variável dependente obtida do modelo de regressão.
Y_{REAL}	Variável dependente medida.
R_C	Coeficiente de correção devido à influência do cimento utilizado.
R_{GS}	Coeficiente de correção devido à influência do grau de saturação do concreto.
R_T	Coeficiente de correção devido à influência da temperatura ambiente.
R_{SC}	Coeficiente de correção devido à influência da superfície exposta em relação à concretagem.
D_0	Coeficiente de difusão de referência do concreto.
r^2	Coeficiente de determinação
r	Coeficiente de correlação

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEMET	Agencia estatal de meteorologia
AL	Alicante
BR	Brasil
CIMAR	Centro de Investigações Marinhas
CP	Corpo de prova
EE	Escola de Engenharia
ELS	Estado Limite de Serviço
ELU	Estado Limite Último
ESP	Espanha
GS	Grau de Saturação
HI	Horas de Insolação
MCS	Método de Simulação de Monte Carlo
N	Nebulosidade
PA	Pressão atmosférica
PAMáx	Pressão atmosférica máxima
PAMín	Pressão atmosférica mínima
PPGEO	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica
RG	Rio Grande
TAS	Temperatura de ar seco
TAU	Temperatura de ar úmido
TE	Taxa de evaporação
TEE	Taxa de evaporação externa
TM	Temperatura máxima
TMéd	Temperatura média
TMín	Temperatura mínima
TP	Taxa de precipitação

UR Umidade relativa

V Visibilidade

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

Em função da observação da deterioração precoce de estruturas de concreto, necessidades de competitividade no setor e avaliação dos aspectos de sustentabilidade se fez necessário reavaliar e aperfeiçoar as técnicas e materiais utilizados nas estruturas de concreto, dando-se ênfase aos aspectos de projeto que visam o aumento da vida útil das construções. Inicialmente acreditava-se que as estruturas de concreto armado seriam eternas, porém ao longo do tempo, começaram a apresentar patologias em função da corrosão de armaduras, gerando fissuração e deterioração do concreto. Verifica-se que grande parte do problema de corrosão de armaduras é devido a ação de agentes agressivos, em especial, à penetração de íons cloreto na massa de concreto, íons estes presentes em zonas marítimas, onde se enquadra o ambiente de estudo desta pesquisa (VICAT, 1812 apud LEA, 1970; LEA, 1970; BICZÓK, 1972; HELENE, 1986; DAL MOLIN, 1988; ANDRADE, 1992; CLIFTON, 1993; HELENE, 1993; GJØRV et al., 1994;).

O desencadeamento do processo de corrosão de uma estrutura de concreto armado, geralmente é modelado em duas etapas: iniciação e propagação. A iniciação diz respeito ao período de ingresso dos íons cloreto chegando ao fim da camada de cobrimento do concreto e a propagação refere-se aos efeitos pós despassivação do aço, incluindo fissuração e perda de seção da armadura (TUUTTI, 1980). Em termos de tempo, o período de propagação é consideravelmente menor quando comparado ao período de iniciação, fato que justifica a importância dos estudos focados no período de iniciação (YU et al., 2017).

A avaliação do tempo de penetração dos íons cloreto no concreto é uma importante forma de determinar o atingimento do Estado Limite de Serviço (ELS) de determinada estrutura. Grande parte dos mecanismos propostos para a avaliação do processo de penetração de cloretos é baseada em modelos determinísticos. No entanto, em virtude das inúmeras variáveis envolvidas, os modelos probabilísticos acabam sendo os que melhor representam o processo de iniciação por íons cloreto.

As avaliações do processo de iniciação, em geral, tomam por base um modelo determinístico previamente definido (solução da 2ª Lei de Fick, por exemplo) e, baseadas na estimativa de variabilidade das variáveis envolvidas, realizam uma análise em termos probabilísticos.

Uma das grandes dificuldades para a elaboração de estudos de durabilidade envolvendo análises probabilísticas está na correta medição das características das variáveis aleatórias envolvidas.

Sabendo-se da importância do grau de saturação na correta avaliação da penetração de íons cloreto no concreto (MARTYS, 1999; GUIMARÃES, 2000, GUIMARÃES e HELENE 2001; CLIMENT et al., 2002; NIELSEN E GEIKER, 2003; VERA et al., 2007, GUIMARÃES, 2009;

MERCADO-MENDOZA et al., 2012; MERCADO-MENDOZA et al., 2014) e da dificuldade técnica e econômica de se estimar esta propriedade, busca-se agilizar o processo de determinação do GS através da avaliação dos parâmetros ambientais.

De posse dos dados de medições de GS de diferentes concretos expostos a atmosfera marinha e de dados meteorológicos busca-se gerar modelos probabilísticos de estimativa do grau de saturação a partir das variáveis ambientais do local. Estas estimativas poderão ser utilizadas na solução do modelo de iniciação por cloretos para maior aproximação do resultado obtido com a realidade.

1.2. Importância do tema

A correta modelagem e determinação do tempo de iniciação da corrosão de armaduras por cloretos é um importante fator a ser levado em conta na avaliação da vida útil de estruturas, seja no período de projeto ou no período de uso de estruturas existentes. Os modelos mais empregados para tal são soluções determinísticas dos fenômenos de transporte. No entanto, muitas das variáveis envolvidas são aleatórias fato que torna fundamental o conhecimento destas para se obter com maior precisão o tempo exato do período de iniciação.

A precisão na estimativa do tempo de iniciação por cloretos é função do uso de um modelo bem ajustado, que leve em conta todos os principais parâmetros influentes, aliado a correta avaliação das características de dispersão das variáveis envolvidas. Sabendo-se que o GS é um fator que exerce forte influência no processo de difusão, torna-se fundamental seu uso na avaliação da vida útil.

1.3. Justificativa

A influência do GS na difusão de íons cloreto já é conhecida, porém a determinação desta propriedade do concreto é uma prática lenta e onerosa, o que por muitas vezes implica a não utilização desta variável, acarretando imprecisão na estimativa do tempo de iniciação da corrosão de armaduras. Busca-se neste trabalho criar modelos que utilizam variáveis ambientais como parâmetro de entrada para inferir o GS do concreto, tornando o uso desta propriedade nos modelos de vida útil uma prática viável e recorrente.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é apresentar modelos de estimativa do grau de saturação do concreto, estes utilizarão como variáveis de entrada as condições do ambiente onde o material está inserido, contribuindo para uma maior precisão na avaliação da estimativa de vida útil de elementos estruturais de concreto armado em ambientes marinhos e utilizar estes modelos na avaliação

probabilística da vida útil de elementos estruturais de concreto armado.

1.4.2. Objetivos específicos

Dentre os objetivos específicos da pesquisa, podem ser citados: (1) Verificar a variação do grau de saturação entre duas regiões distintas para concretos similares; (2) Apresentar uma estimativa das principais variáveis ambientais que exercem influência no grau de saturação do concreto; (3) Avaliar a variabilidade do grau de saturação em função das condições ambientais, estimando a média e a dispersão desta variável de forma mais direta; (4) Analisar a importância da correta avaliação do grau de saturação na estimativa de vida útil.

1.5. Delimitações e pressuposto

A presente pesquisa apresenta como delimitação a avaliação do grau de saturação na fase de iniciação da penetração de íons cloreto em estruturas de concreto armado, partindo do pressuposto de que o processo de difusão é o mecanismo predominante de entrada deste agente agressivo no concreto.

1.6. Limitações da pesquisa

A pesquisa se concentra em duas regiões com atmosfera de névoa marinha, tornando os resultados limitados a este tipo de microambiente. Devido as características do concreto utilizado na pesquisa os modelos se limitam a grupos de concreto semelhantes aos pesquisados. Possibilidades de extrapolações de resultados necessitam de avaliações em outras condições de exposição.

1.7. Estrutura do trabalho

A presente pesquisa está apresentada em 5 capítulos, sendo este o primeiro, no qual são discutidas as considerações iniciais do tema, bem como os objetivos, limitações e a importância do projeto proposto.

O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre estimativas de vida útil de estruturas de concreto armado, sobre o processo de penetração de íons cloreto e acerca dos principais modelos de avaliação. São discutidos os principais fatores que influenciam na difusão de cloretos, bem como questões relacionadas ao grau de saturação do concreto.

O capítulo 3 versa sobre a metodologia adotada na pesquisa, são apresentadas as principais características dos ambientes utilizados como parâmetro e os métodos adotados.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos através da metodologia proposta e as discussões a respeito dos resultados obtidos.

O quinto capítulo apresenta as principais conclusões obtidas com a realização do trabalho, além de perspectivas e sugestões para prosseguimento dos estudos.

2. DURABILIDADE E VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS EM AMBIENTE MARÍTIMO

A durabilidade das estruturas de concreto armado pode ser determinada pelo período de tempo no qual a estrutura se comporta satisfatoriamente, resistindo às solicitações impostas de maneira técnica (resistindo aos esforços e solicitações) e subjetiva (mantendo seu aspecto desejável ao usuário), para o ambiente previamente definido em que a estrutura se encontra. Período este previamente determinado ou esperado para as condições impostas (APOSTOLOPOULOS e PAPADAKIS, 2008; HACKL e KOHLER, 2016).

A durabilidade das estruturas não é uma propriedade inerente somente a estrutura, mas sim da interação da estrutura com o ambiente em que ela está inserida. Este fator é um grande desafio quanto a escolha de modelos determinísticos, probabilísticos ou mistos para a determinação da vida útil das estruturas, haja vista a variabilidade dos parâmetros envolvidos nos processos de deterioração (HELENE, 1993).

O processo de corrosão das armaduras de um elemento de concreto é um fator preponderante na vida útil das estruturas, apesar dos efeitos só serem percebidos após um avançado estágio de corrosão o marco que pode delimitar o fim da vida útil de projeto da estrutura é a despassivação da armadura. Neste espectro de uma abordagem conservadora é fundamental estimar o tempo em que ocorre a despassivação das armaduras, podendo-se assim adotar medidas de prevenção e manutenção para um prolongamento da vida útil das estruturas (VERA et al., 2017).

As estruturas inseridas em ambiente marítimo, dependendo do microclima a que estão sujeitas, sofrem ataque de agentes agressivos de diferentes formas. Neste campo tem-se atenção especial para corrosão de armaduras, principalmente devido ao ataque de íons cloreto presentes na água do mar e nas névoas salinas.

A vida útil de projeto de uma estrutura de concreto armado é definida pela ABNT NBR-6118 (2014) como o tempo em que as características da estrutura são mantidas sem intervenções significativas desde que atendidos os requisitos estabelecidos de uso e manutenção. Para Tuutti (1980) a vida útil de uma estrutura ou tempo antes do reparo é dividida em dois períodos, o primeiro chamado iniciação corresponde ao tempo em que os agentes agressivos levam para chegar até a armadura despassivando-a, o segundo período chamado propagação corresponde ao tempo em que a corrosão das armaduras chega a um limite não aceitável levando a ruína da estrutura, como mostra a figura 2.1.

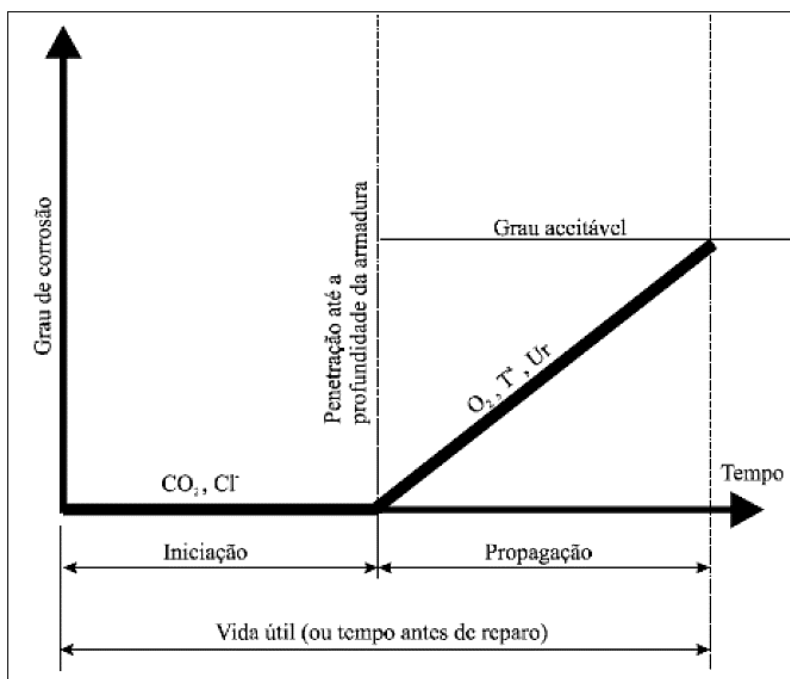


Figura 2.1- Vida útil da estrutura pelo processo de corrosão (Fonte: Tuutti, 1980).

O ambiente em que a estrutura está inserida tem grande influência sobre a penetração de íons cloretos, pois o microambiente marítimo é capaz de regular as taxas de deposição superficial de cloretos nas estruturas e demais variáveis ambientais, influenciando assim a velocidade de ataque de cloretos. A maioria dos pesquisadores utiliza a divisão em 4 microambientes como mostra a figura 2.2, (LIMA e MORELLI, 2016):

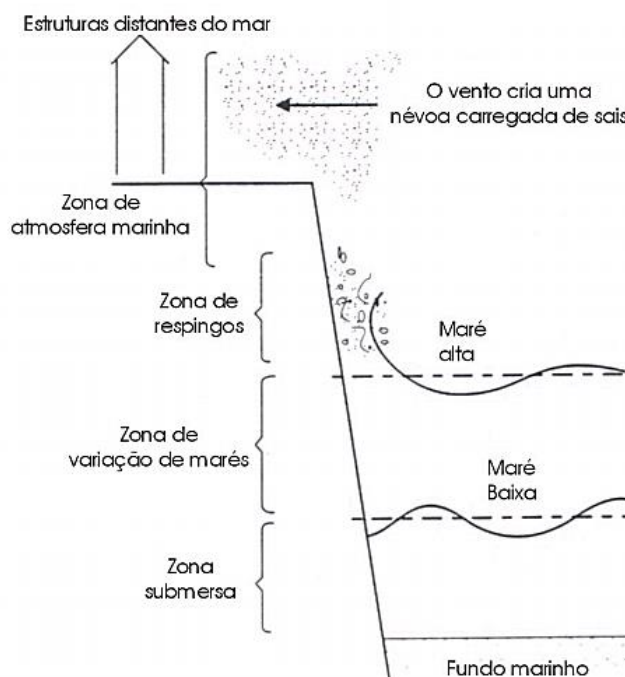


Figura 2.2- Zonas de agressividade marinha às estruturas de concreto armado (Fonte: Lima e Morelli, 2016).

Na zona submersa o concreto se apresenta permanentemente abaixo da linha d'água, sendo o transporte de íons realizado principalmente por difusão, porém não há presença de oxigênio o que impossibilita a corrosão das armaduras. Nesta zona então os principais agentes agressivos são os sais, como sulfato e magnésio, e agentes biológicos que são microrganismos que podem degradar tanto o concreto quanto as armaduras.

Na zona de variação de marés, que é compreendida entre o nível de maré baixa e maré alta, o concreto encontra-se quase sempre saturado, o que aumenta a velocidade de penetração de íons cloreto, nesta região o concreto pode ser atacado quimicamente pela alta concentração de sais, corrosão de armaduras devido a ação de cloretos, ação de ondas e ataques biológicos.

A zona de respingo é caracterizada como a região que ainda sofre influência direta do mar, através de respingos de ondas, nesta região a corrosão de armaduras é muito acelerada devido a presença de íons cloreto.

A zona de atmosfera marinha ou zona de névoa salina compreende a região em que a estrutura não é atingida diretamente pela água do mar, mas sim pela névoa carregada pelo vento. Esta contém partículas sólidas de sais ou gotículas de solução salina que são capazes de se acumular sobre as estruturas de concreto em vários ciclos de molhagem e secagem. A medida que a distância da costa aumenta, a capacidade de transporte de sais na nevoa vai diminuindo até que seu efeito não seja significativo (NUNES, 2006).

2.1. Agentes agressivos

Os principais agentes agressivos que atingem as estruturas de concreto são o gás carbônico (CO_2) presente na atmosfera, os sulfatos presentes nos materiais do concreto, nas águas freáticas e em indústrias de fertilizantes e os cloretos amplamente presentes em ambientes marinhos e indústrias de fertilizantes. No presente trabalho serão desconsiderados os dois primeiros, sendo abordadas as características e consequências do ataque por cloretos.

2.1.1. Íons cloreto

A corrosão de armaduras por ataque de íons cloreto é um dos problemas mais graves observados em estruturas de concreto armado quando se fala em vida útil. A película de passivação que envolve o aço logo após a hidratação do cimento pode ser destruída pela penetração de íons cloreto, despассивando a armadura e dando início ao processo de corrosão quando há presença de água e oxigênio (NEVILLE, 1997). Segundo Helene (1993) e Neville (1997) os cloretos que atacam o concreto podem ser oriundos de diversas fontes, tais como: contaminação de agregados do concreto provenientes de zonas litorâneas; águas salobras ou com excesso de cloro; uso de aditivos

aceleradores de pega que contem cloreto de cálcio (CaCl_2); pelo uso de produtos químicos que contenham cloreto sobre as estruturas; através da presença de íons cloreto oriundos da água do mar tanto no contato direto quanto em zonas de névoa (maresia), que é uma das principais fontes de contaminação; também consta o uso de sais de degelo em países de clima temperado.

2.2. Mecanismos de transporte no concreto

Existem diversos mecanismos de transporte de íons e moléculas através da rede de poros do concreto. Quando se trata de íons oriundos de moléculas sólidas se faz necessária a presença de um solvente para que haja mobilização iônica. Os principais fenômenos conhecidos são a penetração por permeabilidade, a absorção capilar, a migração, o fluxo por convecção e a difusão. Apesar dos fenômenos de transporte ocorrerem algumas vezes simultaneamente o mecanismo predominante de transporte no interior da massa de concreto é a difusão. Este mecanismo é amplamente adotado em modelos de penetração de cloretos e será explicado na seção 2.2.1.

2.2.1. Difusão

O processo de difusão é o fenômeno do transporte de massa, pelo deslocamento de moléculas individuais, através de uma barreira ou meio livre, de modo aleatório, que ocorre devido a um gradiente de concentrações de íons. Denomina-se coeficiente de difusão a constante de proporcionalidade entre o fluxo de átomos e o gradiente de concentração apresentado no meio em que ocorre o processo (JASTRZEBSKI, 1987).

Para que ocorra o processo de difusão de íons cloreto na estrutura de poros do concreto estes devem estar parcialmente ou totalmente preenchidos com água, não sendo necessário que haja movimentação de fluido nos poros, mas sim que se estabeleça um gradiente de concentração da zona externa para zona interna do concreto ocorrendo assim movimentação iônica.

Levando-se em conta que o fluxo de íons não varia com o tempo, existe a condição de regime estacionário. Relacionando-se a concentração (C) com a posição na direção do fluxo (x) obtém-se o perfil de concentração. A inclinação de um ponto específico desta curva é conhecida como gradiente de concentração, como mostra a figura 2.3.

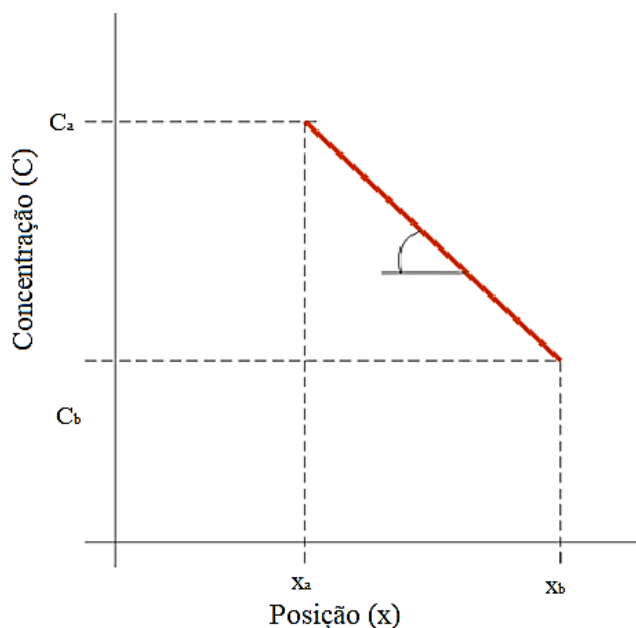


Figura 2.3- Perfil de concentrações para o estado estacionário (Fonte: Adaptado de Jastrzebski, 1987).

Através da 1ª lei de Fick pode-se obter o coeficiente de difusão para o estado estacionário, como mostra a equação (2.1):

$$J = -D \times \frac{dc}{dL} \quad (2.1)$$

Onde:

$\frac{dc}{dL}$ é o gradiente de concentração, em kg/m⁴ ou moles/m⁴;

D é coeficiente de difusão, em m²/s;

J é velocidade de transporte de massa, em kg/m².s ou moles/m².s;

L é a espessura, em m.

O parâmetro D tem sinal negativo na equação, pois, o sentido do fluxo ocorre do ponto de maior concentração para o de menor concentração.

Para estruturas de concreto armado o transporte de massa não pode ser caracterizado pelo fluxo estacionário, pois há variação tanto no gradiente de concentração quanto no fluxo com o tempo. Sendo assim, é mais adequado utilizar o regime não estacionário para caracterização, como mostra a figura 2.4.

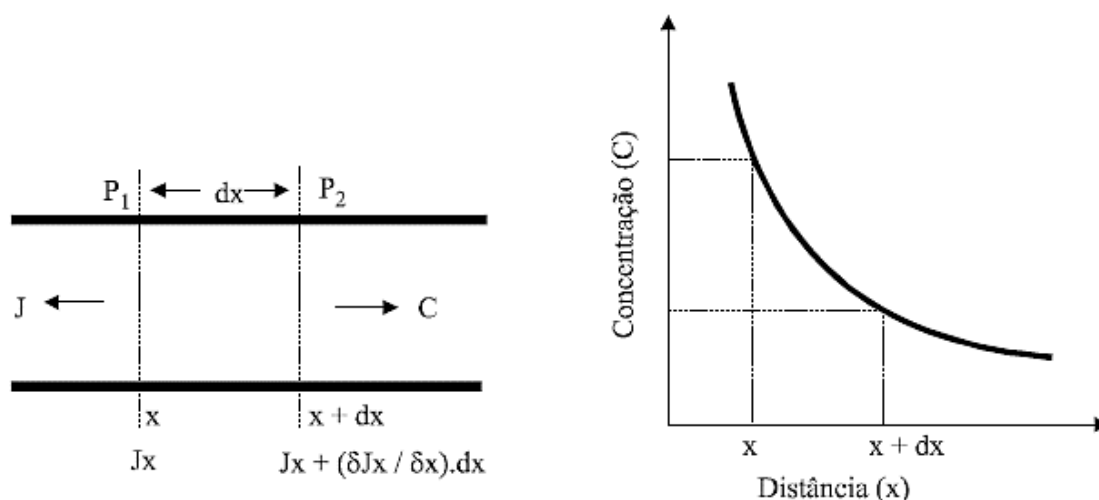


Figura 2.4- Perfil de concentrações para o regime não estacionário (Fonte: Jastrzebski, 1987).

A descrição matemática do processo de difusão em regime não estacionário pode ser feita através da 2ª lei de Fick, como é demonstrado na equação 2.2:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -D \times \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (2.2)$$

Onde:

C é a concentração de soluto, em kmol/m³;

t é o tempo, em s.

D é coeficiente de difusão, em m²/s;

x é a distância a partir do ponto de referência que geralmente é tomado como a face externa, em metros;

2.3. Modelos de iniciação pelo ataque de íons cloreto

Atualmente não existe um modelo a ser utilizado para a determinação do período de iniciação do ataque de íons cloretos que seja consenso entre a comunidade científica. Apesar da maioria dos modelos levar em consideração que o processo de difusão é o mecanismo predominante de ataque, são muitas as variáveis aleatórias neste processo, cabendo-se assim mais estudos a respeito da influência de cada variável.

Quando se fala em modelagem matemática determinística do fenômeno, a maioria dos modelos utiliza a 2ª lei de Fick na solução, abordando as variáveis do problema de forma determinística ou probabilística. Na figura 2.5 pode-se observar um resumo dos principais modelos empregados atualmente na determinação do período de iniciação por cloretos.

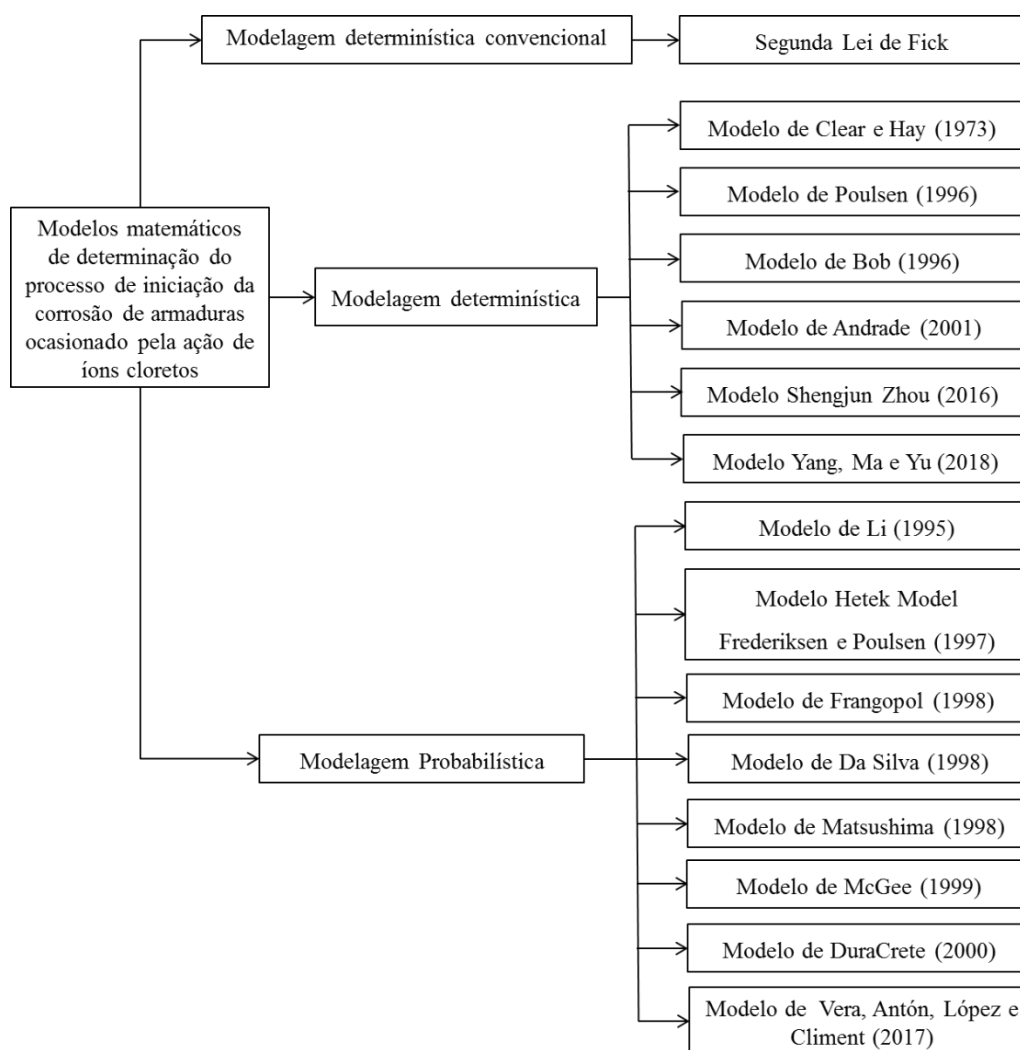


Figura 2.5- Modelos matemáticos de determinação do processo de iniciação da corrosão de armaduras ocasionado pela ação de íons cloretos (Fonte: Magalhães, 2018).

2.3.1. Iniciação por difusão

Apesar dos vários processos de transporte de íons muitas vezes ocorrerem simultaneamente, é consenso que o mecanismo da difusão de íons no interior do concreto é o predominante e é amplamente utilizado em modelos de predição da iniciação por íons cloreto (YU et al., 2017). A solução comumente utilizada para resolução do problema de difusão no concreto é a 2ª lei de Fick, com a qual é possível descrever para um determinado tempo a concentração de íons conforme a profundidade de penetração. Para a solução da equação 2.2 geralmente se admite as seguintes condições:

$$\begin{cases} C(0, t) = C_{s(t)} & \text{se } t > 0 \\ C(x, 0) = C_0 & \text{se } x > 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

Onde:

$C_{s(t)}$ é a concentração superficial de cloretos a um determinado tempo (t)

Para esta solução específica admite-se as simplificações de que o coeficiente de difusão (D) e a concentração superficial (C_s) são constantes. Neste caso, a equação resume-se a:

$$C_{(x,t)} = C_0 + (C_s - C_0) \times \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{4Dt}}\right) \quad (2.4)$$

Onde:

$C_{(x,t)}$ é a concentração de íons cloreto em relação à massa de cimento na profundidade x a partir da superfície do concreto em um dado tempo t (%);

C_0 é a concentração inicial de íons cloreto no interior do concreto do componente estrutural (%);

C_s é a concentração superficial de cloretos admitida como constante (%);

$\operatorname{erfc}()$ é o complemento da função erro de Gauss;

x é a profundidade de penetração de íons cloreto (cm);

D é o coeficiente de difusão de cloretos (cm²/ano), admitido constante;

t é o tempo (anos)

Os principais parâmetros que influenciam de forma significativa no modelo proposto da equação são a concentração superficial (C_s), o coeficiente de difusão (D) e a concentração inicial de cloretos (C_0). Apesar das simplificações adotadas para a resolução da equação é conhecido que tanto o coeficiente de difusão (D) quanto a concentração superficial (C_s) variam ao longo do tempo, fato que pode gerar imprecisão na estimativa realizada.

2.3.2. Coeficiente de difusão de cloretos

O coeficiente de difusão de cloretos é um parâmetro fundamental na estimativa da vida útil das estruturas. Através deste coeficiente se infere a difusibilidade de determinado concreto, que pode variar devido as propriedades dos materiais empregados no concreto e das características ambientais do local em que se encontra a estrutura. A simplificação de cálculo comumente adotada de se considerar D constante pode gerar muita imprecisão no cálculo da vida útil de estruturas, portanto há necessidade de utilizar parâmetros de correção deste coeficiente através dos principais fatores que influenciam em sua variação. A seguir apresenta-se os principais fatores que exercem influência sobre o coeficiente de difusão de cloretos D :

Tipo de cimento

O tipo de cimento utilizado na dosagem do concreto influencia na capacidade de penetração

de íons cloreto aprisionando-os em ligações químicas com seus componentes, tendo-se em vista que apenas os cloretos livres têm capacidade de atacar as armaduras. A relação de cloretos livres na matriz cimentícia é inversamente proporcional a quantidade de C3A e C4AF presentes na composição do cimento. Estes componentes são capazes de formar moléculas com os íons cloretos, criando sais insolúveis que além de reter os cloretos livres saturam a rede de poros dificultando o transporte dos cloretos livres. Também cabe ressaltar que o tipo de cimento utilizado exerce influência na rede de poros formada, facilitando ou dificultando o processo de difusão (HELENE, 1993; MEIRA, 2004; GUIMARÃES, 2000).

Adições

As adições minerais feitas à composição do cimento também têm capacidade de refinar a rede de poros do concreto, além de alterar algumas características químicas. Adições minerais de escória de alto forno, cinzas volantes, cinza de casca de arroz, sílica ativa e metacaulim melhoram o desempenho do concreto contra o avanço de íons cloreto (GUIMARÃES, 2000; MEDEIROS et al., 2011). Al-Amoudi et al. (1992) realizou um estudo comparativo de diferentes adições ao concreto frente ao ataque de cloretos, constatando que concretos com adição de sílica ativa e escória de alto forno tem desempenho muito superior aos executados apenas com cimento comum diminuindo até dez vezes a intensidade de corrosão.

Saciloto (2005) estudou a influência da substituição de parte do cimento por diferentes percentuais de adições minerais (cinza de casca de arroz, cinza volante, escória de alto forno) e sua relação com as propriedades do concreto, entre elas, o coeficiente de difusão de cloretos. Para as adições de cinza de casca de arroz e escória de alto forno notou-se melhora considerável na resistência à penetração de cloretos em praticamente todos os traços comparados ao traço de referência com cimento puro. A mistura de cinza volante na massa de cimento resultou em um pior desempenho frente a penetração de cloretos, porém, o autor explica que tal fato pode ocorrer devido a cinza utilizada não ter sido moída, perdendo assim a eficiência de refinamento da rede de poros.

Relação água cimento

A relação água/cimento (a/c) utilizada na dosagem do concreto afeta diretamente a microestrutura do concreto, sendo que quanto maior a relação a/c maior se torna a porosidade do concreto, sendo assim o ingresso e deslocamento dos íons cloreto no interior do concreto se dá com maior facilidade. A relação a/c utilizada também influencia no tamanho e interligação da rede de poros, fator que afeta a velocidade de penetração de íons cloreto no concreto (MEIRA, 2004; MEIRA et al., 2007; CASTRO et al., 2001). Macdonald e Northwood (1995) compararam a relação do

coeficiente de difusão com a relação água cimento (a/c), como mostra a figura 2.6.

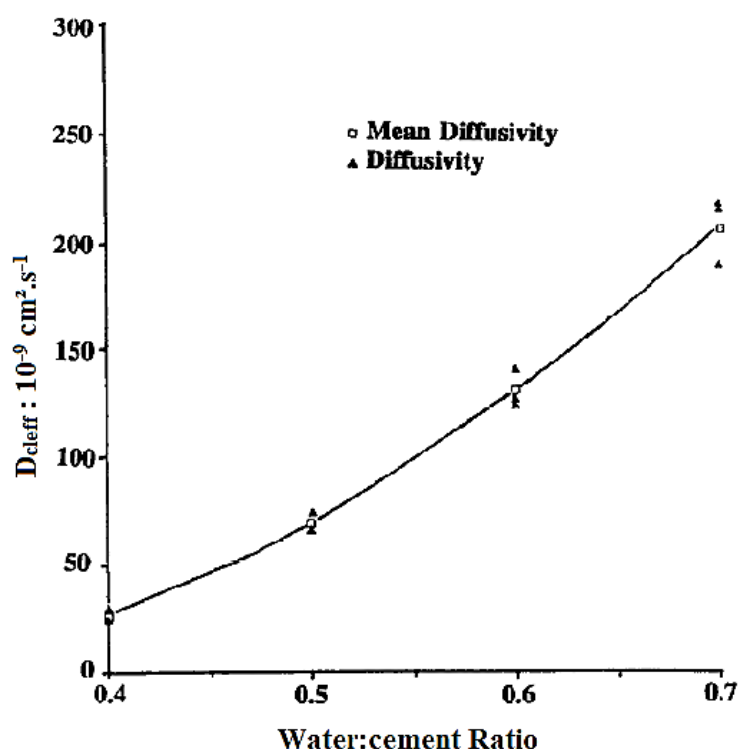


Figura 2.6- Coeficiente efetivo de difusão de cloretos em relação ao fator água cimento (Fonte: Macdonald e Northwood, 1995).

Cura do concreto

A cura do concreto é um importante fator que determina a estrutura de poros do concreto, segundo Pereira et al., (2013) a cura prolongada do concreto é capaz de diminuir a capacidade de absorção do concreto, efeito devido a melhoria na microestrutura do material. O tipo da cura utilizada também é capaz de influenciar na penetração de íons cloreto nas estruturas de concreto (SONG et al., 2008). A temperatura da cura do concreto também é capaz de influenciar na velocidade de penetração de íons cloreto, sendo que um aumento controlado na temperatura de cura é benéfico ao concreto reduzindo o coeficiente de difusão (PEREIRA, 2001; HOFFMANN, 2001).

Temperatura Ambiente

A temperatura pode influenciar na penetração de íons cloreto em dois momentos distintos, sendo o primeiro no processo de cura do concreto e em idades mais avançadas através do aumento da cinética das moléculas. Mazer (2010), que analisou a influência da temperatura no coeficiente de difusão do concreto em diferentes microambientes (zonas: submersa, de respingo e de névoa), constatou que em todas as zonas e todas as idades o coeficiente de difusão do concreto foi mais elevado quanto mais alta a temperatura do ambiente.

Sob o aspecto das estruturas atacadas por íons cloreto a temperatura é um importante fator a

ser levado em conta na previsão da vida útil, pois a variação de temperatura é capaz de alterar a velocidade de reações químicas e da mobilidade iônica, relacionadas na equação da cinética química de Arrhenius (PAGE, 1981). Estruturas inseridas em ambientes de temperatura mais elevada se degradam mais rapidamente pelo ataque de íons cloreto do que estruturas em climas mais amenos (NEVILLE 1997).

Umidade

A umidade afeta diretamente o coeficiente de difusão de cloretos na massa de concreto, tendo em vista que se faz necessária a presença de água nos poros do concreto para que haja transporte de íons, esta relação deve ser feita através do GS do concreto, sendo que quanto maior o GS maior será o coeficiente de difusão (GUIMARÃES e HELENE, 2001). A umidade relativa do ar é um dos fatores capazes de regular a disponibilidade de água no concreto, para estruturas não submersas e fora da zona de respingo, porém não é o fator de maior correlação com o GS (PERAÇA, 2009). Segundo Song (2008) estruturas inseridas em zonas de clima quente e com alta umidade relativa do ar facilitam o transporte de íons cloreto no concreto. Os efeitos do GS sobre o coeficiente de difusão de cloretos serão detalhados na seção 2.3.3.

2.3.3. Grau de saturação do concreto e sua influência no coeficiente de difusão de cloretos

O grau de saturação é definido pelo percentual do volume de poros preenchido por solução de poros (água e sais solúveis), sobre o volume total de poros existentes. Para determinação do volume total de poros pode se utilizar o critério da absorção máxima, uma metodologia a ser seguida para obtenção deste parâmetro é a proposta pela ASTM C 642-97 (1997). Para a obtenção da absorção diária e consequentemente do GS de testemunhos de concreto expostos no ambiente uma das formulações propostas é a apresentada na equação 2.5 e 2.6 segundo Guimarães (2005).

$$GS = \frac{A_d}{A_{máx}} \times 100 \quad (2.5)$$

Onde:

A_d é a absorção diária.

$A_{máx}$ é a absorção máxima.

$$A_d = \frac{M_d - M_s}{M_s} \times 100 \quad (2.6)$$

Onde:

M_d é a massa diária da amostra.

M_s é a massa seca da amostra.

O GS do concreto influencia diretamente o transporte de íons cloretos através da difusão na microestrutura de poros. O concreto apresenta uma rede de poros de diversos tamanhos, dos quais, os poros acima de um determinado diâmetro chamado crítico estão mais interligados, permitindo o transporte dos agentes de ataque em seu interior. A figura 2.7 caracteriza as diversas situações de preenchimento em que se pode encontrar a rede de poros interligada, facilitando assim o entendimento do transporte de cloretos no concreto (GUIMARÃES, 2000).

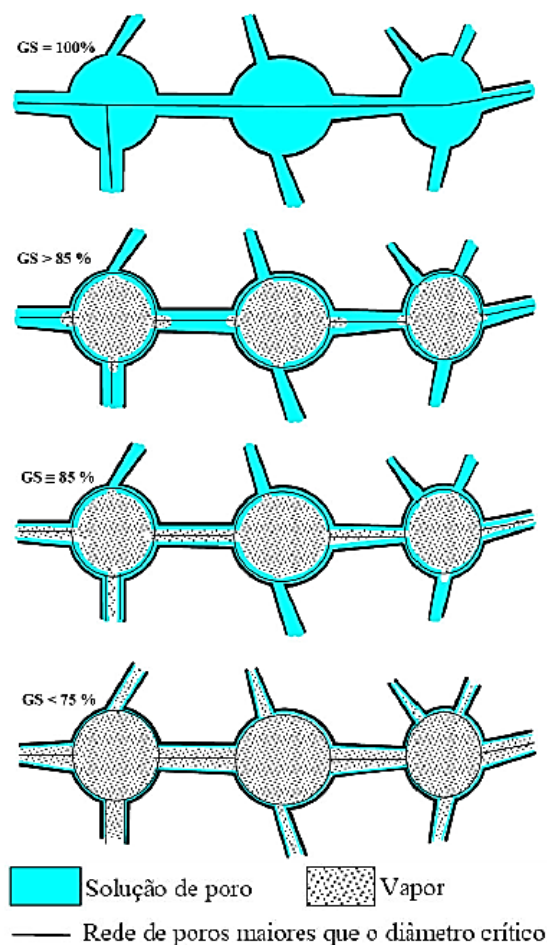


Figura 2.7- Redes de poros da pasta de cimento endurecida com diferentes valores de GS (Fonte: Guimarães, 2000).

Quando a pasta de cimento endurecida se encontra com GS igual a 100 %, todos os poros acima do diâmetro crítico estão cheios de água, aumentando assim a seção por onde ocorre o processo de difusão e consequentemente a velocidade de ataque (ponto IV, figura 2.8).

Com a redução do GS a patamares superiores a 85 % a rede de poros de diâmetro crítico apresenta uma camada de água adsorvida em suas paredes e vapor de água no restante do espaço, sendo que a seção de difusão diminui, assim como o caminho crítico que deve ser percorrido pelos íons (entre os pontos IV e III, figura 2.8).

Para um GS de aproximadamente 85 % todos os poros acima do diâmetro crítico possuem apenas uma fina camada de água adsorvida em sua parede, a seção de difusão diminui drasticamente bem como os íons tem de percorrer distancias maiores para atingir uma mesma profundidade (ponto III, figura 2.8).

A redução do coeficiente de difusão se dá com menos intensidade para GS entre 85 % e 75 %, fato provavelmente devido à perda de água nos poros menores que o diâmetro crítico, consequentemente, com menos influência no transporte de massa (entre os pontos III e II, figura 2.8).

Com a queda de GS abaixo dos 75 % a espessura da camada de agua adsorvida nas paredes dos poros diminui, e faz com que o coeficiente de difusão reduza rapidamente (entre os pontos II e I, figura 2.8).

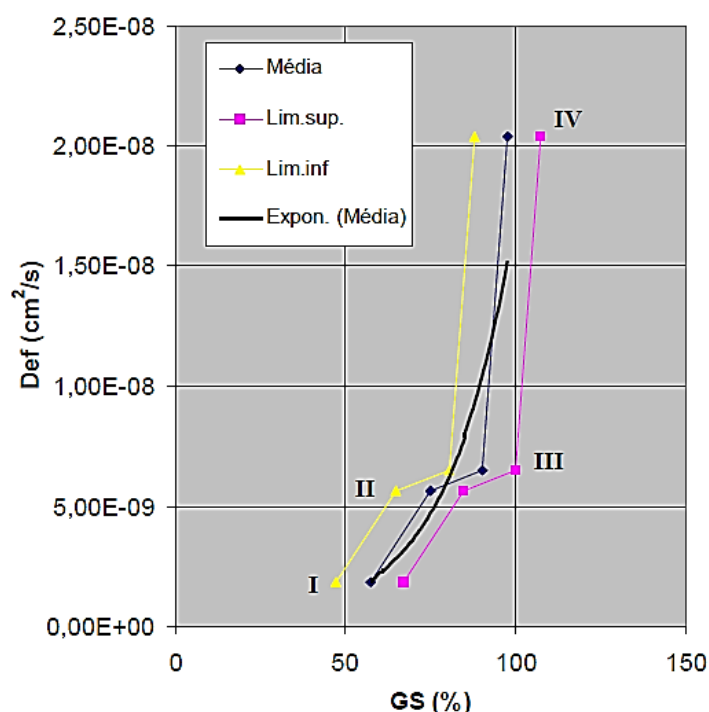


Figura 2.8- Valores médios do coeficiente de difusão efetivo em função do GS e intervalo de confiança de 95 % do GS (Fonte: Guimarães, 2000).

Martys (1999) realizou uma simulação em programa computacional da difusão de íons em poros médios (poros interligados) considerando a variação da saturação destes por fluidos secos e molhados, tais como ar e água por exemplo. Concluindo que há grandes variações no coeficiente de difusão em função do GS da rede de poros, para diferentes níveis de saturação da rede de poros interligados pode-se observar parte dos resultados obtidos na simulação para fluidos molhados na figura 2.9.

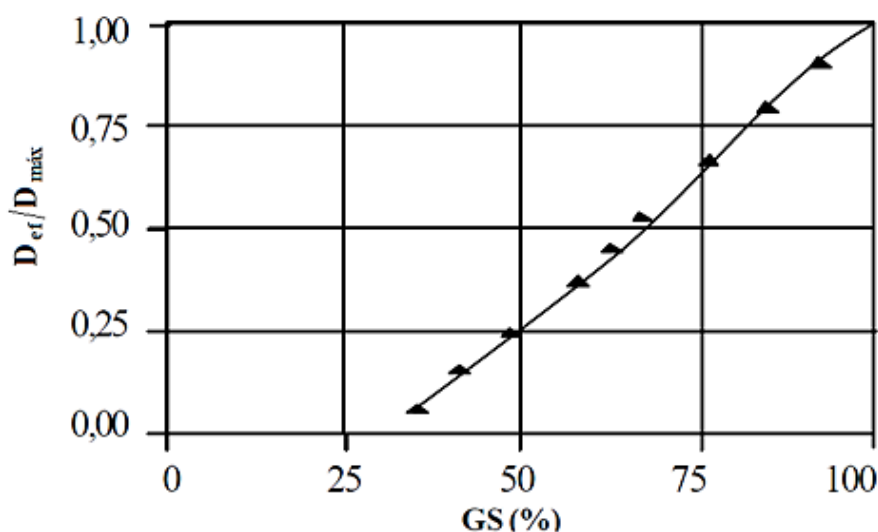


Figura 2.9- Variação do coeficiente de difusão relativo em função do grau de saturação (Fonte: Adaptado de Martys, 1999).

Tendo em vista que o transporte de íons cloreto somente ocorre em meio aquoso, o GS do concreto tem influência no processo. Como visto anteriormente, quanto maior o GS do concreto mais fácil se torna o mecanismo de difusão, porém, a diminuição do coeficiente de difusão é proporcional a redução do grau de saturação até certo estágio, a partir do qual a queda do GS não influencia com tanta intensidade na difusão (GUIMARÃES, 2000). As figuras 2.10 e 2.11 demonstram os resultados obtidos nas pesquisas de Guimarães (2000), que utilizou a primeira lei de Fick na pasta de cimento endurecida com cimento tipo CPV-ARI e Guimarães e Helene (2001) que utilizaram a segunda lei de Fick em argamassa com cimento pozolânico. Observa-se grande semelhança nos resultados obtidos apesar das diferenças apontadas, nota-se também em ambos os casos a formação de um patamar onde a influência do GS diminui.

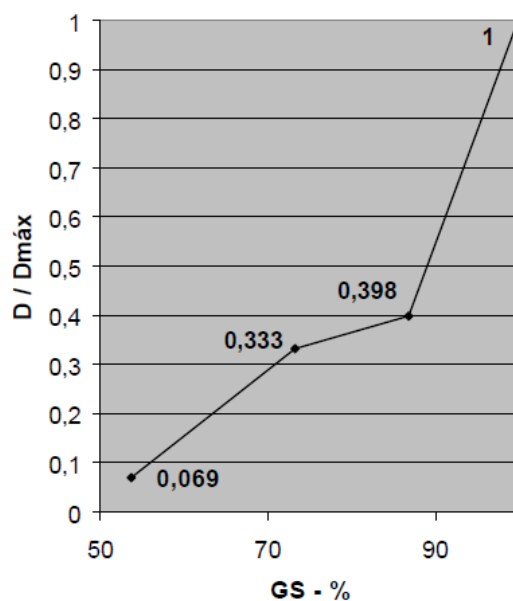


Figura 2.10- Relação entre os coeficientes de difusão e o coeficiente de difusão máximo (grupo saturado) – $D / D_{máx}$ (Fonte: Guimarães e Helene, 2001).

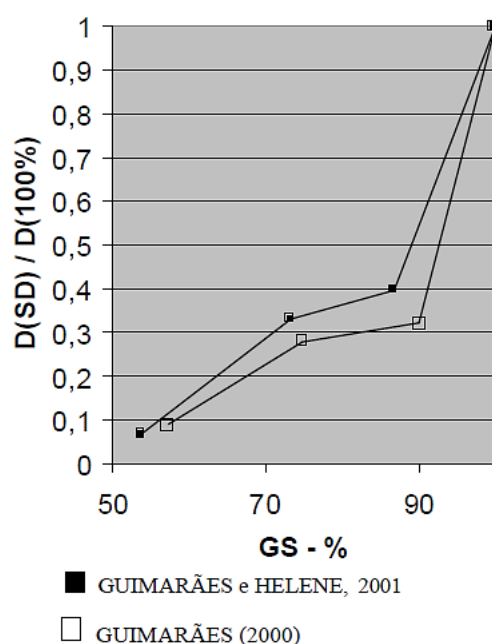


Figura 2.11- Influência do GS na pasta de cimento (GUIMARÃES, 2000) e na argamassa (GUIMARÃES e HELENE, 2001)(Fonte: Guimarães, 2005).

Climent et al. (2002), também relacionaram o coeficiente de difusão de cloretos com a variação do GS. Em sua pesquisa foram utilizados corpos de prova (CPs) de dois traços de concreto de cimento Portland comum denominados H-25 e H-35. Os mesmos foram submetidos à contaminação por cloretos oriundos da queima de PVC, estes CPs se encontravam com diferentes graus de saturação variando de aproximadamente 30 % a 80 %. A relação da variação do coeficiente de difusão de cloretos em função do GS das amostras pode ser observada na figura 2.12.

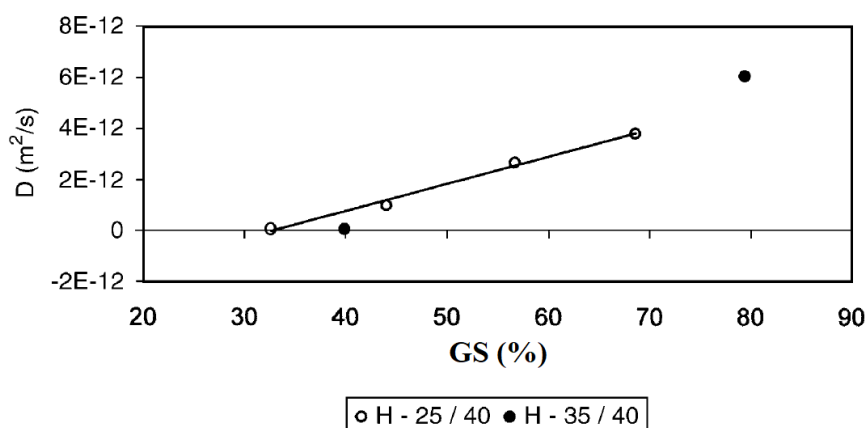


Figura 2.12- Variação do coeficiente de difusão em função do grau de saturação (Fonte: Adaptado de Climent et al., 2002).

Nielsen e Geiker (2003) utilizaram em sua pesquisa testemunhos executados com cimento de alta resistência inicial e relação água cimento de 0,50. Os testemunhos foram expostos a contaminação por imersão em solução de cloreto de sódio a 26 % em massa e posteriormente suas superfícies foram secas utilizando secador de cabelo, obtendo-se assim amostras com grau de saturação de 53,8 % e 59,4 %. Também foram contaminados testemunhos com GS de 100 % em solução de cloreto de sódio a 3 % por 30 dias. Os resultados comparativos entre as diferentes condições de saturação das amostras e o coeficiente de difusão de cloretos são apresentados na figura 2.13.

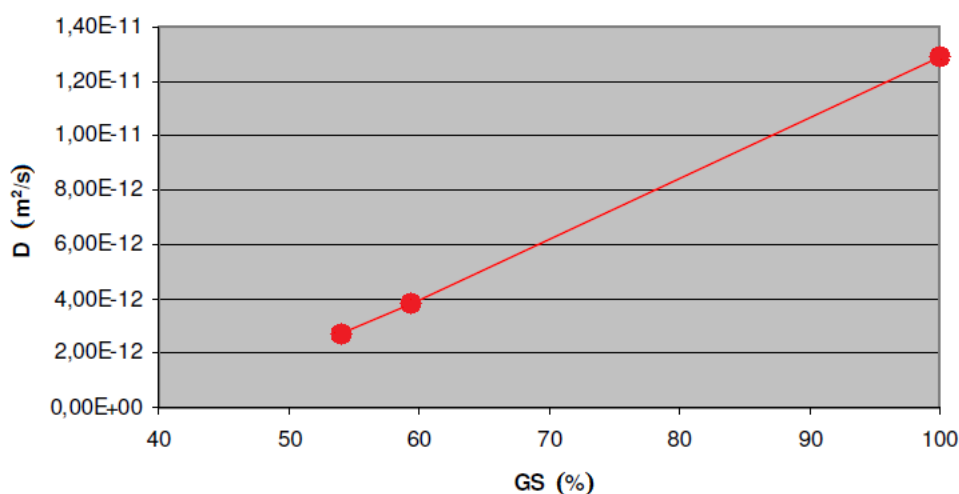


Figura 2.13- Coeficiente de difusão de cloretos em função do grau de saturação do concreto (Fonte: Adaptado de Nielsen e Geiker, 2003).

Guimarães (2005) estudou diferentes traços de concreto executados com cimento pozolânico, variando a relação a/c e o abatimento, expostos no extremo sul do Brasil e analisou a relação do coeficiente de difusão de cloretos com o GS do concreto de cada situação como podemos observar nas figuras 2.14 e 2.15. Como conclusão de seus estudos Guimarães (2005) obteve um nomograma

para a obtenção do coeficiente de redução de D em função da variação sazonal do GS do concreto (RGS) em comparação a condição de concreto saturado, figura 2.16.

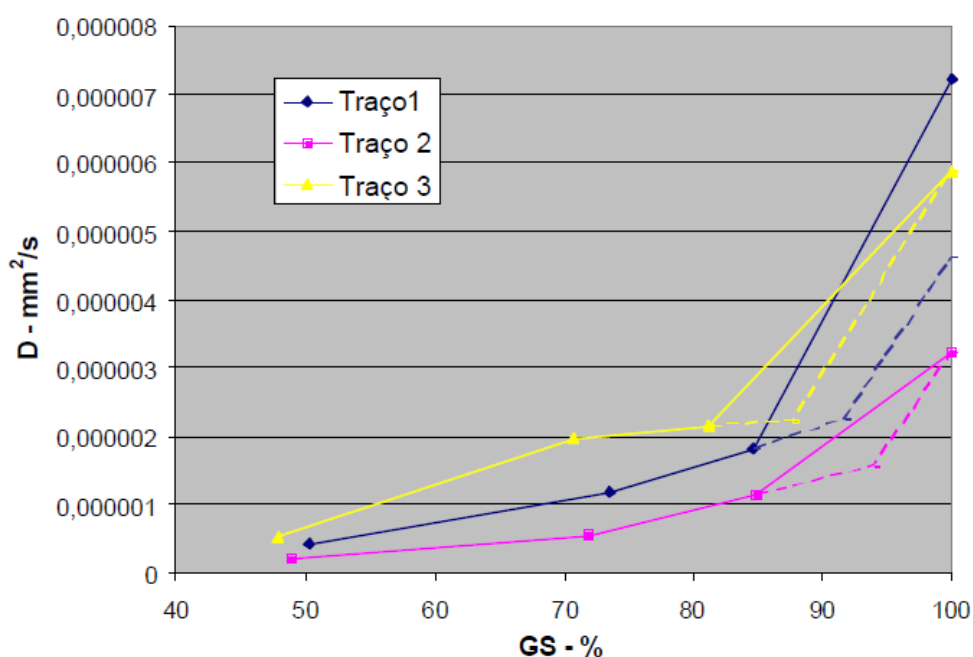


Figura 2.14- Variação do coeficiente de difusão em função da variação do GS para concretos de mesma consistência e diferentes relações a/c (Fonte: Guimarães, 2005).

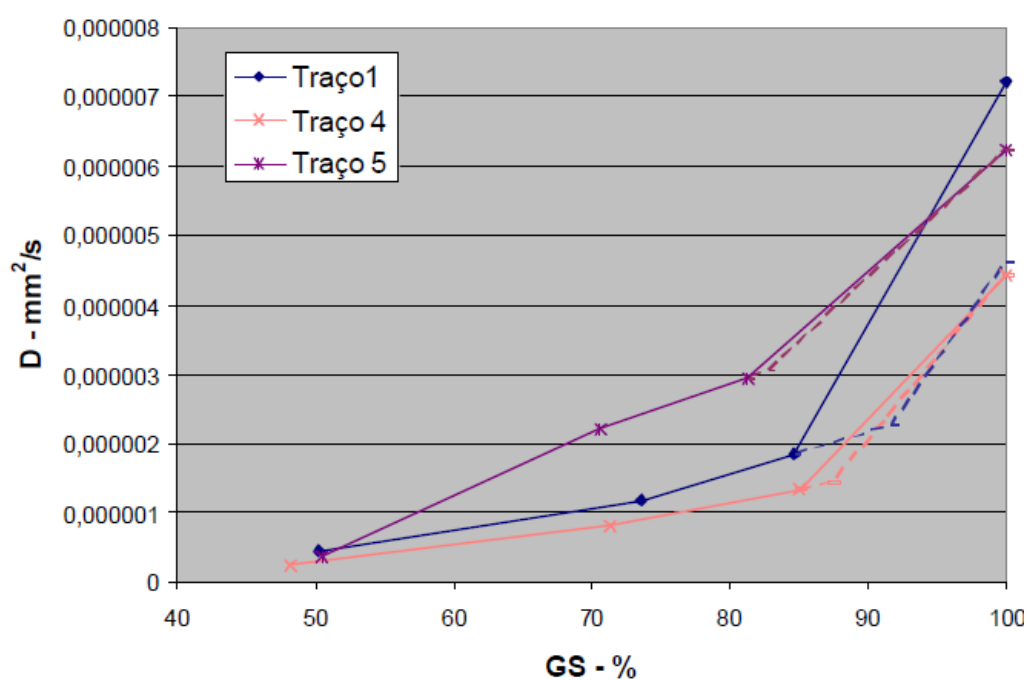


Figura 2.15 - Variação do coeficiente de difusão em função da variação do GS para concretos de mesma relação a/c e diferentes consistências (Fonte: Guimarães, 2005).

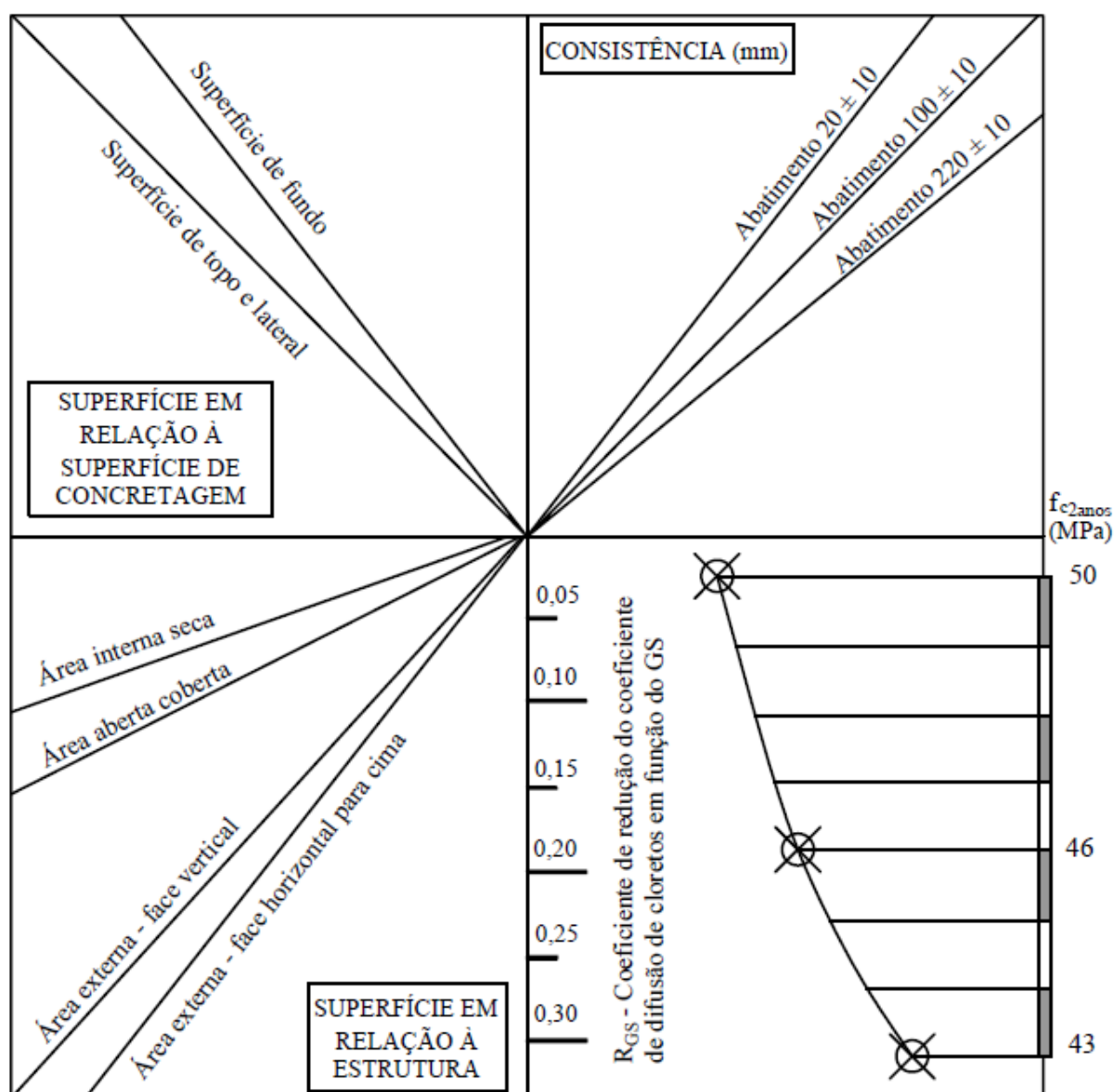


Figura 2.16 - Nomograma para obter o coeficiente de redução do coeficiente de difusão do cloreto - R_{GS} – valor da média anual considerando a variação sazonal do GS. Concreto executado com cimento pozolânico, vibração manual, exposto no extremo sul do Brasil (Adaptado de: Guimarães, 2005).

Mercado-Mendoza et al. (2012) analisaram a influência do grau de saturação e a forma da estrutura de poros no coeficiente de difusão de íons. Os testemunhos de concreto utilizado foram preparados com cimento do tipo CEM-I, cimento Portland comum. Pode-se observar na figura 2.17 a intrínseca relação do GS do concreto com o coeficiente de difusão. A taxa de variação de D em função do GS se mostra um pouco diferente das apresentadas anteriormente. Para GS diminuindo de 100 % a 76 % o coeficiente de difusão decai suavemente, já para GS decaindo de 76 % a 55 % a queda de D é bastante acentuada e por fim entre 55 % e 16 % a relação volta a ser menos intensa.

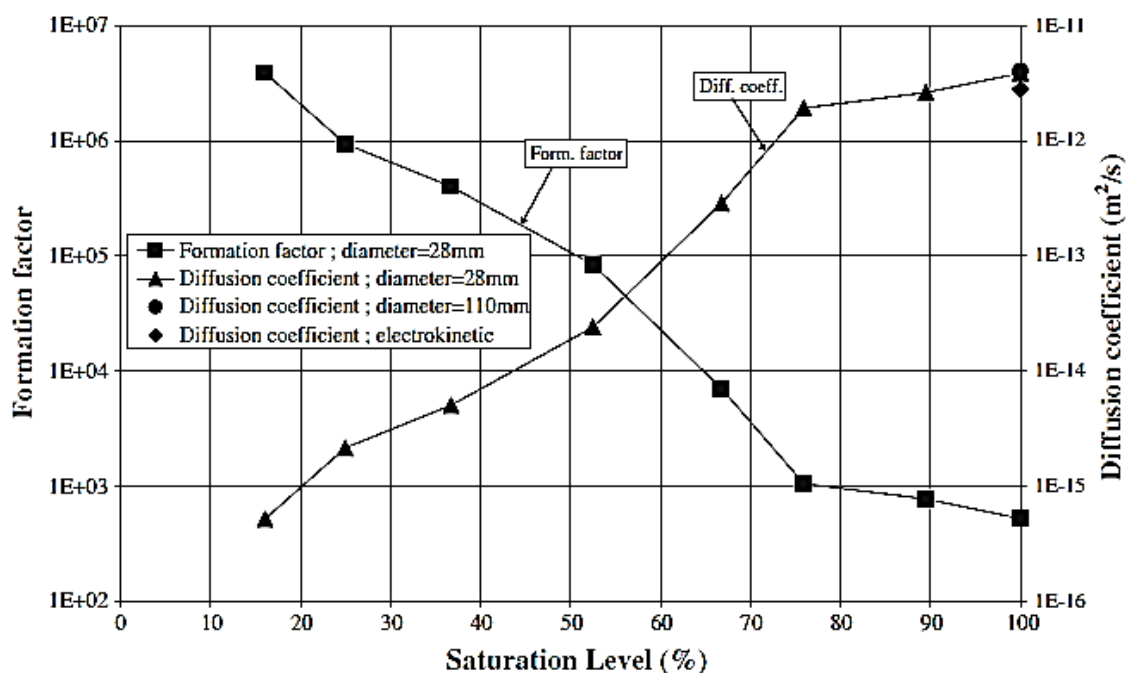


Figura 2.17 - Coeficiente de difusão em função do Grau de saturação (Fonte: Mercado-Mendoza et. al., 2012).

Mercado-Mendoza et al. (2014) realizaram estudo comparativo da relação entre D e GS. Foram utilizados testemunhos de pasta de cimento endurecida e concreto utilizando cimentos tipo CEM-I, cimento Portland comum, e CEM-V, cimento Portland com substituições (escória de alto forno, pozolana, cinza volante). Os resultados obtidos para cada caso podem ser observados nas figuras 2.18, 2.19 e 2.20.

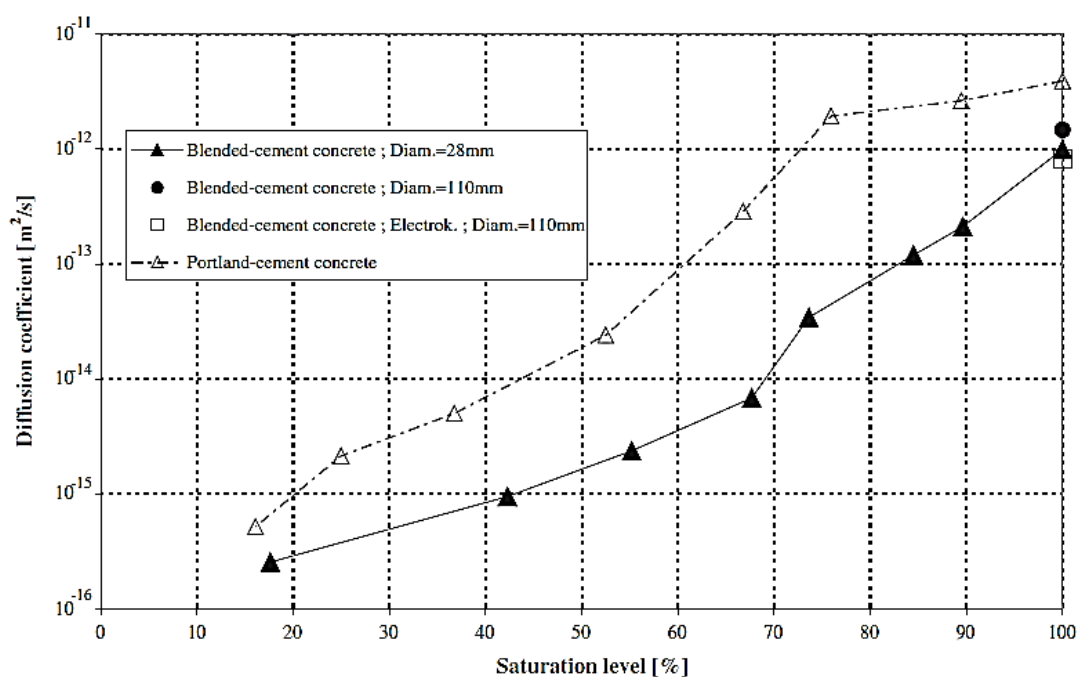


Figura 2.18 - Coeficiente de difusão em função do Grau de saturação (Fonte: Mercado-Mendoza et. al., 2014).

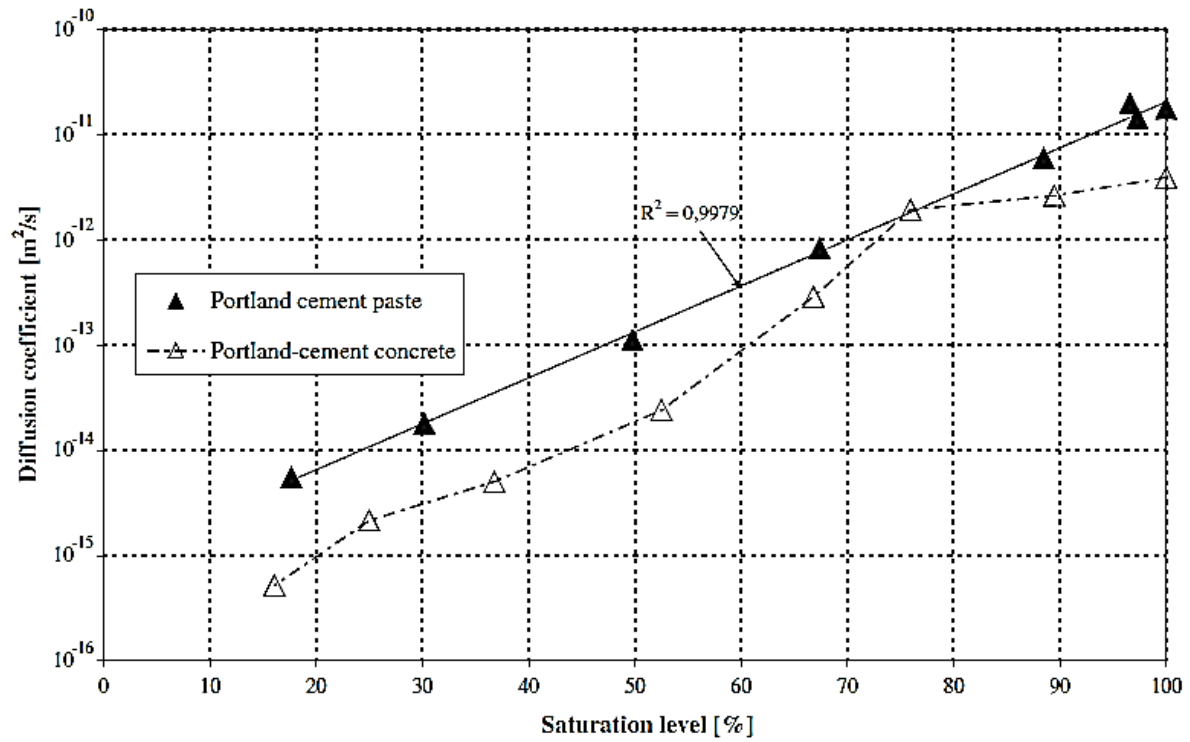


Figura 2.19 - Coeficiente de difusão em função do Grau de saturação CEM-1 (Fonte: Mercado-Mendoza et. al., 2014).

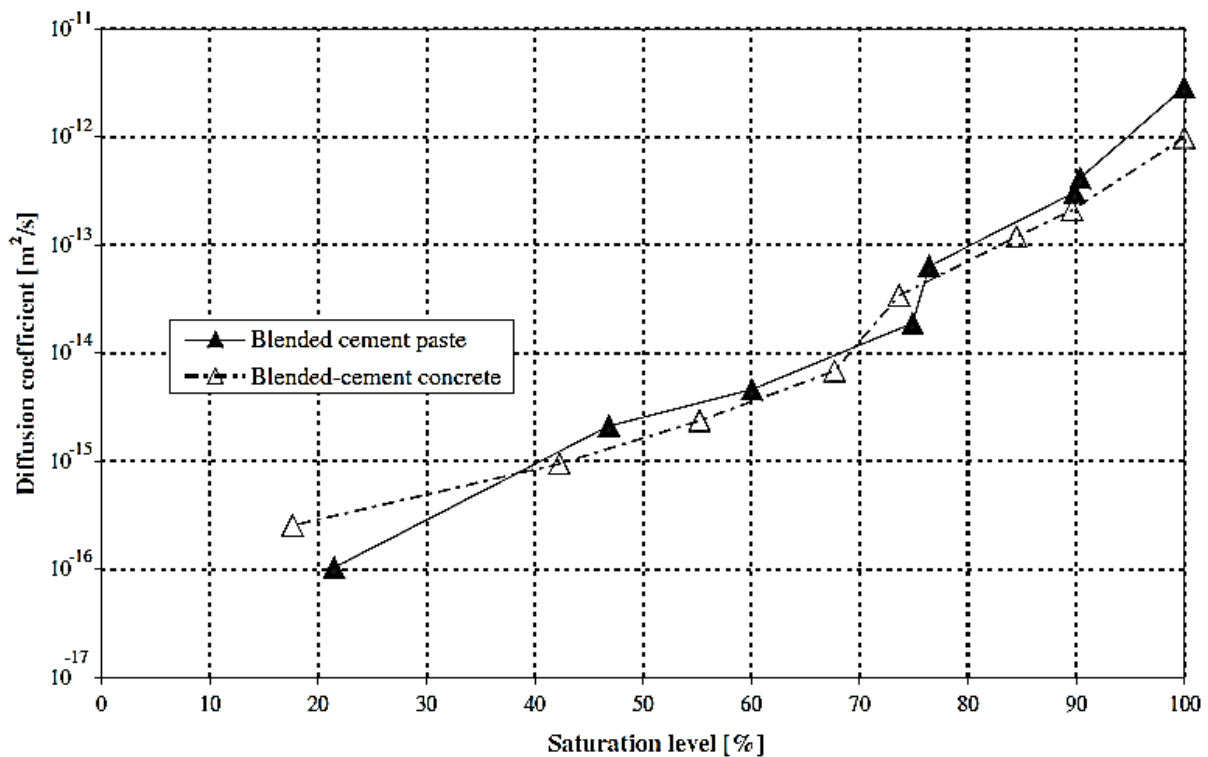


Figura 2.20 - Coeficiente de difusão em função do Grau de saturação CEM-V (Fonte: Mercado-Mendoza et. al., 2014).

2.3.4. Variáveis ambientais que influenciam o grau de saturação do concreto

Vários fatores podem influenciar a variação do GS do concreto, estes podem ser relativos a zona de inserção, as características do concreto, as características da posição em relação a concretagem, as condições de exposição no ambiente tais como sentido da superfície (horizontal ou vertical) e orientação (norte, sul, leste, oeste, para cima e para baixo). Para uma determinada condição de exposição o GS do concreto é influenciado por variáveis meteorológicas que podem agir simultaneamente tais como pressão atmosférica, temperatura do ar seco, temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa, taxa de precipitação, taxa de evaporação interna (Pichê), temperatura de ar úmido, horas de insolação, nebulosidade, taxa de visibilidade, taxa de evaporação externa, velocidade e direção do vento.

Souza (2005) determinou que medições semanais de GS são suficientes para caracterizar a variação de GS nas estações. Peraça (2009) concluiu que para as condições dos testemunhos utilizados por Souza (2005), expostos a intempéries em ambiente de nevoa salina no sul do Brasil, as variáveis mais influentes na variação do GS foram a temperatura máxima (TM) e a umidade relativa (UR) utilizando regressão linear múltipla com estas variáveis. Já Vélchez (2011) em Alicante na Espanha, em trabalho semelhante, utilizou para geração de modelos de previsão do GS, através de regressão linear múltipla, as variáveis temperatura máxima, taxa de precipitação, horas de insolação e umidade relativa.

2.4. Confiabilidade aplicada à avaliação da vida útil de serviço no estado limite de serviço

Estimar a confiabilidade ou consequente probabilidade de falha de determinada estrutura caracteriza-se como uma estratégia probabilística de mensurar o nível de segurança alcançado. As características físicas e químicas dos elementos estruturais e seus materiais, bem como das condições ambientais e de carregamento, são variáveis de caráter aleatório, cujo comportamento estatístico é difícil de ser precisamente estabelecido.

Devido à esta aleatoriedade dos parâmetros envolvidos, os modelos determinísticos acabam apresentando falhas na estimativa do processo de deterioração por ataque de cloretos. Assim, o uso de modelos probabilísticos faz-se fundamental para uma avaliação mais precisa dos mecanismos e processos que estabelecem a deterioração das estruturas de concreto armado.

O presente trabalho busca a aplicação da teoria da confiabilidade na avaliação da influência do grau de saturação do concreto, obtido através das condições ambientais, na estimativa de vida útil no ELS. O objetivo principal não é aprofundar-se em fundamentos teóricos de confiabilidade, bem como os métodos de solução e aplicação dos procedimentos estocásticos. Mais detalhes sobre estes

processos podem ser obtidos em Melchers e Beck (2018), Andrade (2001), Magalhães (2018) e Haldar e Mahadevan (2000).

2.4.1. Conceitos de confiabilidade estrutural

As teorias de confiabilidade permitem quantificar as incertezas e determinar a probabilidade de que um sistema estrutural atinja determinado estado limite. Os conceitos básicos em termos de confiabilidade estão associados ao nível de confiança para o qual uma estrutura apresenta um bom desempenho em serviço. Os processos de projeto buscam garantir uma determinada probabilidade pré-ajustada de falha, ou no caso específico e esperado, de sucesso (SANTIAGO, 2011; MAGALHÃES, 2014).

Tomando-se R como o conjunto de variáveis relacionadas aos esforços resistentes e S os esforços solicitantes, busca-se satisfazer a relação $R > S$ para a garantia da segurança. A estimativa de confiabilidade pode ser tomada em termos de probabilidade de falha [$P(R < S)$] ou probabilidade de sobrevivência [$P(R > S)$]. Quando são conhecidos os principais parâmetros envolvidos no processo (variáveis de entrada) e suas respectivas distribuições de probabilidade pode-se definir a probabilidade de falha ($P_f = P(R < S)$). Sendo R e S contínuas e estatisticamente independentes a probabilidade de falha pode ser definida pela equação 2.7:

$$P_f = \int_0^{\infty} F_R(s) \times f_s(s) ds \quad (2.7)$$

Onde:

P_f é a probabilidade de falha;

F_R é a função de distribuição acumulada de R ;

f_s é a função densidade de probabilidade de S .

Como forma de avaliar a confiabilidade do problema para duas variáveis, R e S , define-se a função margem de segurança (M) do sistema estrutural como a diferença entre a resistência de ruptura (R) da estrutura e a ação (S) a qual a estrutura é submetida, conforme a equação (2.8).

$$M = R - S \quad (2.8)$$

Considerando-se contínuas, com distribuição de probabilidades Normal e estatisticamente independentes as variáveis R e S , pode-se definir o valor esperado da margem de segurança (μ_M) através da equação (2.9). A equação (2.10) apresenta o desvio padrão da margem de segurança (σ_M).

$$\mu_M = \mu_R - \mu_S \quad (2.9)$$

$$\sigma_M = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \quad (2.10)$$

Onde:

σ_R e σ_S representam o desvio padrão capacidade resistente e das ações impostas, respectivamente.

O índice de confiabilidade (β) é definido pela equação (2.11), conforme mostra a Figura 2.21:

$$\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M} \quad (2.11)$$

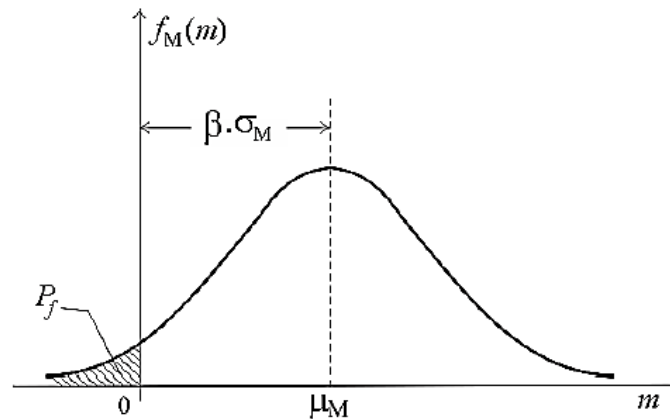


Figura 2.21 – Função densidade de probabilidades da margem de segurança (Fonte: Adaptado de Ang e Tang, 1984).

Tomando-se como Normal a distribuição de probabilidades acumulada (Φ) da margem de segurança através da equação (2.12).

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (2.12)$$

2.4.2. Método de Simulação de Monte Carlo (MCS)

Diversas técnicas são apresentadas para avaliação do índice de confiabilidade ou a probabilidade de falha a este relacionada. Estas técnicas podem ser classificadas em Métodos de Integração Numérica; Métodos Analíticos; Métodos de Simulação e Métodos Mistos ou Híbridos. No presente trabalho foi utilizada a metodologia de simulação numérica de Monte Carlo.

O método de Simulação de Monte Carlo (MCS) envolve a geração de números aleatórios para variáveis com distribuição de probabilidade conhecida (ou assumida) para simular o comportamento de determinado evento. Esta metodologia consiste na realização de inúmeras simulações, baseadas em um conjunto de parâmetros variáveis de entrada cujo modelo de distribuição de probabilidade é previamente estabelecido. O conjunto de resultados individuais obtidos permite a realização de uma análise estatística, possibilitando a determinação das características de distribuição de probabilidades

das variáveis de resposta do sistema (MAGALHÃES, 2014).

A Figura 2.22 apresenta esquematicamente o processo de simulação de Monte Carlo onde a função de falha é definida pela função $g(X) = 0$. Cada ponto na figura representa a resposta de uma simulação. Os pontos dispostos na zona $g(X) < 0$ representam as situações de falha. Os demais pontos representam as situações de sucesso. A probabilidade de falha é definida então pela razão entre o número de falhas e o número total de simulações realizadas, sendo expressa pela equação 2.13.

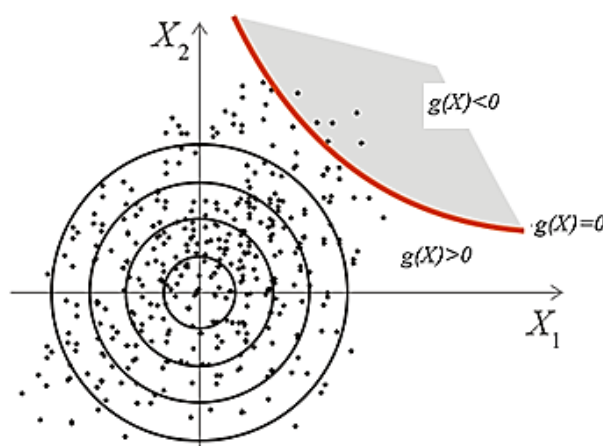


Figura 2.22 – Modelo esquemático do método de simulação de Monte Carlo considerando-se duas variáveis de entrada (Fonte: Adaptado de Magalhães, 2018).

$$Pf = \frac{Nf}{Ns} \quad (2.13)$$

Onde:

Pf é a probabilidade de falha do sistema.

Nf é o número total de falhas nas simulações realizadas.

Ns é o número total de simulações realizadas.

2.4.3. Critério de falha

As avaliações de índices de confiabilidade de elementos estruturais geralmente envolvem a verificação do atingimento de em Estado Limite Último (ELU). Esta aplicação decorre da necessidade de se estabelecer um limite considerado satisfatório de probabilidade de que o dado elemento sofra colapso.

A aplicação da teoria da confiabilidade à avaliação da vida útil, no entanto, tende a se caracterizar por uma avaliação no Estado Limite de Serviço (ELS). A Figura 2.23 apresenta um modelo esquemático do processo de deterioração de um elemento de concreto armado sujeito ao ataque por cloretos. Na primeira fase ocorre a penetração do cloreto no concreto; em seguida inicia-se a corrosão da armadura; posteriormente há a evolução da corrosão da armadura; fissuração inicial do concreto; evolução das fissuras; culminando com o deslocamento do concreto.

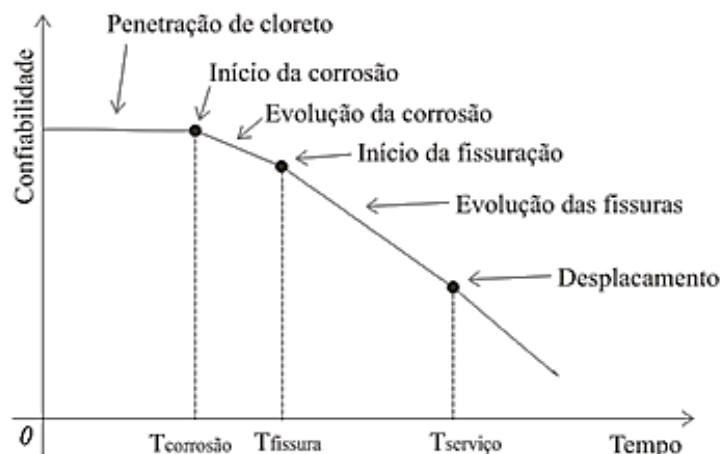


Figura 2.23 – Perfil de confiabilidade de um elemento de concreto armado sujeito à penetração de cloretos (Fonte: Adaptado de Thoft-Christensen, 2001).

Em virtude da dificuldade de recuperação das estruturas após iniciado o processo de corrosão do aço, muitos autores (YU et al., 2017; ANDRADE, 2001; BENTZ, 2003; GJØRV, 2015, entre outros) adotam o início da corrosão como o atingimento do Estado Limite de Serviço.

Magalhães (2018) relata que o processo de deterioração se inicia no momento em que os cloretos atingem um teor crítico dentro do concreto do elemento analisado. No entanto, o exato teor de íons em que esta situação ocorre, bem como o nível de comprometimento considerado como limite para a armadura, são fatores divergentes entre pesquisadores e referenciais normativos do tema.

Nestas considerações, a equação estado limite que representa a confiabilidade do elemento estrutural em termos de estado limite de serviço (ELS) quanto da entrada de agentes agressivos é dada pela equação 2.14:

$$g(x, t) = C_{crit} - C(x, t) \quad (2.14)$$

Onde

C_{crit} representa a concentração crítica de cloretos considerada limite para dar início ao processo de corrosão.

$C_{(x,t)}$ representa a concentração de cloretos na armadura considerando-se um cobrimento x e um tempo t .

3. METODOLOGIA

Visando a avaliação do comportamento do grau de saturação a partir da influência dos fatores ambientais e seu impacto na vida útil de serviço das estruturas, o presente trabalho utiliza dados experimentais obtidos em duas regiões distintas. São adotados resultados do extremo sul do Brasil e do sudeste da Espanha. Neste capítulo são apresentadas as principais características dos ambientes utilizados, detalhados os concretos analisados e discutido o tratamento matemático proposto.

3.1. Ambientes de estudo

Os dois âmbitos de desenvolvimento deste estudo nos quais foram coletados os dados que serão utilizados na pesquisa estão localizados em dois países distintos, um no extremo sul do Brasil na cidade de Rio Grande estado do Rio Grande do Sul e outro na Espanha na cidade de Santa Pola, província de Alicante.

3.1.1. Estação de Rio Grande, Rio Grande do Sul, Brasil

A estação de exposição dos corpos de prova (figura 3.1) se localiza na cidade de Rio Grande –RS, extremo sul do Brasil, com coordenadas Sul 32,040495, Oeste 52,087888 (figura 3.2). Fica distante 1,2 km do canal do porto de Rio Grande e 8,9 km da base meteorológica que monitora os dados ambientais (figura 3.3). Esta estação foi instalada em 2003 para possibilitar o estudo da variação sazonal do GS em diferentes traços de concreto de cimento pozolânico, onde, através de um rack que viabiliza a exposição da face do testemunho em diferentes sentidos e orientações, permite-se a exposição de corpos de prova às intempéries ambientais. Souza (2005) avaliou assim fatores como tipo de curva de distribuição dos dados, tamanho de amostragem, influência do tipo de concreto, tipo de superfície exposta em relação à superfície de concretagem e quanto ao tipo de microambiente. Constatando que apenas uma medição semanal do GS é suficiente para caracterizar sua variação. Peraça (2009) após quatro anos de medições do GS realizou estudo correlacionando a variação do GS com as variáveis ambientais locais.

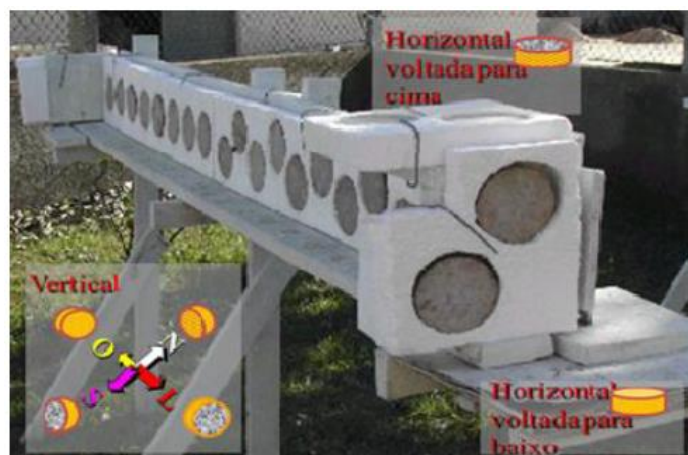


Figura 3.1 - Estação de medição do GS (Fonte: Souza, 2005).



Figura 3.2 - Estação de medição do GS da Universidade Federal do Rio Grande-FURG (Fonte: Guimarães et al., 2010).



Figura 3.3 - Distância da base meteorológica a estação de exposição (Fonte: Peraça, 2009).

3.1.2. Estação de Santa Pola, Alicante, Espanha

A estação de exposição de testemunhos montada no centro de investigações marinhas (CIMAR) da universidade de Alicante (figura 3.4), localizada no cabo de Santa Pola, em Alicante na Espanha de coordenadas Norte 38,209295, Oeste 0,509035 (figura 3.5), sendo distante aproximadamente 105 metros do mar e 9,8 km da base meteorológica de obtenção de dados, está por sua vez distante 4,5 km do mar (figura 3.6). A estação foi montada de maneira semelhante à de Rio grande, permitindo da mesma maneira a exposição das faces dos testemunhos em diferentes sentidos e orientações, esta estação tem algumas características parecidas com a de Rio Grande, tais como a água do mar fica a leste da estação, ambas as estações estão aproximadamente equidistantes do equador, as condições de temperatura, umidade e precipitações apresentam algumas diferenças, sendo que aparentemente a temperatura em Rio grande é um pouco menor em todo ano, porém a umidade relativa e as precipitações são maiores (GUIMARÃES e RODRIGUES, 2010).



Figura 3.4 - Estação de medição do GS (Fonte: Vílchez, 2011).



Figura 3.5 - Localização da estação de medição do GS em Santa Pola, Alicante, Espanha (Fonte: Vílchez, 2011).

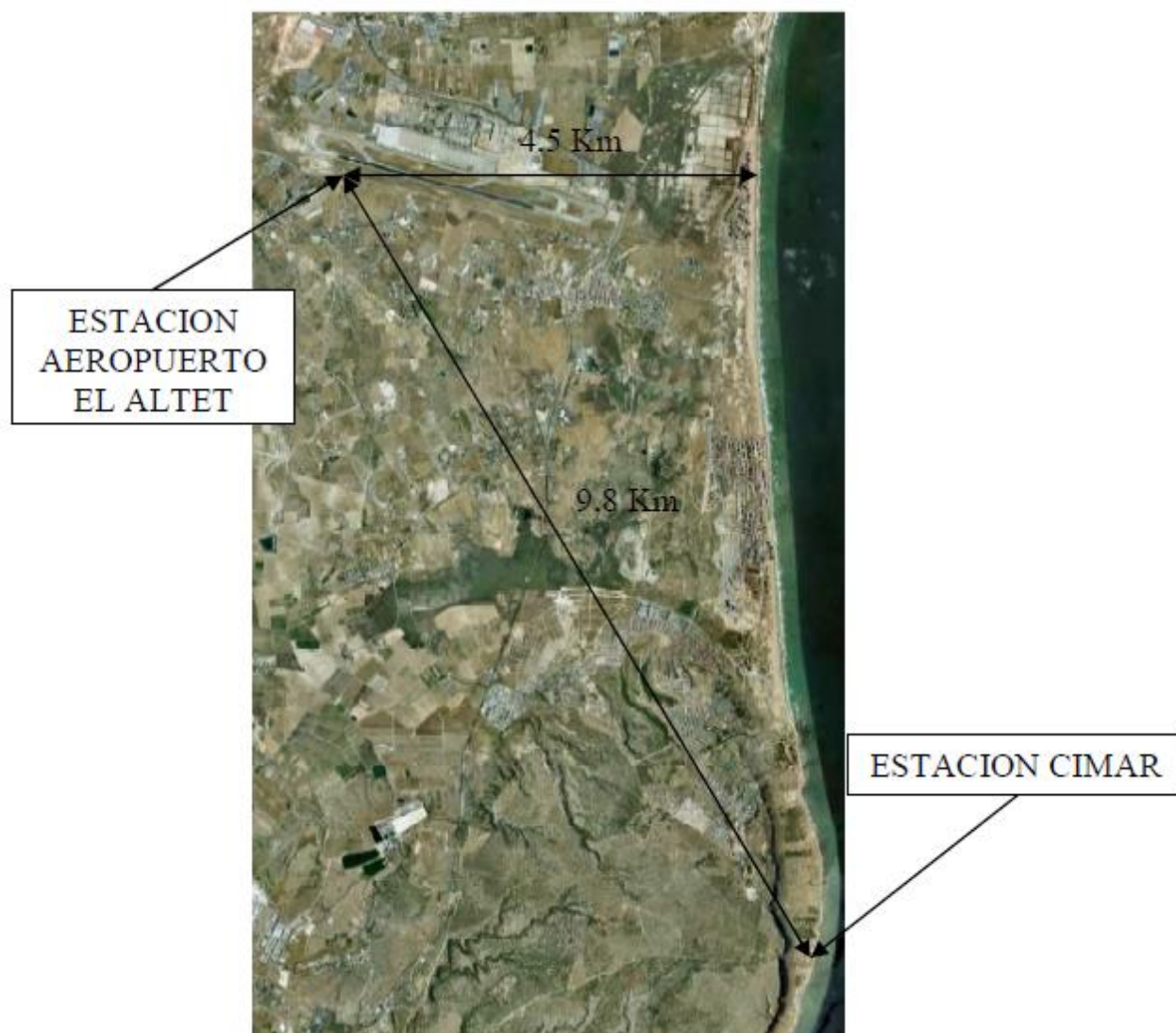


Figura 3.6 - Localização da estação meteorológica em Santa Pola, Alicante, Espanha (Fonte: Vélchez, 2011).

3.2. Testemunhos utilizados

Na pesquisa realizada em Rio Grande foram utilizados, para medição do GS, 30 testemunhos moldados por Souza (2005). Já na pesquisa em Santa Pola foram utilizados por Vélchez (2011) 38 testemunhos, porém apenas 4 testemunhos são os mesmos utilizados por Souza (2005).

3.2.1. Caracterização dos testemunhos utilizados em Rio Grande

Os testemunhos moldados e utilizados são provenientes da execução de 5 traços de concretos distintos (tabela 3.1), onde foi utilizado como agregado miúdo areia quartzosa oriunda da cidade Pelotas-RS, como agregado graúdo pedra britada de origem granítica também da cidade de Pelotas-RS. O cimento, segundo Souza (2005), atendeu a norma brasileira NBR 5736 sendo CPIV-32 marca Votorantim e água potável oriunda da rede pública. Os blocos de concreto moldados permaneceram

em cura úmida por 28 dias e em ambiente de laboratório por 6 meses.

Tabela 3.1 - Traços do concreto utilizado nos testemunhos.

Traços	Cimento	Areia	Brita	Água/cimento	Abatimento (mm)
Traço 1	1	2,12	2,88	0,54	110
Traço 2	1	1,60	2,40	0,45	110
Traço 3	1	2,64	3,36	0,63	110
Traço 4	1	1,60	2,40	0,54	220
Traço 5	1	2,64	3,36	0,54	12

Dos blocos de concreto moldados foram extraídos cilindros de 10cm de diâmetro tanto na posição vertical como horizontal e estes fatiados em testemunhos de aproximadamente 4cm de altura como demonstra a figura 3.7.

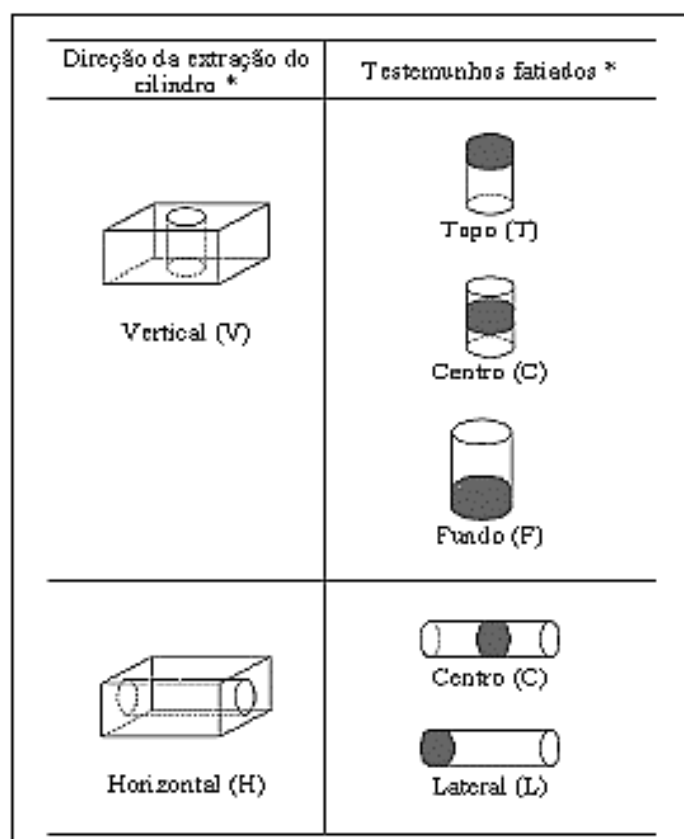


Figura 3.7 - Extração e fatiamento dos testemunhos (Fonte: Souza, 2005).

Para medição do GS em ambiente natural organizaram-se 30 testemunhos de forma a contemplar as combinações de traços executados, direções de extração dos cilindros de concreto e testemunhos fatiados (superfície exposta em relação a superfície de concretagem), juntamente com

as diferentes possibilidades de exposição (microambientes), possibilitaram simular 15 (quinze) distintas situações, sendo 14 inseridas em ambiente externo (figura 3.1) e 1 em ambiente interno (laboratório). Das 15 situações foram formadas famílias de 2 testemunhos cada totalizando 30 testemunhos organizados como disposto na tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Identificação dos testemunhos em Rio Grande-RS, (SOUZA,2005).

Testemunho	Traço	Direção de extração *	Face exposta*	Posição da face exposta	
				Sentido	Direção
1 e 2	1	V	C	V	S
3 e 4	2	V	C	V	S
5 e 6	3	V	C	V	S
7 e 8	4	V	C	V	S
9 e 10	5	V	C	V	S
11 e 12	1	V	T	V	S
13 e 14	1	V	F	V	S
15 e 16	1	H	L	V	S
17 e 18	1	H	C	V	S
19 e 20	1	V	C	H	P/ CIMA
21 e 22	1	V	C	V	L
23 e 24	1	V	C	H	P/ BAIXO
25 e 26	1	V	C	V	N
27 e 28	1	V	C	V	O
29 e 30	1	V	C	V	LAB

*em relação a superfície de concretagem.

3.2.2. Caracterização dos testemunhos utilizados em Santa Pola, Alicante

Vílchez (2011) fez uso de 38 testemunhos de concreto em sua pesquisa, sendo que destes, 4 testemunhos foram levados do Brasil e pertenciam aos traços de concreto executados por Souza (2005). Suas características são listadas na tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Identificação dos testemunhos de Santa Pola, (VÍLCHEZ, 2011).

Testemunho	Traço	Direção de extração do cilindro	Face exposta	Posição da face exposta	
				Sentido	Direção
30	1	V	C	V	N
31	2	V	C	V	N
35	4	V	C	V	N
36	4	V	C	V	N

3.1. Obtenção e compilação dos dados

Para cálculo do grau de saturação dos testemunhos expostos em ambiente natural obteve-se previamente as informações de cada CP, possibilitando a utilização das equações 2.5 e 2.6. De posse da massa seca, absorção máxima e da massa do material de revestimento do testemunho, que permite a exposição de uma única face, é possível determinar o GS do testemunho através de sua massa na data. A tabela 3.4 exemplifica o processo de cálculo através de planilha automatizada para a estação de Rio Grande. O GS dos testemunhos da estação de Santa Pola foram obtidos de maneira análoga.

Tabela 3.4 - Dados da medição de inverno de 2005 do testemunho 1, (Fonte: Peraça, 2009)

Posição	VS				
Testemunho	Denominação	Abs. Máx.	M. seca	M. silicone 1	M. silicone 2
1	1VCa	5,18	760,60	7,19	2,80
Estação	Data	Massa dia	Abs. Dia	GS	
INVERNO	23/06/2005	794,70	3,17	61,19	
	30/06/2005	794,10	3,09	59,67	
	07/07/2005	795,70	3,30	63,73	
	14/07/2005	794,60	3,16	60,94	
	21/07/2005	795,40	3,26	62,97	
	28/07/2005	794,60	3,16	60,94	
	04/08/2005	793,60	3,03	58,40	
	11/08/2005	793,80	3,05	58,91	
	18/08/2005	793,90	3,06	59,16	
	25/08/2005	793,50	3,01	58,15	
	01/09/05	797,20	3,50	67,54	
	08/09/2005	794,80	3,18	61,45	
	15/09/2005	795,60	3,29	63,48	
	22/09/2005	795,10	3,22	62,21	

As medições das variáveis ambientais da base meteorológica mais próxima da estação de Rio Grande-RS foram cedidas pelo Instituto de Oceanografia da Universidade Federal do Rio Grande, um modelo de organização destas variáveis pode ser observado na tabela 3.5, as variáveis obtidas foram pressão atmosférica (PA), temperatura de ar seco (TAS), temperatura máxima (TM), temperatura mínima(TMin), umidade relativa(UR), taxa de precipitação(TP), taxa de evaporação (TE), temperatura de ar úmido (TAU), horas de insolação (HI), nebulosidade (N), taxa de visibilidade (V) e taxa de evaporação externa (TEE). As variáveis ambientais referentes a estação de Santa Pola foram obtidas da rede de dados abertos da agencia estatal de meteorologia (AEMET) espanhola, a estação meteorológica de referência para a obtenção dos dados foi a instalada no aeroporto de El

Altet, localizado no distrito de El Altet na cidade de Elche, os dados obtidos foram temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura média (TMed), taxa de precipitação, horas de insolação, pressão atmosférica máxima (PAMax) e pressão atmosférica mínima (PAMin), as variáveis foram organizadas a exemplo da tabela 3.6. Apesar de Vilchez (2011) constatar a UR como uma das variáveis mais influentes sobre o GS, não se teve acesso a esta variável na rede de dados aberta.

Tabela 3.5 - Dados compilados das variáveis ambientais de Rio Grande-RS.

Data	Pressão Atmosférica	Temperatura do ar seco	Temperatura Máxima	Temperatura Mínima	Umidade Relativa	Taxa de Precipitação	Taxa de Evaporação	Temperatura do ar úmido	Horas de Insolação	Nebulosidade	Visibilidade	Taxa de Evaporação Externa
01/01/04	1,018.40	15.98	21.80	10.70	77.50	-	8.90	14.53	11.30	2.67	7.00	10.34
02/01/04	1,018.23	18.46	23.60	9.70	65.75	-	2.70	16.70	12.80	0.00	7.00	4.78
03/01/04	1,016.33	21.08	27.50	14.10	79.50	-	5.50	20.00	12.50	1.00	7.00	6.52
04/01/04	1,013.07	23.46	29.20	19.50	81.50	-	8.00	21.83	12.80	3.33	7.00	8.04
05/01/04	1,010.23	24.88	31.00	20.80	81.25	-	7.50	23.40	9.50	3.00	7.00	8.8
06/01/04	1,010.53	24.98	31.00	21.30	84.00	-	5.50	23.46	11.40	3.33	7.00	7.78
07/01/04	1,011.87	25.18	30.60	22.20	87.25	-	4.90	23.90	8.90	5.67	7.00	8.14
MÉDIA	1,014.09	22.00	27.81	16.90	79.54	-	6.14	20.55	11.31	2.71	7.00	7.77

Tabela 3.6 - Dados compilados das variáveis ambientais de Santa Pola.

Data	Temperatura Máxima	Temperatura Mínima	Temperatura Média	Taxa de Precipitação	Horas de Insolação	Pressão Atmosférica máxima	Pressão Atmosférica mínima
18/09/2010	28,30	19,60	24,00	0,00	9,50	1.013,70	1.006,30
19/09/2010	27,00	18,30	22,60	0,00	8,30	1.014,30	1.011,40
20/09/2010	25,40	19,40	22,40	24,80	0,00	1.014,40	1.011,30
21/09/2010	28,90	17,50	23,20	0,00	10,80	1.015,10	1.012,00
22/09/2010	26,80	20,30	23,60	0,00	8,90	1.017,00	1.014,60
23/09/2010	26,30	20,00	23,20	5,80	0,00	1.015,50	1.008,30

Data	Temperatura Máxima	Temperatura Mínima	Temperatura Média	Taxa de Precipitação	Horas de Insolação	Pressão Atmosférica máxima	Pressão Atmosférica mínima
24/09/2010	29,60	19,30	24,40	0,00	10,90	1.008,80	1.005,70
25/09/2010	27,60	19,10	23,40	0,00	7,40	1.007,10	1.004,70
26/09/2010	25,70	17,40	21,60	0,00	8,70	1.009,70	1.005,00

De posse dos dados organizou-se os mesmos em médias semanais e sazonais para realização de análises estatísticas.

3.2. Correlação (r)

A correlação entre duas ou mais variáveis representa o quão fortemente elas se relacionam em uma amostragem. O parâmetro de correlação (r) permite fazer inferências sobre o comportamento de determinada variável em relação a outra dentro do espaço amostral, como por exemplo a possibilidade de influência de uma sobre a outra, o nível e o sentido da interação entre as variáveis (DEVORE, 2005).

Quando se buscam modelos para inferir uma determinada variável em função de outra (s) é fundamental analisar como elas se relacionam, pois assim, é possível saber quais variáveis exercem maior influência sobre o parâmetro estudado. Na questão do grau de saturação do concreto e sua relação com as variáveis ambientais realizou-se a correlação do GS medido dos testemunhos com todas as variáveis ambientais das quais se dispunha dados, agrupadas em médias semanais e sazonais para os dados de Rio Grande e Santa Pola. Também se realizou correlação com os dados agrupados das medições de Rio Grande e Santa Pola dos traços 1, 2 e 4 dos quais se dispunha dados de ambas as estações, agrupados em médias sazonais. Analisou-se assim quais exercem maior influência sobre o GS, os resultados das correlações serão apresentados no capítulo 4.

3.3. Regressão linear simples e múltipla

A regressão linear consiste na realização de uma análise estatística que objetiva a obtenção de um modelo matemático entre uma variável dependente (Y) com uma variável (X) (regressão linear simples) ou mais variáveis independentes ($x_1, x_2, \dots, x_n$) (regressão linear múltipla). Desta forma, a regressão consiste na obtenção de uma equação que explica a variação da variável dependente em função da ou das variáveis independentes. O parâmetro utilizado para inferir a precisão do modelo obtido é chamado de coeficiente de determinação (r^2), que varia de 0 a 1 e expressa quanto por cento

dos resultados da variável dependente podem ser obtidos no modelo através da (s) variável (s) independentes. A representação gráfica do fenômeno pode ser feita através do diagrama de dispersão, para verificar como se comportam os valores da variável dependente Y em função da variação da variável independente X (PETERNELLI, 2018).

Quando utiliza-se um modelo de regressão para um fenômeno dito aleatório o nível de ajuste dos pontos reais à curva matemática não é de 100 %, logo, busca-se minimizar os erros dividindo-os de maneira igualitária acima e abaixo da curva proposta, de maneira que melhor se ajustem os valores de Y da curva matemática aos da observação em função da variação de X. O modelo de ajuste obtido através da regressão linear simples pode ser observado na equação 3.1, enquanto o da regressão linear múltipla na equação 3.2.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 \quad (3.1)$$

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n \quad (3.2)$$

Onde:

Y é a variável dependente que se deseja obter.

β_0 é a interseção da reta de ajuste com o eixo y.

$\beta_1; \beta_2; \dots \beta_n$ são os coeficientes de ajuste de cada variável dependente.

$x_1; x_2; \dots x_n$ são as variáveis independentes.

Realizaram-se regressões lineares simples através do gráfico de dispersão para os dados agrupados de cada família de concreto de ambas as estações, organizados por médias semanais e sazonais, permitindo-se assim avaliar o coeficiente de determinação r^2 de cada modelo, elencando-se, a melhor determinação dentre os modelos. Tal análise também foi realizada para os dados da estação de Santa Pola conjuntamente com os da estação de Rio Grande, podendo-se assim comparar o comportamento das dispersões.

Realizaram-se também regressões lineares múltiplas para cada família de concreto com as 3 variáveis independentes de maior correlação, obtendo-se assim modelos para cada família de concreto do Brasil e da Espanha.

3.4. Erro dos modelos

O processo de regressão linear para a obtenção de modelos matemáticos que representem as variáveis em estudo gera imprecisão no modelo devido a uma certa aleatoriedade dos fenômenos estudados. Os erros dos modelos obtidos através da regressão linear podem ser analisados utilizando-

se as variáveis independentes da regressão como parâmetros de entrada do modelo obtido. Pode-se então comparar o valor obtido do modelo matemático com o valor real do parâmetro através da equação 3.3.

$$ERRO(\%) = \frac{Y_{EST.} - Y_{REAL}}{Y_{REAL}} \times 100 \quad (3.3)$$

Onde:

$ERRO(\%)$ é o erro percentual do modelo no ponto estudado.

$Y_{EST.}$ é a variável dependente obtida do modelo de regressão.

Y_{REAL} é a variável dependente medida.

3.5. Aplicação probabilística

3.5.1. Modelagem do mecanismo de penetração de cloretos

A solução da 2ª Lei de Fick foi utilizada como modelo básico para simular o comportamento da entrada de agentes agressivos no concreto. O critério de falha adotado para a avaliação da confiabilidade é o atingimento de um teor crítico de cloretos na profundidade da armadura do elemento estrutural de concreto armado. Neste caso, trata-se de uma análise no estado limite de serviço (ELS) quanto à entrada de agentes agressivos no concreto, que pode ser expressa matematicamente através da equação 3.4:

$$g(x,t) = C_{crit} - C(x,t) \quad (3.4)$$

Onde C_{crit} representa a concentração crítica de cloretos capaz de desencadear o processo de despassivação da armadura e $C(x,t)$ refere-se à concentração de cloretos em uma profundidade de cobrimento x num dado tempo t .

A metodologia adotada foi baseada na proposta de Guimarães (2000), considerando a influência do tipo de cimento, da temperatura média anual, do grau de saturação do concreto e da direção da concretagem. A concentração superficial de cloretos no elemento foi considerada constante ao longo do tempo, bem como o coeficiente de difusão do concreto. Embora se tenha conhecimento (UJI et al., 1990 apud FREDERIKSEN et al., 2008; COSTA e APPLETON, 1999; SHENGJUN 2016; BORBA JR., 2011) da variação que ocorre na concentração de cloretos na superfície da estrutura e da variação temporal do coeficiente de difusão (SONG et al., 2013; COSTA e APPLETON, 1999; YANG et al., 2017), optou-se pela consideração de parâmetros constantes, vistos que o foco da análise está na variação do grau de saturação do concreto.

Desta forma, o modelo de perfil de cloretos $C(x,t)$ adotado é, matematicamente descrito

através da equação 3.5.

$$C_{(x,t)} = C_S \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{R_C \cdot R_{GS} \cdot R_T \cdot R_{SC} \cdot D_0 \cdot t}} \right) \quad (3.5)$$

Onde:

C_S é a concentração superficial de cloretos em função do tempo;

$\operatorname{erfc}()$ é a função complementar erro de Gauss.

R_C é o coeficiente de correção devido à influência do cimento utilizado;

R_{GS} é o coeficiente de correção devido à influência do grau de saturação do concreto;

R_T é o coeficiente de correção devido à influência da temperatura ambiente;

R_{SC} é o coeficiente de correção devido à influência da superfície exposta em relação à concretagem;

D_0 é o coeficiente de difusão de referência do concreto.

3.5.2. Dados utilizados para a calibração do modelo

Para o processo de simulação foram utilizados os dados experimentais de elementos estruturais de concreto armado em ambiente de severa agressividade apresentados por Guimarães (2000). Tratam-se de resultados obtidos da estrutura do cais Terminal de Containers (TECON) do superporto da cidade de Rio Grande – RS.

Não é intenção do presente trabalho, apresentar a descrição completa das características da estrutura pesquisada por Guimarães (2000); maiores informações podem ser obtidas em Bretanha (2004) e Guimarães (2005).

A Tabela 3.7 apresenta a classificação dos microambientes dos pontos em que o perfil de penetração de cloretos foi determinado.

Tabela 3.7: Microambientes identificados na análise (Fonte: adaptado Bretanha, 2004).

Ponto	Sigla	Condições ambientais predominantes
PS	ZTN	Zona sujeita a névoa durante todos os dias do ano (100 %); não há ciclos de molhagem e secagem devido à variação de maré.
PI	ZPN	Zona com predomínio de névoa (85 %). Respingo (15 %).
ES	ZPNRM	Zona com predomínio de névoa (50 %) e respingo (45 %) durante os dias do ano. Ciclos de molhagem e secagem (variação de maré) durante pequeno período de tempo (5 %).
EI	ZPRMN	Zona com predomínio de respingo (58 %) e ciclos de molhagem e secagem (35 %). Sujeito a névoa salina durante pequeno período de tempo (7 %).

Os perfis de penetração de cloretos obtidos por Guimarães (2000) estão graficamente apresentados através da Figura 3.8. Estes perfis, assim como as características dos materiais empregados descritas pelo autor, foram utilizados para calibrar a concentração superficial de cloretos para cada uma das análises.

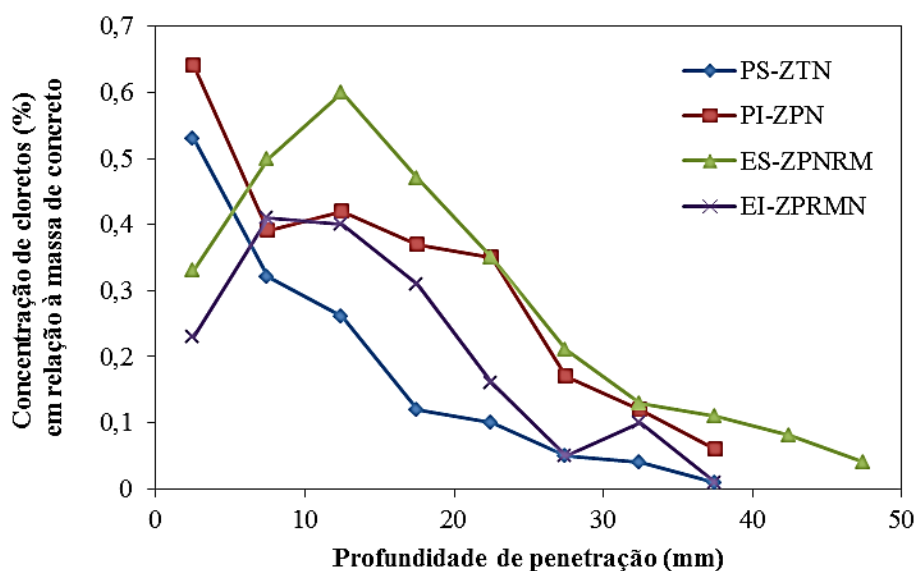


Figura 3.8 - Perfil de penetração de cloretos nos pontos analisados no cais do TECON (Fonte: Guimarães, 2000).

A precisão na descrição da variabilidade das variáveis envolvidas no problema é imprescindível para que a resposta esperada seja coerente como fenômeno que está sendo modelado. Bentz (2003) afirma que a forte dependência da resposta do modelo aos parâmetros de entrada adotados é um dos fatores que mais limitam o uso dos modelos probabilísticos.

Os valores médios das variáveis utilizadas nas avaliações realizadas, bem como suas distribuições de probabilidades e dispersões, estão apresentados na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Parâmetros e distribuição de probabilidades das variáveis utilizadas na avaliação da confiabilidade.

Variável	Unidade	Média	Coef. de variação (<i>V</i>)	Distribuição estatística	Referência
C_S	-	2,46	0,20	LN	Yu et al. (2017)
C_{crit}	%	0,40	0,15	N	Helene (1993) Yu et al. (2017)
R_{GS}	-	0,205	0,05	LN	Guimarães (2005)*
	-	1,00	0,00	-	-
	-	Conforme modelos de GS			Autor
R_T	-	0,81	0,20	N	Bretanha (2004)*
R_{SC}	-	0,74	0,20	LN	Guimarães

Variável	Unidade	Média	Coef. de variação (<i>V</i>)	Distribuição estatística	Referência
					(2000)*
R_c	-	0,64	0,00	-	-
D_0	cm ² /ano	104	0,10	N	Bentz (2003)
x	cm	x MÉDIO	0,10	N	Magalhães (2014)

N – Normal; LN – LogNormal; *obtido das dados do autor.

3.6. Resumo da metodologia adotada

A figura 3.9 apresenta um resumo da metodologia proposta através de um fluxograma de trabalho.

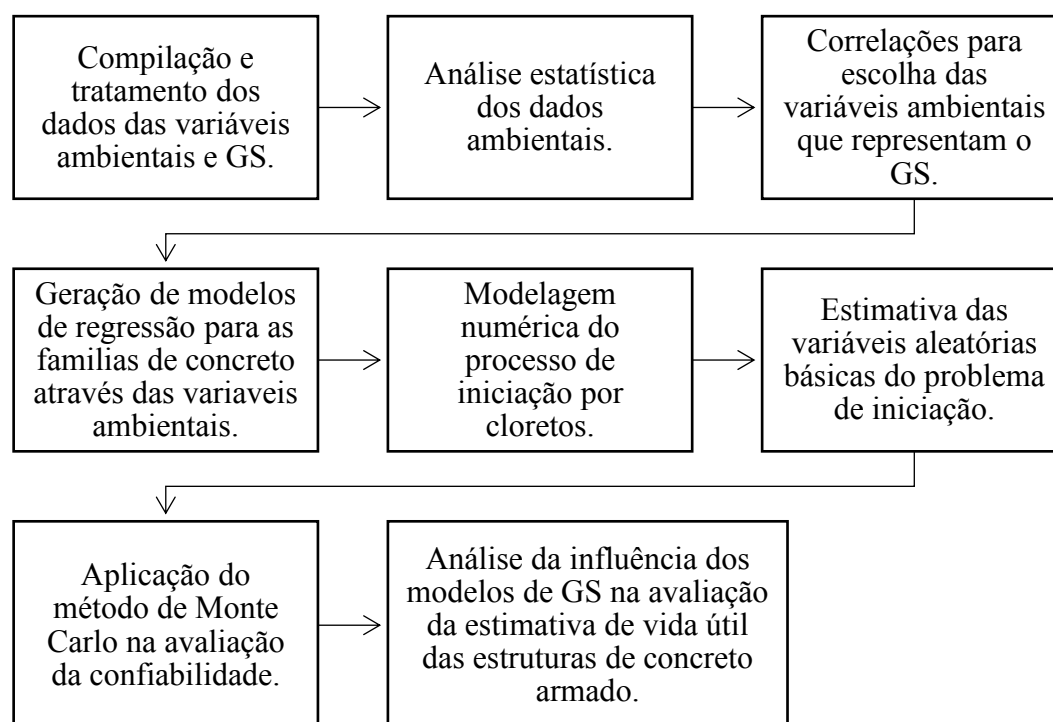


Figura 3.9 - Fluxograma da metodologia proposta.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Serão discutidos neste capítulo os principais resultados obtidos através da metodologia proposta.

4.1. Correlação (r)

A seguir apresenta-se os resultados obtidos para as correlações realizadas de todas as variáveis disponíveis da estação de Rio Grande, organizadas em médias semanais e sazonais, e também, as médias das correlações dos CPs 1 a 28 tendo-se em vista que os CPs 29 e 30 foram expostos em ambiente de laboratório. Tomou-se também as médias das correlações dos CPs 1 a 18 haja vista a semelhança nas características de exposição, apesar de serem executados com diferentes traços de concreto e ter diferentes faces de exposição em relação a superfície de concretagem, pode-se verificar grande semelhança das correlações destes testemunhos com as variáveis ambientais. Na tabela 4.1 e 4.2 pode-se observar as correlações das variáveis organizadas em médias semanais com todos os testemunhos expostos, as três melhores correlações de cada família estão preenchidas em amarelo.

Tabela 4.1 - Resultado das correlações para médias semanais das variáveis (Rio Grande) 2004-2007. Continua.

CORRELAÇÃO (r) PARA MÉDIAS SEMANAIS DAS VARIÁVEIS (RIO GRANDE) 2004-2007						
VARIÁVEIS	Temperatura ar úmido (TAU)	Horas de Insolação (HI)	Nebulosidade (N)	Visibilidade (V)	Taxa de Evaporação Ext. (TEE)	Pressão Atmosférica (PA)
GS CPS 1 e 2	-0.6602	-0.4953	0.3431	-0.2965	-0.3800	0.4633
GS CPS 3 e 4	-0.6262	-0.4563	0.2983	-0.2826	-0.3947	0.4649
GS CPS 5 e 6	-0.6611	-0.4684	0.3339	-0.3063	-0.3773	0.4551
GS CPS 7 e 8	-0.6625	-0.4610	0.3296	-0.3000	-0.3660	0.4445
GS CPS 9 e 10	-0.6301	-0.5130	0.3692	-0.3836	-0.3941	0.4360
GS CPS 11 e 12	-0.6292	-0.5154	0.3861	-0.3618	-0.3784	0.4243
GS CPS 13 e 14	-0.5339	-0.4174	0.2662	-0.2287	-0.3807	0.4341
GS CPS 15 e 16	-0.6275	-0.4485	0.3183	-0.3102	-0.3572	0.4096
GS CPS 17 e 18	-0.6241	-0.4405	0.3067	-0.2631	-0.3625	0.4469
GS CPS 19 e 20	-0.5536	-0.5479	0.4012	-0.1164	-0.3743	0.4253
GS CPS 21 e 22	-0.4453	-0.3980	0.2597	-0.3189	-0.3746	0.3818
GS CPS 23 e 24	-0.3655	-0.3312	0.2517	-0.2727	-0.3074	0.2871
GS CPS 25 e 26	-0.5341	-0.4276	0.3316	-0.3368	-0.2719	0.3413
GS CPS 27 e 28	-0.6196	-0.4180	0.2862	-0.2914	-0.3565	0.4687

CORRELAÇÃO (r) PARA MÉDIAS SEMANAIS DAS VARIÁVEIS (RIO GRANDE) 2004-2007

VARIÁVEIS	Temperatura ar úmido (TAU)	Horas de Insolação (HI)	Nebulosidade (N)	Visibilidade (V)	Taxa de Evaporação Ext. (TEE)	Pressão Atmosférica (PA)
GS CPS 29 e 30	-0.2135	-0.1601	0.1608	-0.2035	-0.1755	0.1333
Média (r) CPS 1 a 28	-0.5838	-0.4527	0.3201	-0.2906	-0.3625	0.4202
Média (r) CPS 1 a 18	-0.6283	-0.4684	0.3279	-0.3036	-0.3768	0.4421

Tabela 4.2 - Resultado das correlações para médias semanais das variáveis (Rio Grande) 2004-2007. Conclusão.

CORRELAÇÃO (r) PARA MÉDIAS SEMANAIS DAS VARIÁVEIS (RIO GRANDE) 2004-2007

VARIÁVEIS	Temperatura do ar seco (TAS)	Temperatura Máxima (TM)	Temperatura Mínima (TMÍN)	Umidade Relativa (UR)	Taxa de Precipitação (TP)	Taxa de Evaporação (TE)
GS CPS 1 e 2	-0,7087	-0,7460	-0,6487	0,5246	0,3189	-0,6826
GS CPS 3 e 4	-0,6752	-0,7068	-0,6158	0,5162	0,2461	-0,6501
GS CPS 5 e 6	-0,6902	-0,7371	-0,6238	0,4256	0,2597	-0,6732
GS CPS 7 e 8	-0,6835	-0,7285	-0,6180	0,3892	0,2688	-0,6712
GS CPS 9 e 10	-0,6675	-0,7294	-0,5982	0,4456	0,2642	-0,6958
GS CPS 11 e 12	-0,6585	-0,7163	-0,5907	0,4175	0,2826	-0,6882
GS CPS 13 e 14	-0,6039	-0,6301	-0,5508	0,5820	0,1759	-0,5645
GS CPS 15 e 16	-0,6438	-0,6902	-0,5802	0,3594	0,2433	-0,6465
GS CPS 17 e 18	-0,6614	-0,6964	-0,6000	0,4648	0,2539	-0,6324
GS CPS 19 e 20	-0,6117	-0,6453	-0,5462	0,5614	0,2678	-0,6237
GS CPS 21 e 22	-0,5334	-0,5556	-0,4863	0,6321	0,1588	-0,5035
GS CPS 23 e 24	-0,4280	-0,4872	-0,3684	0,4547	0,0949	-0,4555
GS CPS 25 e 26	-0,5717	-0,6393	-0,5026	0,4115	0,2801	-0,5618
GS CPS 27 e 28	-0,6637	-0,7079	-0,6005	0,4736	0,2259	-0,6283
GS CPS 29 e 30	-0,2393	-0,3084	-0,1920	0,1846	0,0296	-0,2777
Média (r) CPS 1 a 28	-0,6286	-0,6726	-0,5665	0,4756	0,2386	-0,6198
Média (r) CPS 1 a 18	-0,6658	-0,7090	-0,6029	0,4583	0,2570	-0,6560

Pode-se verificar que os coeficientes de correlação não se apresentam muito elevados, este fato pode se dar devido a inércia da variação do GS em relação as variáveis ambientais, mudanças bruscas e repentinas das condições ambientes podem demorar a refletir na variação do Grau de Saturação dos testemunhos. Dentre as famílias de concreto analisadas as melhores correlações para

médias semanais das variáveis se deram com a temperatura de ar seco, temperatura máxima e taxa de evaporação. Também notou-se que não se apresentam grandes diferenças dos coeficientes de correlação de cada família para as médias dos coeficientes de correlação, exceto para os testemunhos 13 e 14 que tem a face de exposição de fundo em relação a superfície de concretagem e com as famílias 1920 e 2324 que tem a superfície de exposição voltada para cima e para baixo respectivamente. Apresenta-se a seguir na tabela 4.3 e 4.4 as correlações para médias sazonais das variáveis de Rio Grande.

Tabela 4.3 - Resultado das correlações para médias sazonais das variáveis (Rio Grande) 2004-2007.
Continua.

CORRELAÇÃO (r) PARA MÉDIAS SAZONAIS DAS VARIÁVEIS (RIO GRANDE) 2004-2007						
VARIÁVEIS	Temperatura ar úmido (TAU)	Horas de Insolação (HI)	Nebulosidade (N)	Visibilidade (V)	Taxa de Evaporação Ext. (TEE)	Pressão Atmosférica (PA)
GS CPS 1 e 2	-0.8472	-0.6812	0.6603	-0.4736	-0.7337	0.8257
GS CPS 3 e 4	-0.7774	-0.6353	0.6227	-0.4956	-0.6832	0.7821
GS CPS 5 e 6	-0.8650	-0.6475	0.6881	-0.5304	-0.6987	0.7907
GS CPS 7 e 8	-0.8522	-0.6313	0.6769	-0.5144	-0.6756	0.7566
GS CPS 9 e 10	-0.8406	-0.7108	0.7563	-0.6734	-0.7313	0.7681
GS CPS 11 e 12	-0.8786	-0.7107	0.7626	-0.6376	-0.7333	0.7847
GS CPS 13 e 14	-0.6369	-0.5584	0.5192	-0.3910	-0.6078	0.7117
GS CPS 15 e 16	-0.8215	-0.6221	0.6589	-0.5444	-0.6579	0.7182
GS CPS 17 e 18	-0.7961	-0.6050	0.6079	-0.4597	-0.6667	0.7676
GS CPS 19 e 20	-0.7220	-0.7235	0.6981	-0.1285	-0.6489	0.7880
GS CPS 21 e 22	-0.5336	-0.5030	0.4173	-0.5195	-0.6129	0.6447
GS CPS 23 e 24	-0.4725	-0.4040	0.4356	-0.5085	-0.4536	0.4990
GS CPS 25 e 26	-0.7312	-0.5464	0.6023	-0.5972	-0.6015	0.6689
GS CPS 27 e 28	-0.7582	-0.5796	0.6075	-0.5018	-0.6376	0.7383
GS CPS 29 e 30	-0.3041	-0.1836	0.2886	-0.4646	-0.2260	0.2526
Média (r) CPS 1 a 28	-0.7524	-0.6113	0.6224	-0.4983	-0.6531	0.7317
Média (r) CPS 1 a 18	-0.8128	-0.6447	0.6614	-0.5244	-0.6876	0.7673

Tabela 4.4 - Resultado das correlações para médias sazonais das variáveis (Rio Grande) 2004-2007.
Conclusão.

CORRELAÇÃO (r) PARA MÉDIAS SAZONAIS DAS VARIÁVEIS (RIO GRANDE) 2004-2007						
VARIÁVEIS	Temperatura do ar seco (TAS)	Temperatura Máxima (TM)	Temperatura Mínima (TMÍN)	Umidade Relativa (UR)	Taxa de Precipitação (TP)	Taxa de Evaporação (TE)
GS CPS 1 e 2	-0.8646	-0.8776	-0.8495	0.5871	0.4301	-0.7858
GS CPS 3 e 4	-0.8037	-0.8172	-0.7868	0.6036	0.4153	-0.7279
GS CPS 5 e 6	-0.8554	-0.8864	-0.8333	0.4390	0.4001	-0.7866
GS CPS 7 e 8	-0.8310	-0.8600	-0.8086	0.3783	0.4245	-0.7780
GS CPS 9 e 10	-0.8406	-0.8874	-0.8141	0.4612	0.4517	-0.8301
GS CPS 11 e 12	-0.8619	-0.9019	-0.8362	0.4066	0.4667	-0.8487
GS CPS 13 e 14	-0.6962	-0.7006	-0.6855	0.6959	0.2942	-0.5896
GS CPS 15 e 16	-0.7960	-0.8274	-0.7722	0.3443	0.4236	-0.7688
GS CPS 17 e 18	-0.8044	-0.8186	-0.7871	0.5181	0.3858	-0.7183
GS CPS 19 e 20	-0.7603	-0.7543	-0.7515	0.6531	0.4440	-0.7057
GS CPS 21 e 22	-0.6191	-0.6127	-0.6150	0.7692	0.1986	-0.5131
GS CPS 23 e 24	-0.5209	-0.5646	-0.5014	0.4865	0.1683	-0.4496
GS CPS 25 e 26	-0.7425	-0.7927	-0.7162	0.4484	0.3560	-0.6701
GS CPS 27 e 28	-0.7767	-0.8075	-0.7579	0.5231	0.3315	-0.6891
GS CPS 29 e 30	-0.3139	-0.3838	-0.2891	0.1469	0.0365	-0.2647
Média (r) CPS 1 a 28	-0.7695	-0.7935	-0.7511	0.5225	0.3707	-0.7044
Média (r) CPS 1 a 18	-0.8171	-0.8419	-0.7970	0.4927	0.4102	-0.7593

Pode-se observar que para médias sazonais são obtidos os melhores coeficientes de correlação, estes aumentam em torno de 20 % quando comparados com os da média semanal, esta melhor correlação para médias sazonais pode ser explicada pelo comportamento sazonal do GS do concreto. As variáveis que mais influenciam o GS são a temperatura de ar úmido, temperatura de ar seco, temperatura máxima. Na tabela 4.5 é apresentado um resumo das médias das correlações.

Tabela 4.5 - Resumo das correlações, Rio grande.

RESUMO DAS CORRELAÇÕES (r) DAS VARIÁVEIS MAIS INFLUENTES (RIO GRANDE)					
VARIÁVEIS	Temperatura ar úmido (TAU)	Temperatura do ar seco (TAS)	Temperatura Máxima (TM)	Temperatura Mínima (TMÍN)	Taxa de Evaporação (TE)
Média semanal (r) CPS 1 a 28	-0.5838	-0.6286	-0.6726	-0.5665	-0.6198
Média semanal (r) CPS 1 a 18	-0.6283	-0.6658	-0.709	-0.6029	-0.656
Média sazonal (r) CPS 1 a 28	-0.7524	-0.7695	-0.7935	-0.7511	-0.7044
Média sazonal (r) CPS 1 a 18	-0.8128	-0.8171	-0.8419	-0.797	-0.7593

Para as variáveis da estação de Santa Pola realizou-se também correlações por médias semanais e sazonais. Os dados de medição de GS oriundos da estação de Santa Pola apresentam diversos períodos sem dados, caracterizando falhas na amostragem. Para a correlação semanal este fato não é relevante, haja visto que a medição de GS é comparada com os dados climáticos da semana antecedente a medição. Porém, para a correlação de médias sazonais, este fato pode implicar em erros, haja visto que se faz necessária uma medição semanal de GS para caracterizar cada estação sazonal. Para minimizar os erros utilizou-se na correlação apenas as estações do ano que possuíam pelo menos 70% das medições de GS. Os resultados das correlações são apresentados na tabela 4.6 e 4.7.

Tabela 4.6 - Resultado das correlações para médias semanais das variáveis (Santa Pola).

CORRELAÇÃO (r) PARA MÉDIAS SEMANAIS DAS VARIÁVEIS (SANTA POLA)								
VARIÁVEIS	Temperatura Máxima (TM)	Temperatura Mínima (TMÍN)	Temperatura Média (TMÉD)	Taxa de Precipitação (TP)	Horas de Insolação (HI)	Pressão Atmosférica máxima (PAMáx)	Pressão Atmosférica mínima (PAMín)	Pressão Atmosférica média (PAMéd)
GS VCP1 (30)	-0,3774	-0,2938	-0,3389	0,5180	-0,0593	0,0111	0,0415	0,0262
GS VCP2 (31)	-0,4335	-0,3322	-0,3865	0,5605	-0,1293	0,1086	0,0914	0,1005
GS VCP4 (35 E 36)	-0,3873	-0,3110	-0,3526	0,4796	-0,0384	0,0046	0,0314	0,0179
Média (r) CPS	-0,3994	-0,3123	-0,3593	0,5194	-0,0757	0,0414	0,0548	0,0482

Tabela 4.7 - Resultado das correlações para médias sazonais das variáveis (Santa Pola).

CORRELAÇÃO (r) PARA MÉDIAS SAZONAIS DAS VARIÁVEIS (SANTA POLA)								
VARIÁVEIS	Temperatura Máxima (TM)	Temperatura Mínima (TMÍN)	Temperatura Média (TMÉD)	Taxa de Precipitação (TP)	Horas de Insolação (HI)	Pressão Atmosférica máxima (PAMáx)	Pressão Atmosférica mínima (PAMín)	Pressão Atmosférica média (PAMéd)
GS VCP1 (30)	-0,5471	-0,5226	-0,5352	0,5088	-0,0385	-0,3187	-0,1701	-0,2744
GS VCP2 (31)	-0,6211	-0,5611	-0,5908	0,7621	-0,3715	0,0435	-0,1342	-0,0305
GS VCP4 (35 E 36)	-0,5246	-0,4913	-0,5081	0,6418	-0,0901	-0,2554	-0,1420	-0,2224
Média (r) CPS	-0,5643	-0,5250	-0,5447	0,6376	-0,1667	-0,1769	-0,1488	-0,1758

Como se observa na tabela 4.6 os coeficientes de correlação se apresentam mais baixos para Santa Pola do que para Rio grande, não indicando tão boa correlação do GS com as variáveis estudadas. Esta situação pode dever-se ao fato do GS sofrer influência de um conjunto de variáveis mais amplo e não de apenas uma variável isolada. Já na tabela 4.7 nota-se uma melhora nos coeficientes quando se utilizam média sazonais, porém os coeficientes ainda são inferiores aos apresentados em Rio Grande. As três melhores correlações estão destacadas nas tabelas, sendo que, para médias sazonais há significância razoável nas correlações das variáveis. Nas tabelas 4.8 e 4.9 apresenta-se os resultados das correlações realizadas para os testemunhos expostos em ambas as estações de medição para médias semanais e sazonais respectivamente.

Tabela 4.8 - Resultado das correlações para médias semanais das variáveis (Rio Grande + Santa Pola).

CORRELAÇÃO (r) PARA MÉDIAS SEMANAIS DAS VARIÁVEIS (RIO GRANDE + SANTA POLA)						
VARIÁVEIS SANTA POLA* (RIO GRANDE)	Temperatura Máxima (TM)	Temperatura Mínima (TMÍN)	Temperatura Média (TMÉD)	Taxa de Precipitação (TP)	Horas de Insolação (HI)	Pressão Atmosférica média (PAMéd)
GS CP 30*, (1 E 2)	-0,4327	-0,2807	-0,3616	0,4335	-0,1588	0,1703
GS CP 31*, (3 E 4)	-0,3027	-0,1409	-0,2243	0,4410	-0,2026	0,2344
GS CP 35 E 36*, (7 E 8)	-0,2187	-0,0632	-0,1420	0,4398	-0,1704	0,2084
Média (r) CPS	-0,3180	-0,1616	-0,2426	0,4381	-0,1772	0,2044

Tabela 4.9 - Resultado das correlações para médias sazonais das variáveis (Rio Grande + Santa Pola).

CORRELAÇÃO (r) PARA MÉDIAS SAZONAIS DAS VARIÁVEIS (RIO GRANDE + SANTA POLA)						
VARIÁVEIS *SANTA POLA () RIO GRANDE	Temperatura Máxima (TM)	Temperatura Mínima (TMÍN)	Temperatura Média (TMÉD)	Taxa de Precipitação (TP)	Horas de Insolação (HI)	Pressão Atmosférica média (PAMéd)
GS CP 30*, (1 E 2)	-0,4347	-0,2960	-0,3662	0,7673	-0,4564	0,4624
GS CP 31*, (3 E 4)	-0,2554	-0,1036	-0,1792	0,8548	-0,5369	0,5868
GS CP 35 E 36*, (7 E 8)	-0,1833	-0,0353	-0,1087	0,8550	-0,4581	0,5459
Média (r) CPS	-0,2911	-0,1450	-0,2180	0,8257	-0,4838	0,5317

Analisando-se a tabela 4.8 nota-se que não se obtém bons coeficientes de correlação para médias semanais das variáveis, sendo que os melhores coeficientes se dão entre o GS e temperatura máxima e GS e taxa de precipitação, que são as variáveis de melhor correlação para médias semanais das variáveis de Rio Grande e Santa Pola separadamente. Já na tabela 4.9 para médias sazonais a uma melhora significativa nos coeficientes, sendo que, para a taxa de precipitação há uma boa correlação. A seguir apresenta-se nas figuras 4.1 e 4.2 os gráficos da variação temporal das variáveis e do GS de cada estação de medição.

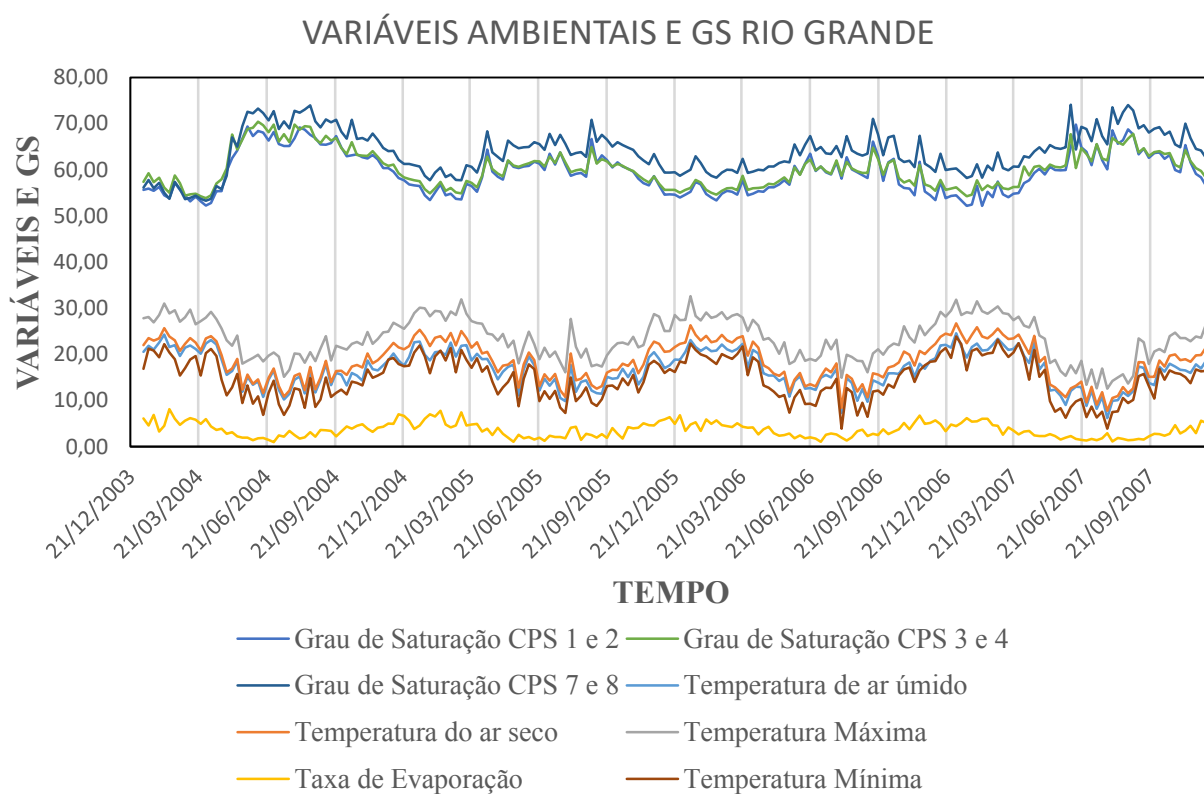


Figura 4.1 - Gráfico da variação temporal das variáveis (Rio Grande) 2004-2007.

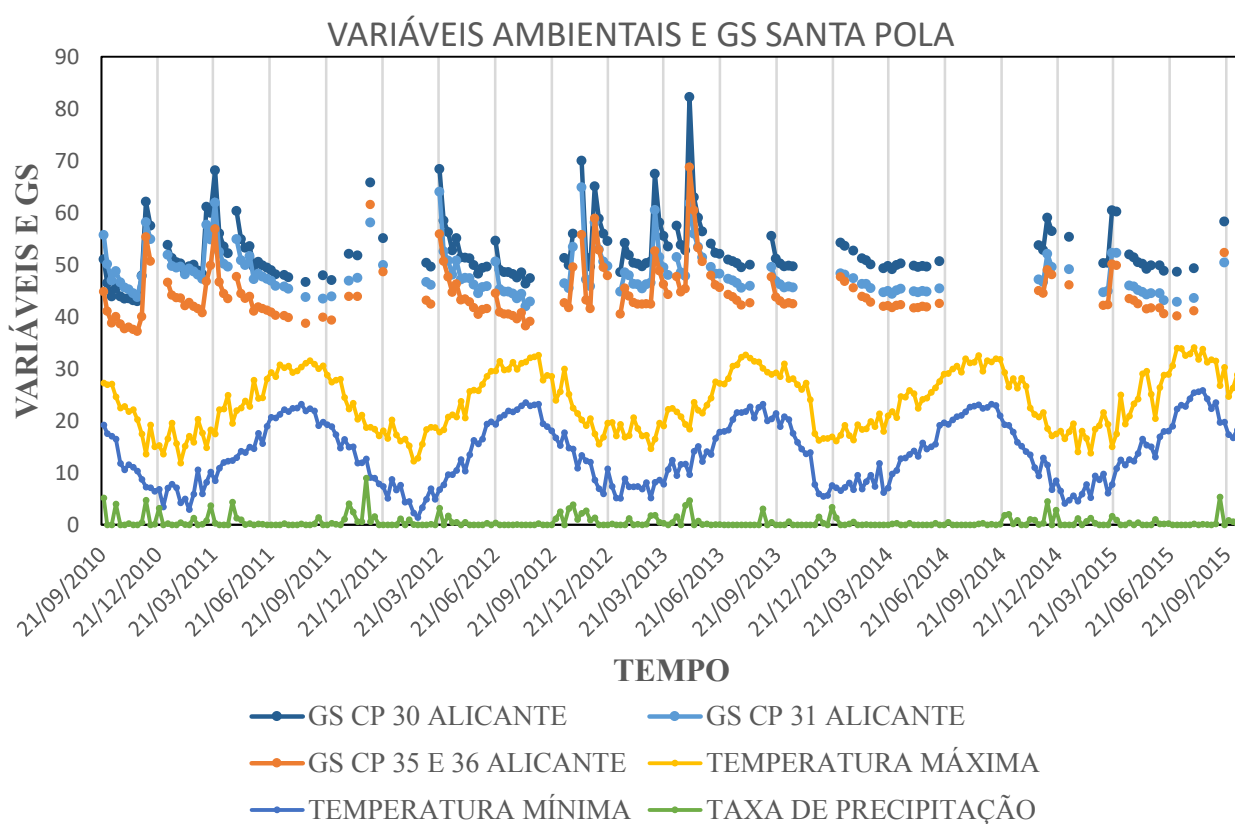


Figura 4.2 - Gráfico da variação temporal das variáveis (Santa Pola) 2010 a 2015.

Através das figuras 4.1 e 4.2 pode-se observar o comportamento sazonal das variáveis climáticas e também do GS, bem como sua correlação negativa ou positiva.

4.2. Regressão linear simples

Para um melhor entendimento dos resultados das correlações pode-se observar através dos gráficos de dispersão e da linha de tendência o comportamento do GS em função de cada parâmetro ambiental estudado. Elencou-se das tabelas de correlação a variável mais influente de cada arranjo de dados. Com os dados pertinentes gerou-se gráficos de dispersão onde obtêm-se a linha de tendência e sua respectiva equação (regressão linear simples) bem como o coeficiente de determinação r^2 que expressa o grau de ajuste dos pontos ao modelo matemático proposto. A seguir apresenta-se nas figuras 4.3 a 4.9 alguns dos gráficos de dispersão e sua respectiva linha de tendência para o melhor coeficiente de determinação entre o GS dos CPs 1 e 2 da estação de Rio Grande, 30 da estação de Santa Pola e ambos os dados conjuntos. Os demais gráficos de dispersão são encontrados nos apêndices A1, A2, B1, B2, C1 e C2.

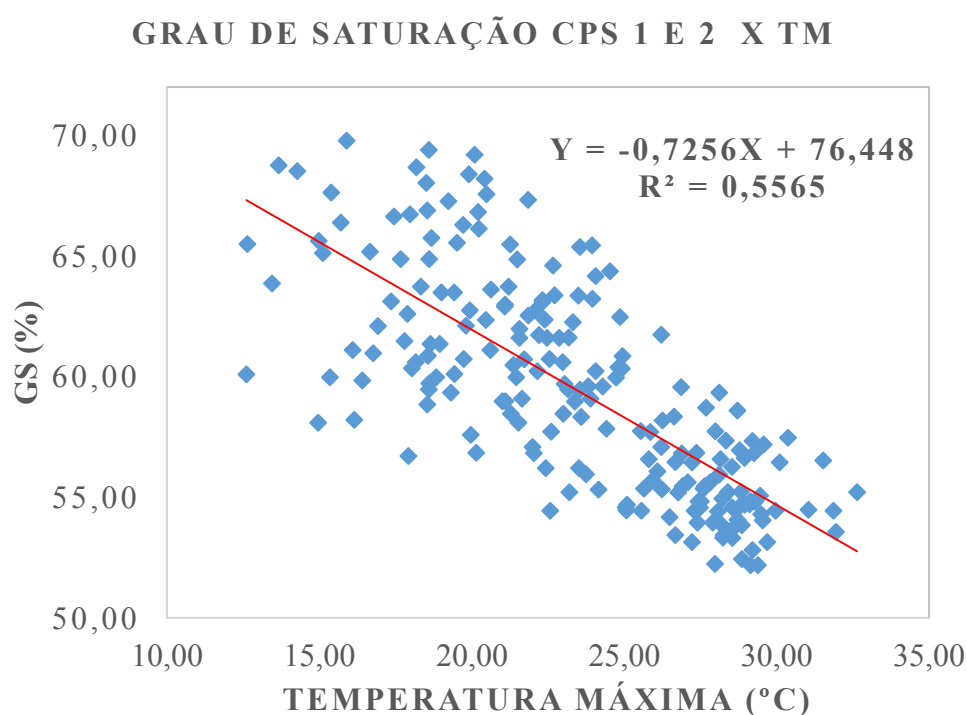


Figura 4.3 - Gráfico de dispersão GS x TM família 1 e 2 para média semanal (Rio Grande).

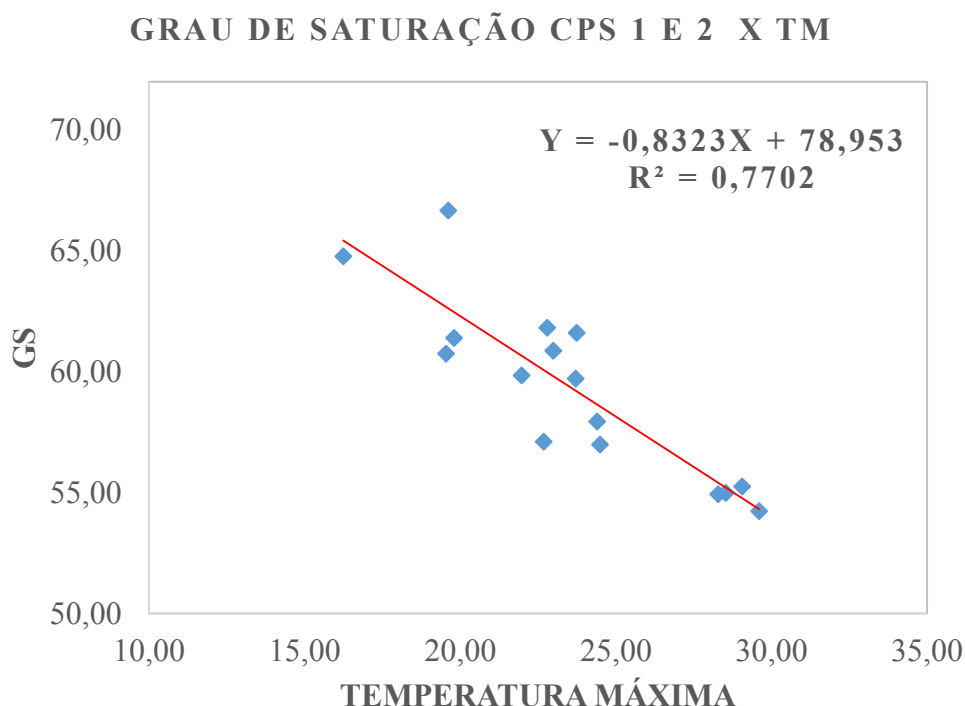


Figura 4.4 - Gráfico de dispersão GS x TM família 12 para média sazonal (Rio Grande).

É possível observar, através dos gráficos de dispersão, a influência das médias utilizadas, na figura 4.3 a tendência da dispersão é facilmente observada, porém muitos pontos distam mais de 5 unidades da linha de tendência, em consequência disso o coeficiente r^2 não é elevado. Quando se utilizam médias sazonais a precisão do modelo aumenta consideravelmente, obtendo-se um melhor coeficiente de determinação, este fato pode ser explicado pelo comportamento sazonal do GS como mostra a figura 4.1.

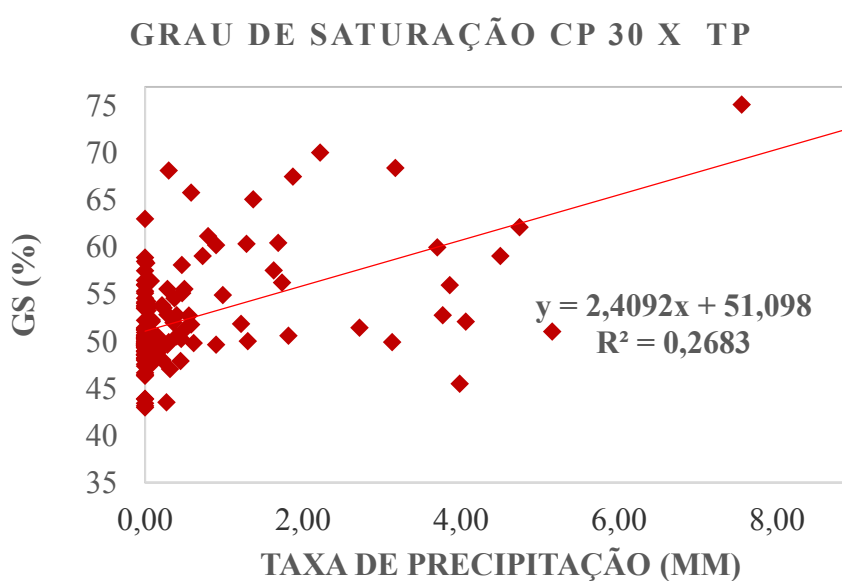


Figura 4.5 - Gráfico de dispersão GS x TP para CP 30 para média semanal (Santa Pola).

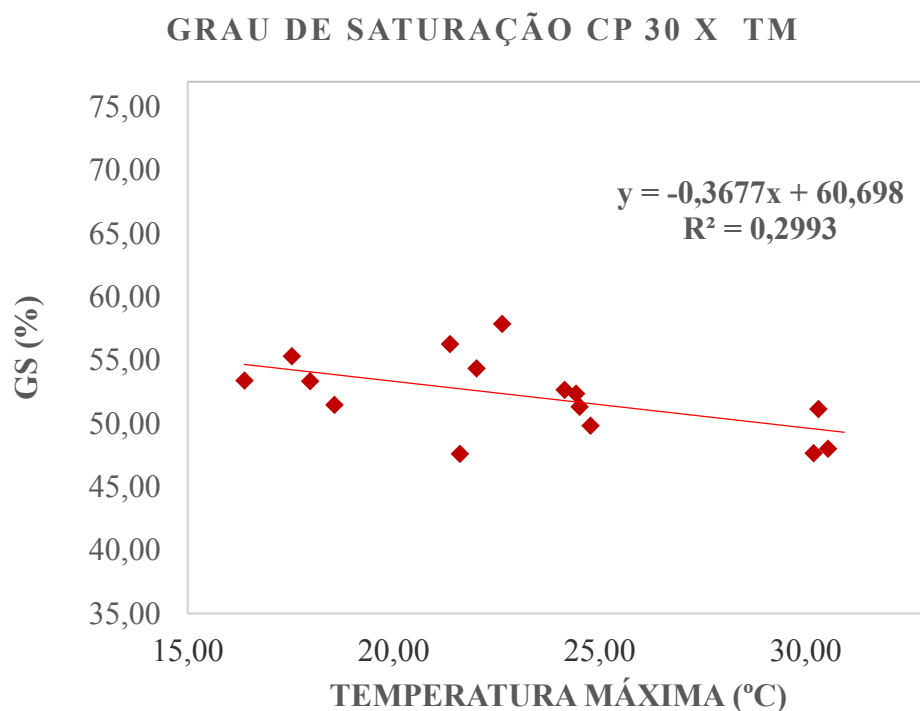


Figura 4.6 - Gráfico de dispersão GS x TM para CP 30 para média sazonal (Santa Pola).

Para os testemunhos expostos em Santa Pola obtiveram-se coeficientes de determinação menores que os obtidos para Rio Grande, bem como as variáveis mais influentes foram a taxa de precipitação para médias semanais, divergindo de Rio Grande, e temperatura máxima para médias sazonais igual a Rio Grande.

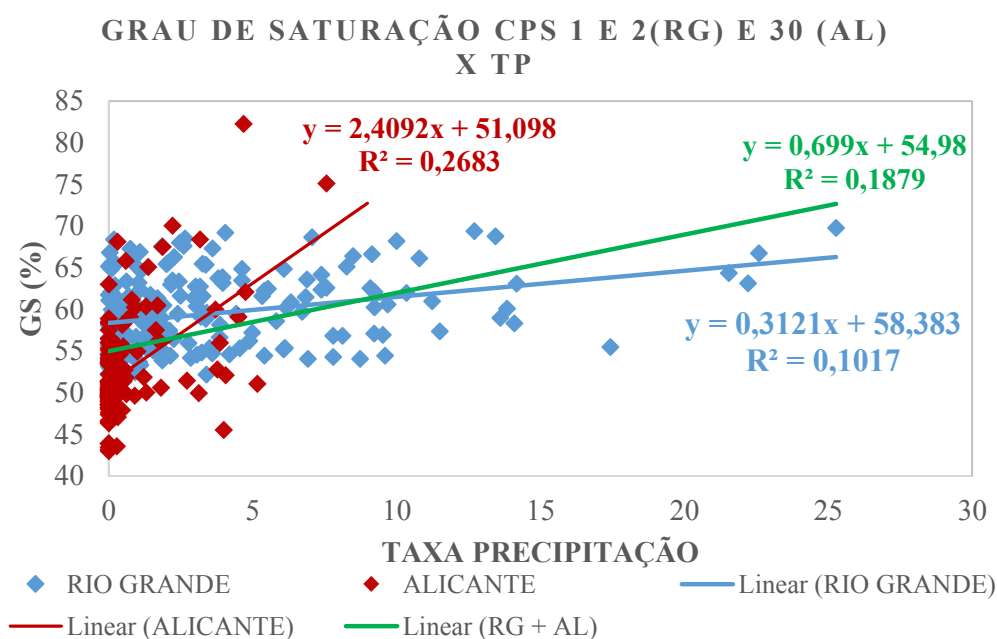


Figura 4.7 - Gráfico de dispersão GS x TP CP 30 (Santa Pola) e CPs 1 e 2 (Rio Grande) para média semanal.

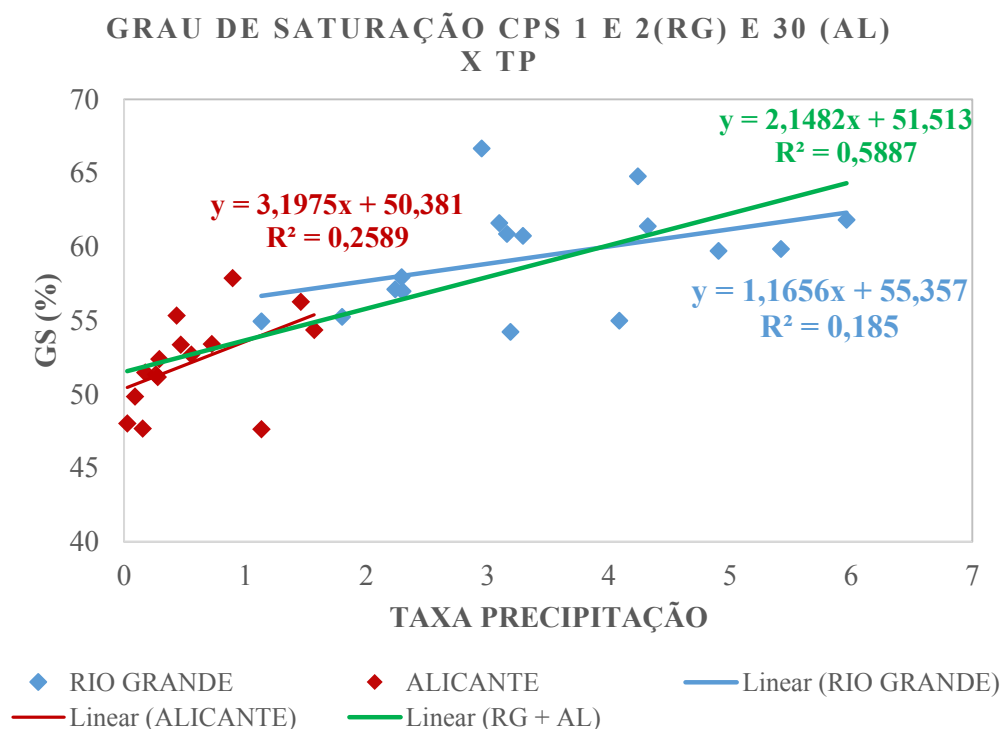


Figura 4.8 - Gráfico de dispersão GS x TP CP 30 (Santa Pola) e CPs 1 e 2 (Rio Grande) para média sazonal.

Nas figuras 4.7 e 4.8 podemos observar a dispersão conjunta dos pontos dos CPs 30 (Santa Pola) e CPs 1 e 2 (Rio Grande) para médias semanais e sazonais, que foram expostos em ambas as estações de medição. Analisando-se o gráfico da figura 4.7 pode-se constatar que há demasiada dispersão nos pontos fazendo com que o modelo de regressão linear adotado não tenha um bom coeficiente de determinação. Já na figura 4.8 apesar da diferença da média de GS para cada estação de medição o modelo de regressão linear teve um bom ajuste para médias sazonais, tendo um coeficiente de determinação superior aos dos modelos em separado. Cabe destacar que das variáveis estudadas a única que apresentou um bom coeficiente de determinação com os dados em conjunto foi a taxa de precipitação.

4.3. Regressão linear múltipla

Através das correlações e gráficos de dispersão notou-se que os melhores resultados de correlação e consequentemente do coeficiente de determinação dos modelos são obtidos para médias sazonais, logo para realização da regressão linear múltipla utilizou-se apenas as médias sazonais. Utilizando-se as três variáveis de maior correlação elencadas nas tabelas da seção 4.1 para médias sazonais, efetuou-se através do software Excel regressões lineares múltiplas. Os resultados obtidos encontram-se nas tabelas dos apêndices D, E e F. Apresenta-se a seguir nas tabelas 4.10 a 4.12 os resumos dos resultados obtidos da regressão para os CPs 1 e 2 (Rio Grande), 4.13 à 4.15 para o CP

30 (Santa Pola) e 4.16 a 4.18 para os dados conjuntos dos mesmos CPs.

Tabela 4.10 - Estatística de regressão dos CPs 1 e 2 (Rio Grande) x TAS, TM e TMÍN

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,8938
R-Quadrado	0,7989
R-quadrado ajustado	0,7486
Erro padrão	1,8175
Observações	16,0000

Tabela 4.11- ANOVA dos CPs 1 e 2 (Rio Grande) x TAS, TM e TMÍN

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de sig.</i>
Regressão	3,0000	157,472	52,491	15,890	0,0002
Resíduo	12,0000	39,641	3,303		
Total	15,0000	197,113			

Tabela 4.12 – Coeficientes da regressão dos CPs 1 e 2 (Rio Grande) x TAS, TM e TMÍN

	<i>Coeficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inf.</i>	<i>95% sup.</i>
Interseção	87,3333	7,279	11,998	0,000	71,4739	103,193
Temperatura do ar seco	-6,3231	5,758	-1,098	0,294	-18,8696	6,223
Temperatura Máxima	0,6584	1,962	0,336	0,743	-3,6156	4,932
Temperatura Mínima	4,9773	4,095	1,216	0,248	-3,9443	13,899

Tabela 4.13 - Estatística de regressão do CP 30 (Santa Pola) x TM, TMín e TMéd.

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,6400
R-Quadrado	0,4096
R-quadrado ajustado	0,2485
Erro padrão	2,6761
Observações	15,0000

Tabela 4.14 - ANOVA do CP 30 (Santa Pola) x TM, TMín e TMéd.

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de sig.</i>
Regressão	3,0000	54,648	18,216	2,544	0,1098
Resíduo	11,0000	78,779	7,162		
Total	14,0000	133,427			

Tabela 4.15 – Coeficientes da regressão do CP 30 (Santa Pola) x TM, TMín e TMéd.

	<i>Coeficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inf.</i>	<i>95% sup.</i>
Interseção	47,9736	25,819	1,858	0,090	-8,8541	104,801
Temperatura Máxima	1,2377	4,114	0,301	0,769	-7,8181	10,293
Temperatura Média	-1,4277	3,877	-0,368	0,720	-9,9598	7,104
Taxa de Precipitação	2,8620	2,414	1,185	0,261	-2,4523	8,176

Tabela 4.16 – Coeficientes da regressão dos CPs 1 e 2 (Rio Grande) e 30 (Santa Pola) x TP, HI e PA.

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,7704
R-Quadrado	0,5934
R-quadrado ajustado	0,5483
Erro padrão	3,3006
Observações	31,0000

Tabela 4.17 - ANOVA dos CPs 1 e 2 (Rio Grande) e 30 (Santa Pola) x TP, HI e PA.

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de sig.</i>
Regressão	3,0000	429,338	143,113	13,137	0,0000
Resíduo	27,0000	294,135	10,894		
Total	30,0000	723,473			

Tabela 4.18 – Coeficientes da regressão dos CPs 1 e 2 (Rio Grande) e 30 (Santa Pola) x TP, HI e PA.

	<i>Coeficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inf.</i>	<i>95% sup.</i>
Interseção	-20,3022	168,647	-0,120	0,905	-366,3374	325,733
Taxa de Precipitação	2,0231	0,423	4,781	0,000	1,1548	2,891
Horas de Insolação	-0,0148	0,300	-0,049	0,961	-0,6308	0,601
Pressão Atmosférica média	0,0713	0,166	0,431	0,670	-0,2683	0,411

Observa-se na tabela 4.10 o coeficiente r^2 do modelo obtido que é igual a 0.7989 sendo superior ao obtido para as regressões lineares simples da melhor variável, que foi a temperatura máxima com r^2 igual a 0,7702 com um erro padrão de 2,94 frente ao 1,81 apresentado na regressão linear múltipla. Da tabela 4.12 podemos obter os coeficientes da regressão utilizados na montagem da equação de obtenção do GS, o resultado obtido é exposto na equação 4.1:

$$GS\ 1\ e\ 2 = 87,333 - 6,3231 \times TAS + 0,6584 \times TM + 4,9773 \times TMin \quad (4.1)$$

Na tabela 4.13 encontram-se as estatísticas de regressão do modelo de regressão linear múltipla do CP 30 da estação de Santa Pola em Santa Pola. Observa-se um coeficiente de determinação de 0,3342 sendo que para o modelo de regressão linear simples a melhor observação foi de 0,2993. Já na tabela 4.16 para os dados de Rio grande e Santa Pola agrupados obtem-se um r^2 de 0,5934 frente aos 0,5887 do modelo de regressão linear simples. Sendo assim pode-se observar

que, apesar da pequena diferença, em todos os casos a regressão linear múltipla teve um melhor coeficiente de determinação do que a regressão linear simples, portanto os modelos de GS adotados foram os oriundos da regressão linear múltipla. A seguir nas tabelas 4.19 a 4.21 apresentam-se os modelos obtidos para cada família de concreto e seu arranjo, bem como os modelos para as médias de todos os CPs.

Tabela 4.19 – Resumo dos modelos de GS para estação de Rio Grande.

Testemunho	Equação	r ²
1 e 2	87,3333 -6,3231*TAS +0,6584*TM +4,9773*TMín	0,7989
3 e 4	87,7061 -8,3180*TAS +1,3213*TM +6,446*TMín	0,7195
5 e 6	90,5371 -0,0489*TAU +2,1657*TAS -2,9536*TM	0,8332
7 e 8	90,9603-0,9050*TAU +2,3032*TAS -2,3255*TM	0,7899
9 e 10	86,5454 +1,0698*TAU +2,5815*TAS -4,131*TM	0,9295
11 e 12	84,5957 -0,2025*TAU +2,5878*TAS -3,1084*TM	0,9014
13 e 14	-876,5104 +0,9174*PA +1,1623*TAS -1,0149*TM	0,532
15 e 16	89,2086 -1,1559*TAU +2,7338*TAS -2,5373*TM	0,7491
17 e 18	83,5714 +0,5806*TAU +0,3911*TAS -1,5941*TM	0,6807
19 e 20	-1391,4990 +1,4295*PA +0,9826*TAS -0,7824*TM	0,6282
21 e 22	1755,4722 +0,7046*UR -1,7039*PA -1,2579*TAS	0,6601
23 e 24	58,2227 +3,2087*TAS -2,2942*TM -1,1382*TMín	0,4429
25 e 26	87,0284 +1,6586*TAU +2,1648*TAS -4,0231*TM	0,833
27 e 28	86,1918 +2,0951*TAU +1,3419*TAS -3,8621*TM	0,7438
29 e 30	58,9879 -0,6549*V +2,0927*TAS -2,0868*TM	0,5175
1 a 18	83,6165 +0,5167*TAU +1,2874*TAS -2,4324*TM	0,8199
1 a 28	81,2694 +1,3410*TAU +0,7468*TAS -2,5397*TM	0,8241

Tabela 4.20 – Resumo dos modelos de GS para estação de Santa Pola, Santa Pola.

Testemunho	Equação	r ²
30	47,9736 +1,2377*TM -1,4277*TMéd +2,8620*TP	0,4096
31	60,5261 -1,7397*TM +1,4472*TMéd +2,3948*TP	0,7162
35 e 36	32,3425 -2,2144*TM -2,2843*TMéd +4,1746*TP	0,521
30, 31, 35 e 36	46,9474 +0,5708*TM -0,7549*TMéd +3,1438*TP	0,4592

Tabela 4.21 – Resumo dos modelos de GS para ambas as estações de medição.

Testemunho	Equação	r ²
1*,2* e (30)	-20,3022 +2,0231*TP -0,0148*HI +0,0713*PA	0,5934
3*,4* e (31)	-212,3880 +2,9384*TP +0,0353*HI +0,2573*PA	0,7566
7*, 8* e (35 E 36)	-370,6099 +4,7810*TP +0,4678*HI +0,4068*PA	0,7521
(30, 31, 35 e 36) e 1*,2*,3*,4*,7*,8*	-201,1000 +3,2475*TP +0,1628*HI +0,2451*PA	0,74

*Rio Grande, () Santa Pola.

4.4. Erro dos modelos

Realizou-se a análise dos erros dos modelos obtidos em termos médios, ou seja, considerou-se como erro do modelo a média do valor absoluto dos erros de cada valor estimado. Nas tabelas 4.22 a 4.24 são apresentados os erros médios de cada modelo.

Tabela 4.22 - Erro médio dos modelos de GS da estação de Rio Grande.

MODELO GS	Erro médio (%)
1 e 2	2,11%
3 e 4	2,38%
5 e 6	2,02%
7 e 8	2,18%
9 e 10	1,47%
11 e 12	1,42%
13 e 14	2,74%
15 e 16	2,43%
17 e 18	2,23%
19 e 20	2,93%
21 e 22	3,81%
23 e 24	2,26%
25 e 26	1,67%
27 e 28	3,01%
29 e 30	1,78%
1 a 18	1,88%
1 a 28	1,79%

Tabela 4.23 - Erro médio dos modelos de GS da estação de Santa Pola.

MODELO GS	Erro médio (%)
30	2,98%
31	2,29%
35 e 36	9,34%
30, 31, 35 e 36	2,57%

Tabela 4.24 - Erro médio dos modelos de ambas as estações de medição em conjunto.

MODELO GS	Erro médio (%)
1*,2* e (30)	4,09%
3*,4* e (31)	5,12%
7*, 8* e (35 E 36)	9,72%
(30, 31, 35 e 36) e 1*,2*,3*,4*,7*,8*	5,47%

*Rio Grande, () Santa Pola.

Pode-se notar que para os modelos obtidos através do GS medido na estação de Rio Grande

houve um erro médio bastante aceitável em todos os modelos, sendo que o maior erro foi de 3,81% para o modelo dos CPs 21 e 22. Já para os modelos obtidos do GS da estação de Santa Pola e de ambas as estações em conjunto houveram erros maiores chegando no patamar de quase 10%, porém ainda sendo aceitáveis.

Para verificar a abrangência dos modelos gerados a partir da média de vários CPs calculou-se o erro médio do GS obtido através de determinado modelo com o GS de cada família de concreto estudada, os resultados são apresentados nas tabelas 4.25 a 4.27

Tabela 4.25 - Erro médio do GS da estação de Rio Grande estimado pelo modelo 1 a 28.

GS	Erro médio (%)
1 e 2	2,62%
3 e 4	3,50%
5 e 6	4,23%
7 e 8	8,77%
9 e 10	4,98%
11 e 12	3,64%
13 e 14	11,03%
15 e 16	5,24%
17 e 18	8,01%
19 e 20	3,57%
21 e 22	3,95%
23 e 24	23,73%
25 e 26	4,33%
27 e 28	5,34%
29 e 30	31,83%

Tabela 4.26 - Erro médio do GS da estação de Santa Pola estimado pelo modelo 30, 31, 35 e 36.

MODELO GS	Erro médio (%)
30	8,26%
31	2,50%
35 e 36	9,34%

Tabela 4.27 - Erro médio do GS de ambas as estações de medição em conjunto estimado pelo modelo (30, 31, 35 e 36) e 1*,2*,3*,4*,7*,8*.

MODELO GS	Erro médio (%)
1*,2* e (30)	7,58%
3*,4* e (31)	4,99%
7*, 8* e (35 E 36)	9,72%

*Rio Grande, () Santa Pola.

Na tabela 4.25 pode-se verificar que os erros são bastante aceitáveis excetuando-se os maiores

erros obtidos que foram para o GS dos CPs 13 e 14(face de fundo exposta), 23 e 24(face voltada para baixo) e 29 e 30(ambiente interno), o que possivelmente pode ser explicado pelas configurações de exposição diferentes dos demais CPs. Nas tabelas 4.26 e 4.27 pode-se notar erros mais expressivos, porém abaixo dos 10% não divergindo muito dos modelos exclusivos de cada família.

Verificou-se também o erro relativo ao GS gerado pelo modelo (30, 31, 35 e 36) e 1*,2*,3*,4*,7*,8* com todas as famílias de concreto estudadas, o resultado é apresentado na tabela 4.28.

Tabela 4.28 - Erro médio do GS de todos os CPs estudados estimado pelo modelo (30, 31, 35 e 36) e 1*,2*,3*,4*,7*,8*.

MODELO GS	Erro médio (%)
1* e 2*	5,53%
3* e 4*	5,68%
5* e 6*	6,09%
7* e 8*	7,57%
9* e 10*	8,50%
11* e 12*	7,35%
13* e 14*	14,65%
15* e 16*	5,91%
17* e 18*	7,12%
19* e 20*	5,20%
21* e 22*	6,91%
23* e 24*	27,59%
25* e 26*	6,25%
27* e 28*	9,26%
29* e 30*	35,94%
(30)	6,24%
(31)	4,51%
(35 e 36)	12,29%

*Rio Grande, () Santa Pola.

Este modelo por ser oriundo de diferentes CPs e por serem expostos em ambientes distintos pode ser um modelo mais generalista de obtenção do GS, que possivelmente possa ser utilizado para diversas situações de exposição e traços de concreto. Analisando-se a tabela 4.28 nota-se que os erros obtidos são maiores que nos demais modelos, porém, os maiores erros continuam sendo dos CPs 13 e 14, 23 e 24 e 29 e 30, além destes apenas os CPs (35 e 36) apresentam erros superiores a 10%. Excetuando-se os casos mais discrepantes os modelos obtidos a partir da média de diversos CPs e o modelo (30, 31, 35 e 36) e 1*,2*,3*,4*,7*,8* podem ser utilizados para geração do GS com precisão razoável, principalmente quando da falta de características mais semelhantes as configurações

estudadas ou falta de informações mais precisas.

4.5. Aplicação probabilística

4.5.1. Modelagem do mecanismo de penetração de cloretos

Para a aplicação da equação 3.5 se faz necessário a obtenção de todos os parâmetros de entrada do modelo. Os parâmetros fixos e seus respectivos coeficientes de variação obtidos da calibração do modelo já foram apresentados na tabela 3.8. O parâmetro variável Rgs é alimentado através dos modelos de GS. Os modelos de GS por sua vez são alimentados pelas respectivas variáveis meteorológicas de entrada. Para a obtenção dos parâmetros estatísticos das variáveis meteorológicas realizou-se uma análise estatística para a obtenção da média (μ), desvio padrão (σ) e coeficiente de correlação (ρ) das três variáveis ambientais de cada modelo, realizou-se também o teste de aderência de Kolmogorov Smirnov para definição do tipo de distribuição de probabilidade de cada variável.

Inicialmente definiu-se os modelos de GS a serem utilizados na comparação através da aplicação probabilística. Devido à semelhança do traço de concreto e condições de exposição do ponto PS-ZTN com os CPs 1 e 2 da estação de Rio grande e 30 da estação de Santa Pola elencou-se os modelos gerados a partir desses CPs para a aplicação. Utilizou-se também os modelos com os dados médios do GS de cada estação bem como das estações conjuntas, um resumo dos modelos de GS utilizados são apresentados na tabela 4.29.

Tabela 4.29 – Resumo dos modelos de GS utilizados .

Modelo	Equação	r²
1* e 2*	87,3333 -6,3231*TAS +0,6584*TM +4,9773*TMín	0,7989
(30)	47,9736 +1,2377*TM -1,4277*TMéd +2,8620*TP	0,4096
1*,2* e (30)	-20,3022 +2,0231*TP -0,0148*HI +0,0713*PA	0,5934
1 a 28*	81,2694 +1,3410*TAU +0,7468*TAS -2,5397*TM	0,8241
(30, 31, 35 e 36)	46,9474 +0,5708*TM -0,7549*TMéd +3,1438*TP	0,4592
1*,2*,3*,4*,7*,8* e (30, 31, 35, 36)	-201,1000 +3,2475*TP +0,1628*HI +0,2451*PA	0,7400

*Rio Grande, () Santa Pola.

Após elencadas as equações modelo de GS a serem utilizadas, obteve-se para cada variável dos modelos o tipo de distribuição de probabilidade e seus parâmetros, como média (μ), desvio padrão (σ) e coeficiente de correlação (ρ) entre as variáveis de cada modelo. A escolha do tipo de distribuição de probabilidade de cada variável foi realizada através do teste de aderência de Kolmogorov Smirnov. Um exemplo de histograma e curva de distribuição de probabilidade é apresentado na figura 4.9. Os demais resultados obtidos são apresentados nas tabelas 4.30 e 4.31.

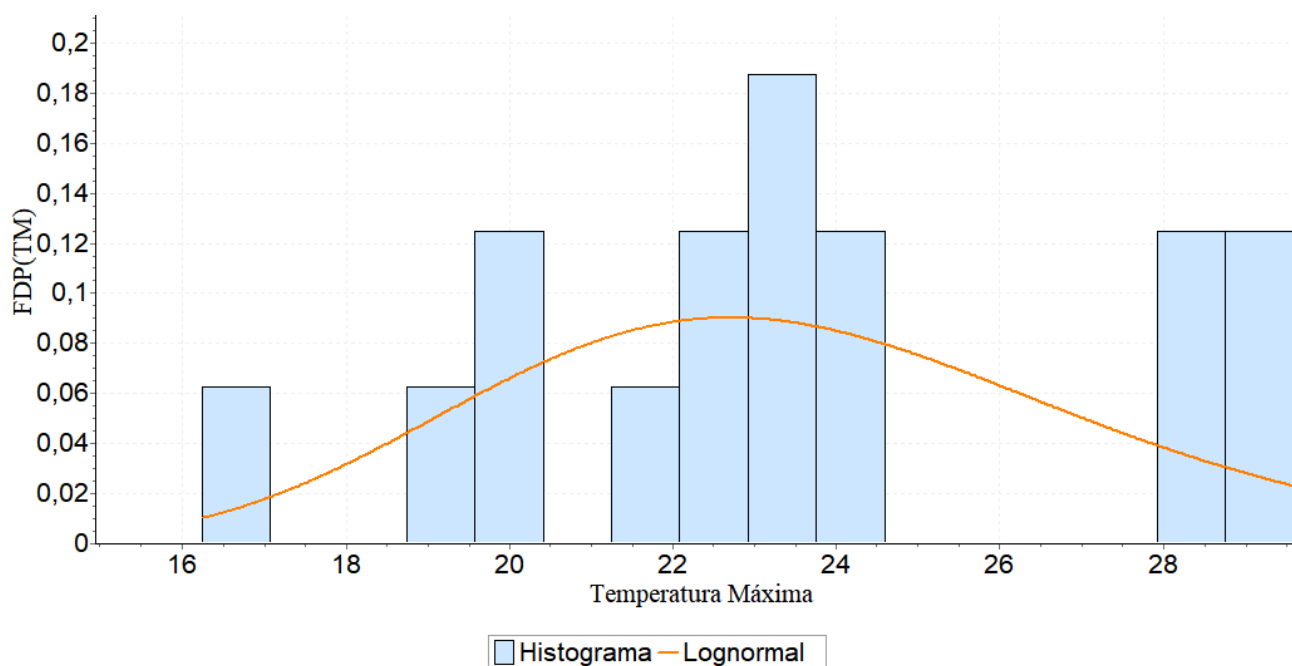


Figura 4.9 – Histograma Função Densidade de Probabilidade da temperatura máxima para média sazonal da estação de Rio Grande

Tabela 4.30 - Parâmetros estatísticos das variáveis de entrada dos modelos de GS.

VARIÁVEL	DIST. EST.	μ	σ
TAS RG	Normal	18,623	3,626
TM RG	Log Normal	23,589	3,820
TMín RG	Normal	14,909	3,482
TAU RG	Weibull	16,954	3,135
TM AL	Gumbel	23,225	4,706
TPAL	Weibull	0,557	0,469
TMéd AL	Log Normal	18,283	4,951
TPRG + AL	Weibull	1,857	1,722
HI RG + AL	Uniforme	7,1623	1,577
PA RG + AL	Normal	1011,9	6,073

Tabela 4.31 – Correlação das variáveis de entrada dos modelos de GS.

VARIÁVEIS	ρ
TAS e TM RG	0,9933
TAS e TMín RG	0,9982
TM e TMín RG	0,9857
TAU e TAS RG	0,9892
TAU e TM RG	0,9892

VARIÁVEIS	ρ
TM e TP AL	-0,3770
TM e TMéd AL	0,9983
TP e TMéd AL	-0,3396
TP e HI RG + AL	-0,4392
TP e PA RG + AL	0,4527

A consideração da correlação existente entre as variáveis de entrada dos modelos de GS foi utilizada na geração de números aleatórios como demonstrado por Real (2000), utilizando-se a matriz de covariância das variáveis e a decomposição de Cholesky na solução do problema.

Para evitar alguns erros dos valores extremos obtidos nos modelos de geração de GS, causados pela combinação de números aleatórios das variáveis ambientais, optou-se por truncar o valor de GS obtido em cada modelo respectivamente em 5% abaixo e acima do menor e do maior valor do GS medido em cada arranjo de dados. O resumo dos valores adotados para a truncagem de GS estão na tabela 4.32.

Tabela 4.32 – Valores de truncagem de GS.

MODELO	GS Máximo	GS Mínimo
1* e 2*	70,01	51,53
(30)	60,79	45,25
1*,2* e (30)	70,01	45,25
1 a 28*	67,70	51,24
(30, 31, 35 e 36)	55,89	41,82
1*,2*,3*,4*,7*,8* e (30, 31, 35, 36)	71,92	41,88

*Rio Grande, () Santa Pola.

Como o GS do concreto não é um variável de entrada direta na equação 3.5 se faz necessário a obtenção do parâmetro R_{gs} para uso do modelo. Para geração do valor do fator de correção R_{gs} adotou-se modelo obtido através da regressão linear simples apresentado na equação 4.2. Os dados utilizados foram obtidos por Guimarães (2005), o modelo proposto é limitado a valores de GS entre 40 a 90%, sendo satisfatório para o GS obtido nos modelos de estimativa propostos.

$$R_{gs} = -0,2789 + 0,006528 * GS \quad p/ \quad 40\% < GS < 90\% \quad (4.2)$$

A convergência estatística da média (μ) e desvio padrão (σ) da concentração de cloretos pode ser verificada através dos resultados do modelo com $R_{gs}=1$, para um tempo de 50 anos e diversas profundidades observado na figura 4.10. A convergência estatística é um fator fundamental para obtenção do número mínimo de simulações a ser utilizado. Cabe ressaltar que os demais modelos também apresentaram convergência estatística satisfatória para o número de simulações utilizado. Apesar de haver convergência do modelo para número de simulações em torno de 5.000 optou-se por utilizar 1.000.000 de simulações no processo para minimizar os erros.

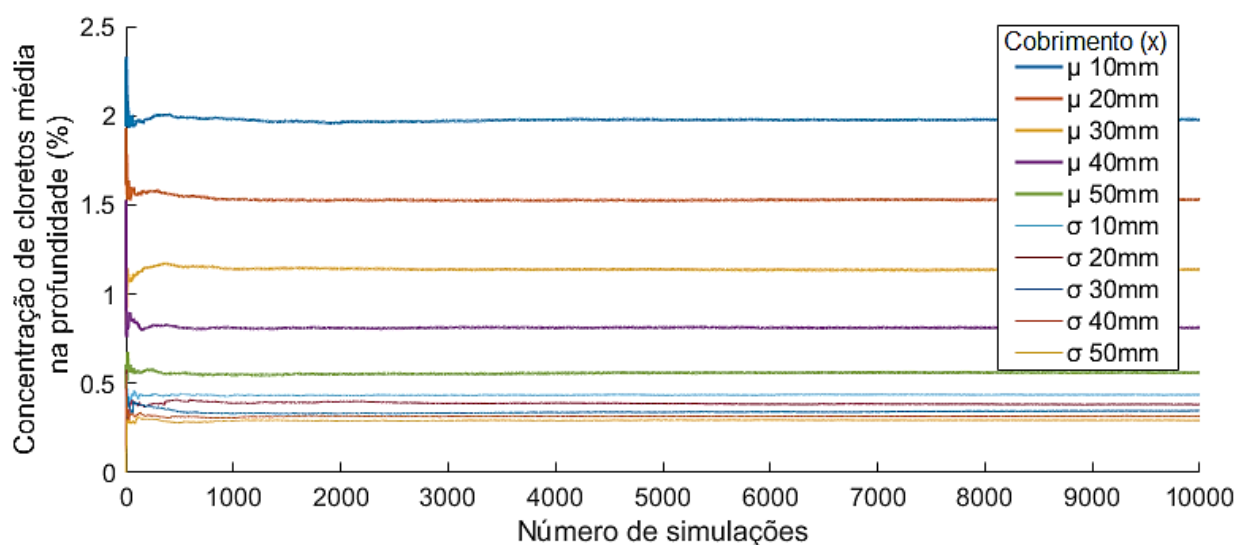


Figura 4.10 - Convergência da média e desvio padrão da concentração de cloretos para diversos valores de cobrimento.

Para efeito de comparação com uma situação real analisou-se a concentração média de cloretos na profundidade obtida das simulações para um tempo de 22 anos, idade na qual os perfis de concentração de cloretos podem ser comparados ao medido por Guimarães (2000), o resultado é apresentado na figura 4.11. Utilizaram-se nas avaliações os modelos de GS propostos na tabela 4.29, alimentados pela geração de números aleatórios das variáveis ambientais apresentadas na tabela 4.23, com suas respectivas distribuições de probabilidade. Os demais parâmetros foram apresentados na tabela 3.8. Utilizou-se também um modelo considerando $R_{gs}=1$ (GS=100%) e $R_{gs}=0,205$ (GS=74,4%) (Guimarães, 2005).

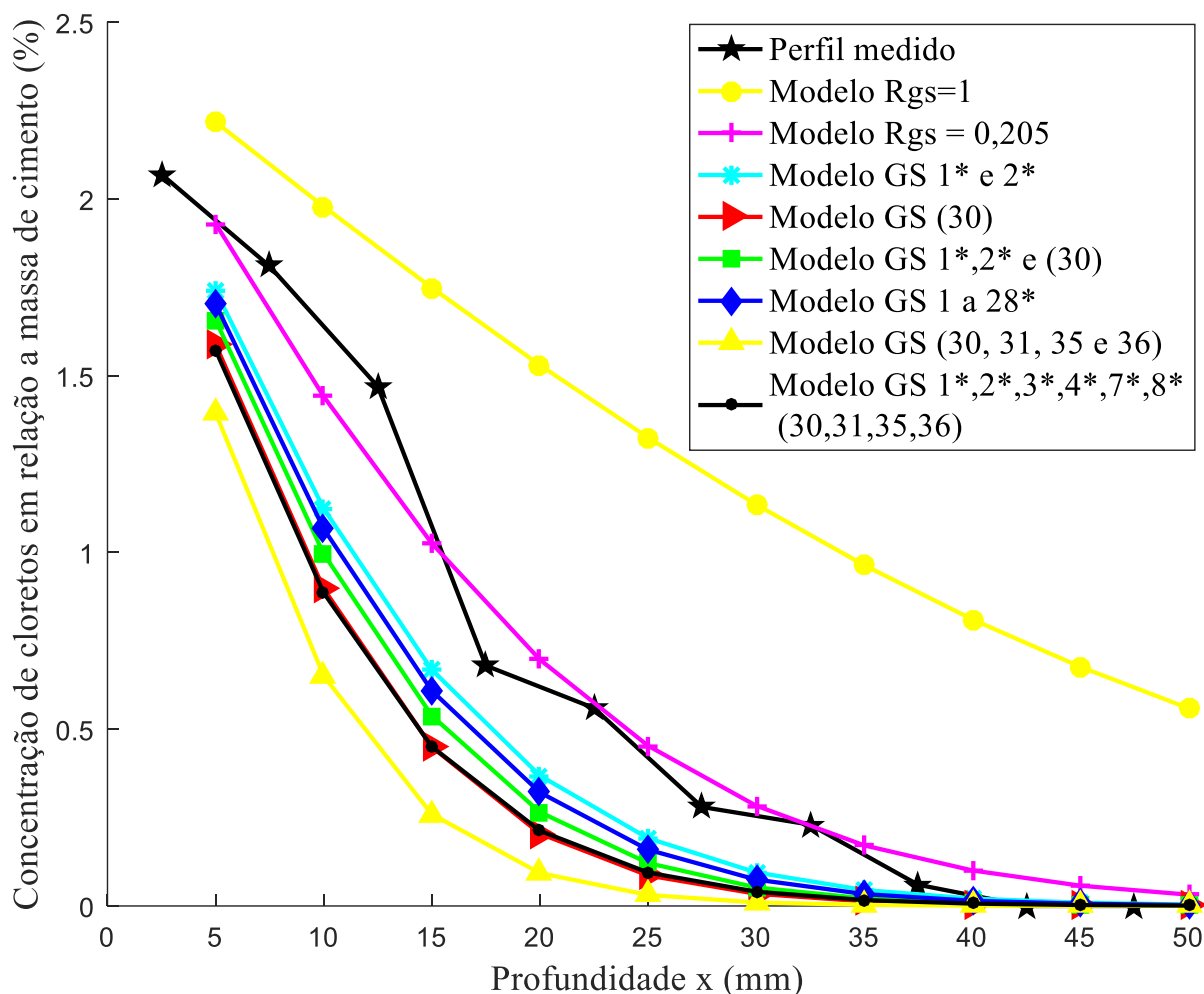


Figura 4.11 - Perfis de penetração de cloretos obtidos da simulação de cada modelo proposto e perfil medido por Guimarães (2000).

É possível observar da figura 4.11 que todos os modelos de GS obtidos neste trabalho subestimam a concentração real de cloretos existente na estrutura para profundidades de 5 a 40 mm, já para profundidades maiores que 40 mm a concentração é muito próxima de 0 não sendo significativa. Este fato pode ser explicado em parte pela localização das estações de medição em relação a linha d'água, o que gera uma variação considerável no GS do concreto. Considerando o modelo desta pesquisa mais próximo da curva real, obtido do GS dos CPs 1 e 2 da estação de medição de Rio Grande, temos um GS médio de 59,32 a 1200m da costa contra 77,5 obtido por Guimarães (2000) a 120 metros da costa e 74,44 obtido por Guimarães (2005) junto a costa. Esta situação reforça os estudos de Meira (2004) que constatou uma variação do GS do concreto conforme há afastamento da linha costeira.

Para possibilitar uma melhor comparação dos perfis de cloreto obtidos utilizando os modelos de GS desta pesquisa ao de Guimarães (2000), admitiu-se a relação do GS com o local de exposição

dos CPs, e na falta de metodologia mais apropriada, realizou-se uma correção percentual sobre o GS obtido dos modelos desta pesquisa para com o obtido por Guimarães (2005) na estrutura do cais Terminal de Containers (TECON) do superporto da cidade de Rio Grande – RS. A correção baseou-se na diferença percentual do GS obtido por Guimarães (2005) junto ao ponto PS para com o testemunho de maior semelhança exposto na estação de medição de Rio Grande, no caso os CPs 1 e 2. O GS médio das estações sazonais dos CPs 1 e 2 da estação de medição de Rio Grande, foi de 59,32 já o obtido por Guimarães (2005) foi de 74,44 isto representa um aumento de 25,49% no GS. Aplicou-se então esta diferença percentual sobre o GS obtido de todos os modelos, permitindo-se assim comparar os diferentes modelos de GS junto ao ponto PS, a concentração média de cloretos na profundidade obtida das simulações com GS corrigido para um tempo de 22 anos é apresentada na figura 4.12.

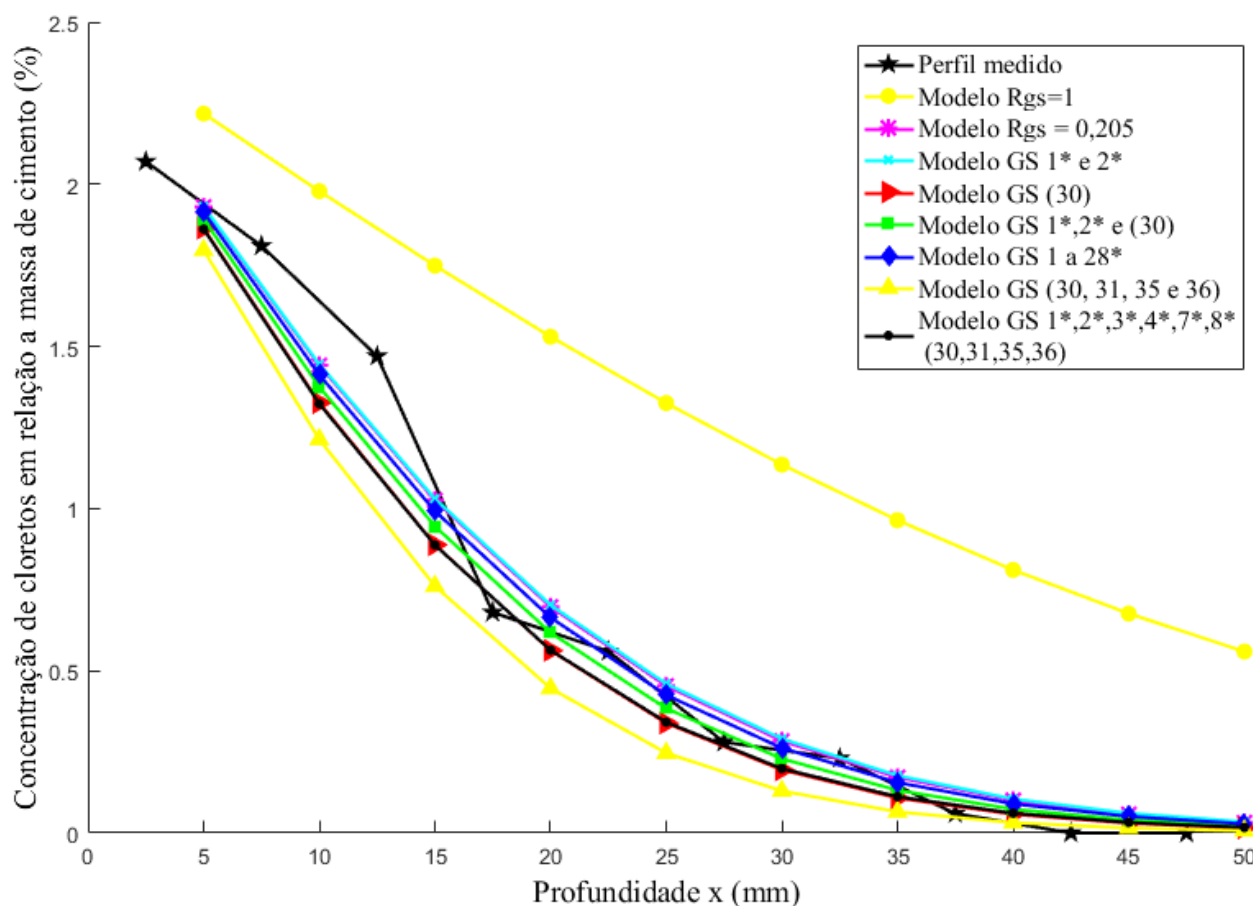


Figura 4.12 - Perfis de penetração de cloretos obtidos da simulação de cada modelo proposto corrigidos para o ponto PS e perfil medido por Guimarães (2000).

Utilizando-se a correção de GS proposta é possível notar que há um ajuste quase perfeito do modelo de GS 1* e 2* ao modelo de R_{GS} igual a 0,205, os quais foram os parâmetros de referência da correção, estando o resultado de acordo com esperado. Desta forma se faz possível analisar a proximidade dos resultados obtidos em todos os demais modelos, desde que, considerada a correção

do GS devido a influência do local de exposição.

Para avaliação do comportamento do uso dos diferentes modelos de estimativa do GS e seu impacto sobre a concentração de cloretos na profundidade, optou-se por avaliar a probabilidade de falha da estrutura em um tempo de 50 anos. A probabilidade de falha de cada modelo foi gerada em função de diversos cobrimentos, os resultados obtidos são apresentados nas figuras 4.12 a 4.20.

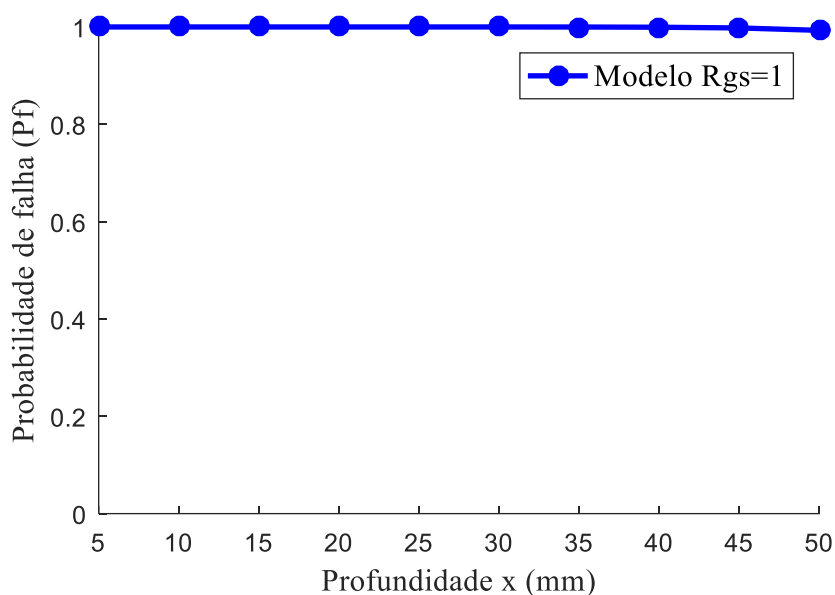


Figura 4.13 – Probabilidade de falha do modelo Rgs=1 para diferentes cobrimentos.

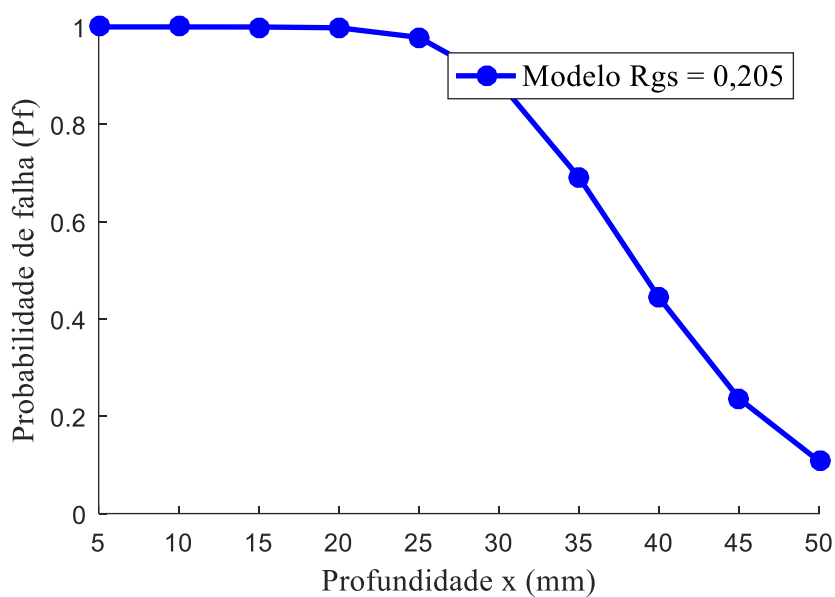


Figura 4.14 – Probabilidade de falha do modelo Rgs=0,205 para diferentes cobrimentos.

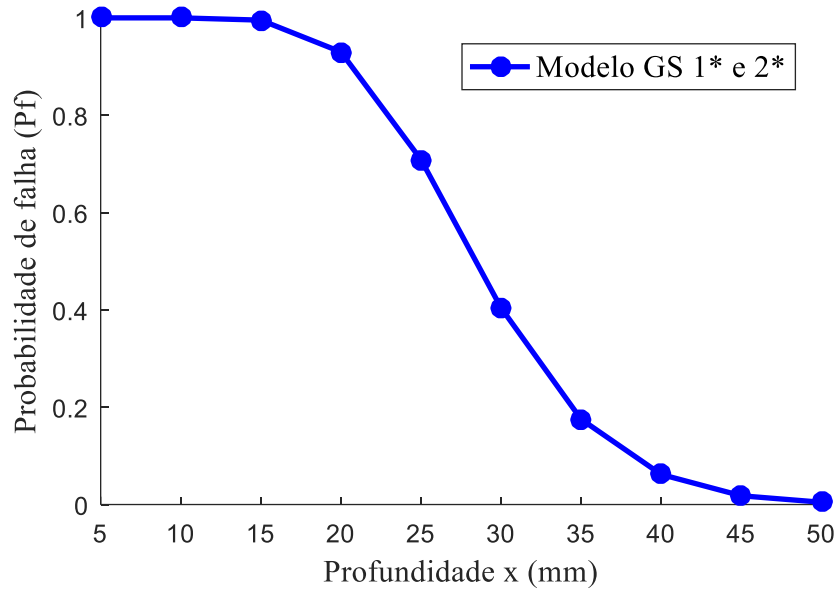


Figura 4.15 – Probabilidade de falha do modelo 1* e 2* para diferentes cobrimentos.

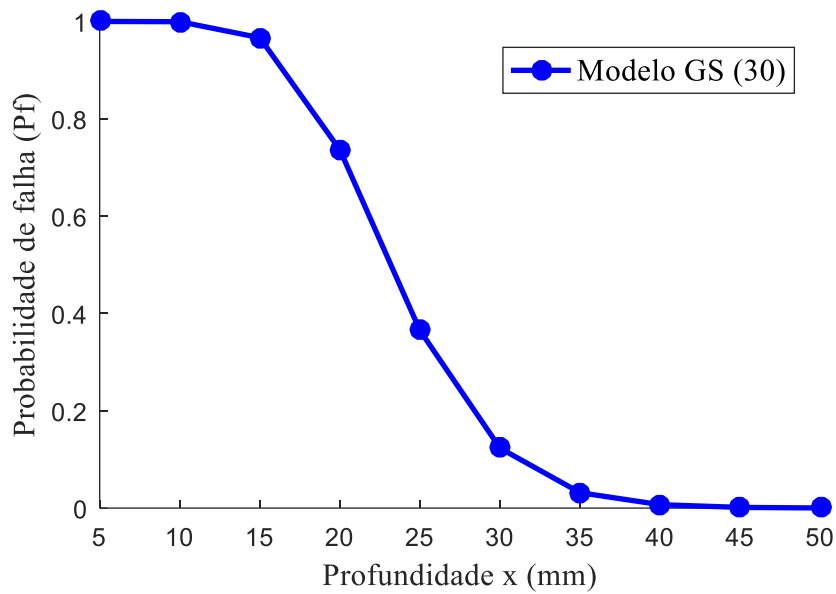


Figura 4.16 – Probabilidade de falha do modelo GS (30) para diferentes cobrimentos.

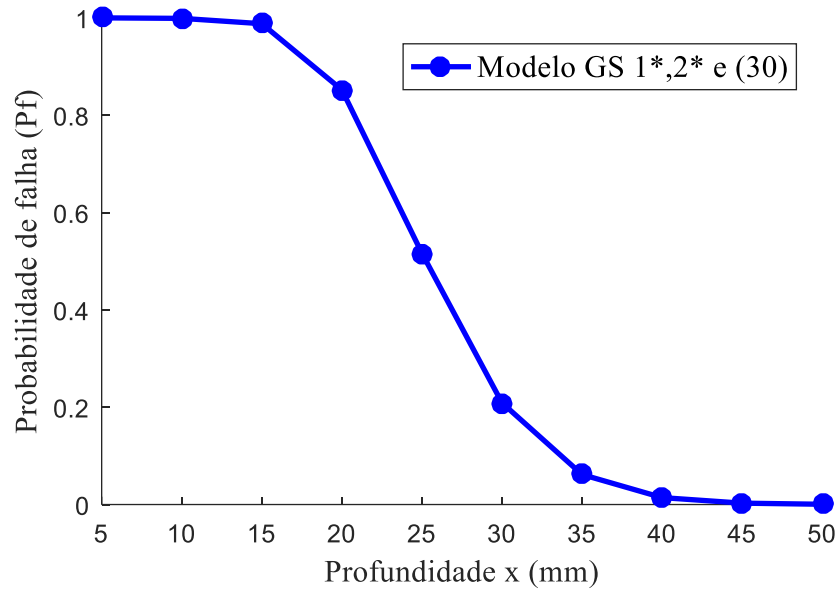


Figura 4.17 – Probabilidade de falha do modelo GS 1*,2* e (30) para diferentes cobrimentos.

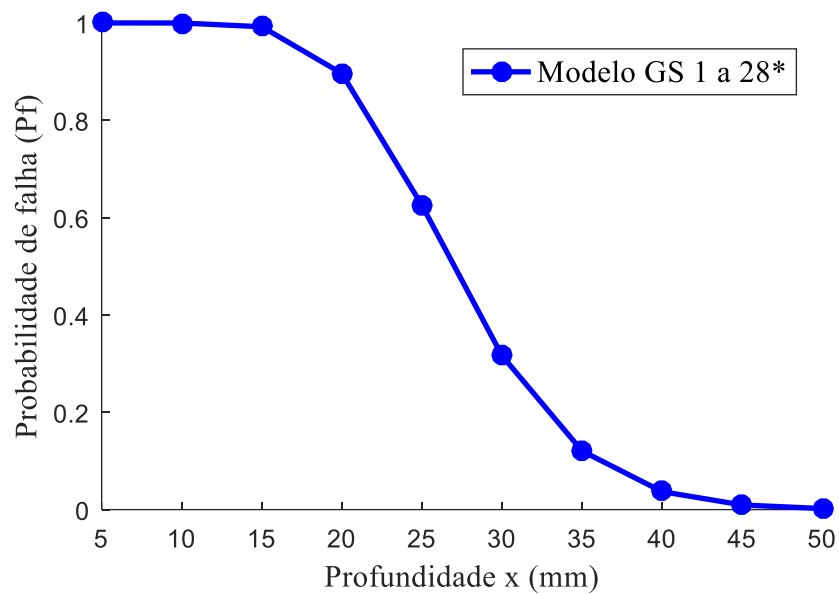


Figura 4.18 – Probabilidade de falha do modelo GS 1 a 28* para diferentes cobrimentos.

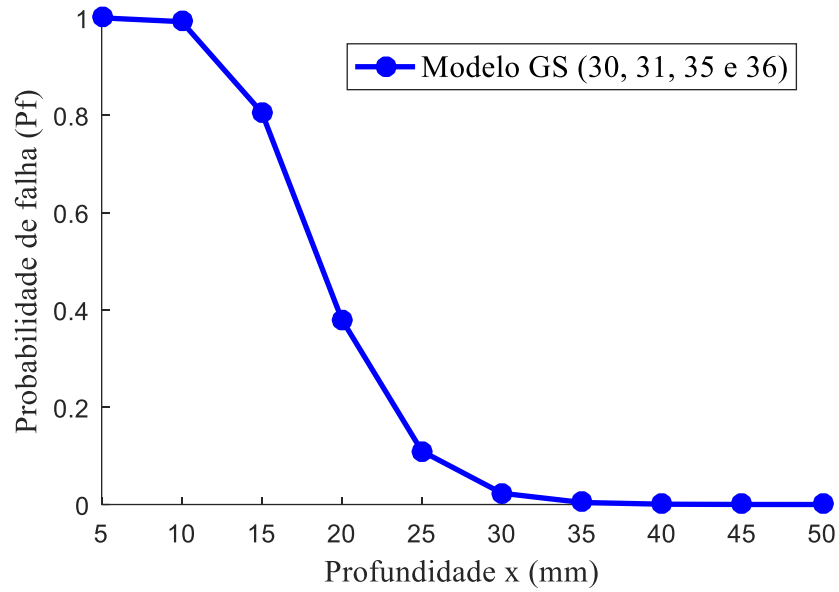


Figura 4.19 – Probabilidade de falha do modelo GS (30, 31, 35 e 36) para diferentes cobrimentos.

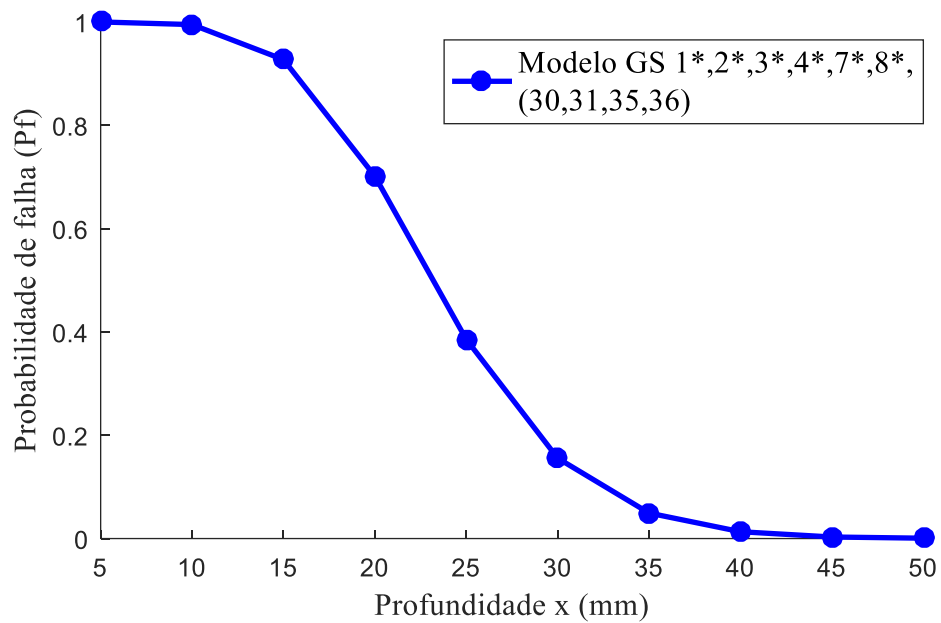


Figura 4.20- Probabilidade de falha do modelo GS 1*, 2*, 3*, 4*, 7*, 8* e (30, 31, 35, 36) para diferentes cobrimentos.

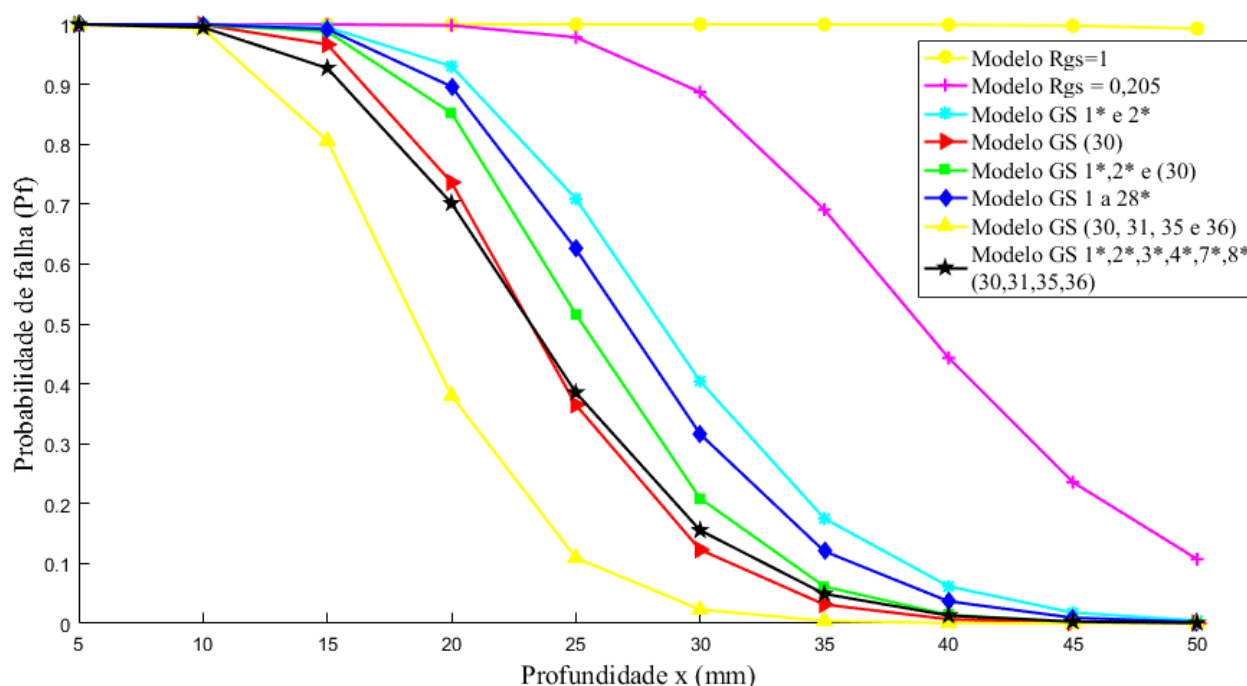


Figura 4.21 - Probabilidade de falha dos modelos utilizados na simulação para diferentes cobrimentos.

As diferentes configurações utilizadas no processo de simulação podem ser avaliadas através da probabilidade de falha da estrutura. O grau de saturação do concreto afeta diretamente o processo de ataque por cloretos, sendo que quanto maior o GS do concreto maiores são as concentrações de cloretos nas camadas mais superficiais. Analisando-se a figura 4.21 nota-se a grande discrepância de valores entre o modelo considerando $R_{gs}=1$ e todos os demais modelos que levam em consideração a influência do GS. É praticamente consenso entre os autores da área que concretos expostos em ambiente de névoa dificilmente atingem a saturação, logo utilizar a condição de concreto saturado no processo de simulação leva a erros na estimativa de vida útil.

Da comparação entre os modelos nota-se claramente a diferença de valores dos modelos utilizados nesta pesquisa quando comparados ao modelo utilizando $R_{gs}=0,205$, obtido por Guimarães (2005). Todos os modelos desta pesquisa apresentam probabilidades de falha inferiores as do modelo de $R_{gs}=0,205$, indicando que o GS obtido dos modelos é inferior ao obtido por Guimarães (2005), apesar de ambos os estudos serem realizados em microambiente de névoa as diferenças de traço e do local de exposição do concreto podem levar a um diferente GS, porém o comportamento da variação do mesmo é semelhante em todos os modelos.

Também é possível observar na figura 4.18 que todos os modelos oriundos do GS medido na estação de Rio Grande apresentam probabilidade de falha superior as dos modelos de Santa Pola, indicando que em termos médios o GS de Rio Grande é superior ao de Santa Pola. Esta situação se evidencia se compararmos o modelo GS 1 a 28*, que utiliza a média dos CPs 1 a 28 expostos no Brasil, com o modelo GS (30, 31, 35 e 36), que utiliza a média dos testemunhos expostos na Espanha.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Principais conclusões

A análise da variação do grau de saturação das estruturas de concreto armado é um importante fator a ser levado em conta na avaliação da vida útil de serviço das estruturas, haja visto que sua influência na penetração de íons é um fator determinante. O fato da mensuração do GS do concreto em campo ser uma prática lenta e onerosa trouxe a necessidade de se avaliar este parâmetro afim de gerar modelos matemáticos para sua obtenção e consequente viabilização de seu uso nos cálculos de vida útil das estruturas.

Analizando-se os resultados obtidos, conclui-se que para a maioria dos casos estudados há uma boa correlação do GS com as variáveis ambientais estudadas, sendo possível obter boas estimativas do grau de saturação através dos parâmetros ambientais. A metodologia mais adequada para obtenção dos modelos de inferência do grau de saturação do concreto foi através das médias sazonais das variáveis ambientais, utilizando a regressão linear múltipla na obtenção dos modelos. Este processo fornece um estimador aceitável do GS do concreto ao longo do tempo utilizando as médias sazonais das variáveis meteorológicas como parâmetro de entrada dos modelos.

Notou-se também o comportamento local do GS tanto para macro ambientes distintos (Rio Grande e Santa Pola) quanto dentro de um mesmo microambiente (Rio Grande) quando se comparam diferentes medições de GS em diferentes locais. Foi possível observar a diferença em termos médios do GS medido em Santa Pola e em Rio Grande, fato possivelmente explicado pela diferença das características climáticas de cada região. Também foi possível constatar uma diferença considerável do GS medido na estação de medição a 1,2 km da costa em Rio Grande quando comparado ao medido por Guimarães (2005) junto a costa, apesar de ambas medições terem sido realizadas em zona de névoa marinha o GS junto a costa foi aproximadamente 25,49% maior, constatando a influência da distância da costa no GS.

Para utilização dos modelos de GS obtidos nesta pesquisa e apresentados nas tabelas 4.19 a 4.21 devem ser levados em consideração a similaridade da situação estudada com as características dos testemunhos apresentadas nas tabelas da seção 3.2, tais como traço do concreto, posição de exposição, face de exposição em relação a superfície de concretagem e orientação da face exposta. Quando não atendidos todos os requisitos para semelhança do ponto de estudo com algum modelo específico podem ser utilizados os modelos obtidos a partir da média dos CPs de cada ambiente ou de ambos os ambientes em conjunto, sempre atentando ao erro gerado na estimativa, que foi apresentado no capítulo 4.4. Cabe sempre ressaltar que os modelos obtidos foram gerados a partir de um conjunto de dados limitado e específico às características apresentadas, logo sua utilização requer

atenção.

Avaliando-se a aplicação probabilística apresentada através da análise de confiabilidade pode-se constatar a importância da consideração do GS na avaliação da vida útil de estruturas de concreto armado expostas a ambiente marítimo. A não consideração do parâmetro de correção R_{gs} leva a uma elevada probabilidade de falha da estrutura e consequente subestimativa da vida útil, haja visto que a condição de concreto saturado dificilmente é atingida em microambiente de nevoa. Os diversos modelos de GS utilizados na avaliação de confiabilidade retratam a sensibilidade do uso deste parâmetro na estimativa de vida útil, porém, a decisão de qual o modelo que melhor retrata a realidade da estrutura passa por uma pesquisa experimental *in loco* para validação do mesmo.

5.2. Sugestão para trabalhos futuros

Sugere-se para trabalhos futuros na área:

- Realização de medição de GS, com exposição ambiental em regiões com clima distinto dos já pesquisados.
- Realização de medição de GS, para traços de concreto usuais em ambientes marinhos.
- Comparação dos resultados obtidos dos modelos de vida útil com pesquisa experimental em estrutura atacada por cloretos.
- Realização de estudo levando em conta a umidade relativa de Santa Pola, não utilizada neste trabalho.
- Realização de medições de GS para avaliar a influência da distância de exposição da costa no GS.

6. REFERÊNCIAS

- AL-AMOUDI, O.S.B., RASHEEDUZZAFAR, ABDULJAUWAD S.N., MASLEHUDDIN M., “Effect of chloride-sulfate ions on reinforcement corrosion and sulfate deterioration in blended cements”. In: *INTERNACIONAL CONFERENCE ON FLY ASH, SILICA FUME, SLAG AND NATURAL POZZOLANS IN CONCRETE*, Sambul, 1992. Proceedings. Detroit: CANMET/ACI, 1992. P 1105-1123.
- ANDRADE, J.J.O., *Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2001.
- ANDRADE, M.C., *Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras*, Tradução: Antônio Carmona e Paulo Helene. Pini, SP, 1992.
- ANG, A. H-S; TANG, W. H., *Probability concepts in engineering planning and design, Decision, risk, and reliability*, V. 2, New York, John Wiley & Sons, 1984.
- APOSTOLOPOULOS, C.A. PAPADAKIS, V.G., “Consequences of steel corrosion on the ductility properties of reinforcement bar”, *Construction and Building Materials*, Volume 22, Issue 12, December 2008, Pages 2316-2324.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5736: *Cimento Portland pozolânico – especificação*, Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: *Projetos de estruturas de concreto – Procedimento*, Rio de Janeiro, 2014.
- ASTM C642-97, *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1997.
- BENTZ, E. C., “Probabilistic modeling of service life for structures subjected to chlorides”, *ACI Materials Journal*, v. 100, Issue 5, p. 391-397, 2003.
- BICZÓK, I., *Corrosion y proteccion del hormigon*, Tradução: Emilio J. Dócon Asensi. Bilbao, Ediciones Urmo, 1972.
- BORBA JÚNIOR, J. C., *Agressividade ambiental em zona de atmosfera marinha: estudo da*

deposição de cloretos e sua concentração em concretos na região sudeste, Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2011.

BRETANHA, S.F., *Variação do Grau de Saturação do Concreto em Ambiente Marítimo*, Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica). FURG - Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, RS, dezembro de 2004.

CASTRO, P., RINCÓN, O.T., PAZINI, E.J., "Interpretation of chloride profiles from concrete exposed to tropical marine environments", *Cement and Concrete Research*, v. 31, Issue 4, p. 529-537, 2001.

CLIFTON, J. R., "Predicting the Service Life of Concrete", *ACI Materials Journal*, v. 90, n. 6, p. 611-16, 1993.

CLIMENT, M. A.; VERA, G.; LÓPEZ, J. F.; VIQUEIRA, E.; ANDRADE, C. "A Test Method for Measuring Chloride Diffusion Coefficients Through Nonsaturated Concrete Part I: The Instantaneous Plane Source Diffusion Case", *Cement and concrete Research*, v 32, p. 1113-1123, 2002.

COSTA, A., APLLETON, J., "Chloride penetration into concrete in marine environment – Part II: Prediction of long term chloride penetration", *Materials and Structures*, v. 32, p. 354-359, 1999.

DAL MOLIN, D.C.C., *Fissuras em estruturas de concreto armado: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul*, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul Porto Alegre, RS, 1988.

DEVORE, J. L., *Probabilidade e Estatística para Engenharia e Ciências*, Pioneira Thomson, São Paulo, 2006.

EN 1990 (2002), *Eurocode - Basis of structural design*, The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC.

FREDERIKSEN, J. M., MEJLBRO, L., NILSSON, L-O., "Fick's 2nd Law – Complete solutions for chloride ingress boundary condition", *Division of Building Materials*. Lund Institute of Technology, Lund, 2008.

GJØRV, O.E., K. TAN, e M. ZHANG. "Diffusivity of chlorides from seawater into high-strength lightweight concrete", *ACI Materials Journal*, ACI, USA, p. 447-452, 1994.

GJØRV, O. E., *Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade*, Trad. Leda Maria Marques Dias Beck, São Paulo, Oficina de Textos, 2015.

GUIMARÃES, A. T. C., “Transporte de íons cloreto no concreto: influência do grau de saturação”, *IN: PATORREB: 3º Encontro sobre Patologia e reabilitação de edifícios/3º Congresso de Patologia y Rehabilitación de Edifícios*, p. 27-32, Porto, 2009.

GUIMARÃES, A. T. C. e HELENE, P. R. L., “Modelos para Previsão de Vida Útil em Ambiente Marítimo”, *In: 42º Congresso Brasileiro do Concreto*. Fortaleza, CE: IBRACON, p. 13-18, 2000.

GUIMARÃES, A. T. C., *Grau de Saturação: Sua Variação com o Tipo de Concreto e sua Influência na Difusão de íons Cloreto*, Monografia (Pós-Doutorado em Engenharia Civil), USP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, abril de 2005.

GUIMARÃES, A. T. C., RODRIGUES, F.T., “Influência do grau de saturação na difusão de cloretos no concreto: visão geral de sua importância na estimativa de vida útil”, *Teoria e Prática na Engenharia Civil*, n.15, p11-18, 2010.

GUIMARÃES, A. T. C., *Vida útil de estruturas de concreto armado em ambientes marítimos*, Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo - PCC/USP, Engenharia Civil, São Paulo, 2000.

GUIMARÃES, A. T. C.; HELENE, P. R. L., “Influência do teor de umidade sobre a difusividade de cloretos na pasta de cimento”, *Relatório FAPESP processo 99/10909-7*, São Paulo, 2001.

HACKL, J., KOHLER, J., “Reliability assessment of deteriorating reinforced concrete structures by representing the coupled effect of corrosion initiation and progression by Bayesian networks”, *Structural Safety*, Vol. 62, p. 12-23, 2016.

HALDAR, A. MAHADEVAN, S., *Probability, Reliability, and Statistical Methods in Engineering Design*, EUA, John Wiley & Sons, 2000.

HELENE, P. R. L., “Corrosão em Armaduras para Concreto Armado”, *PINI / IPT*, p. 45, São Paulo, SP, 1986.

HELENE, P. R. L., *Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado*, Tese (Livre Docente), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Civil, São Paulo, 1993.

HOFFMANN, A. T., *Influência da adição de sílica ativa, relação água/aglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos em concretos*, Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre, 2001.

JASTRZEBSKI, Z.D., *The nature and properties of engineering materials*, Singapore, John Wiley & Sons Inc, 1987.

LEA, F.M., *The chemistry of cement and concrete*, Great Britain, Edward Arnould Ltd, 1970.

LIMA, M. G., MORELLI, F., “Caracterização da agressividade do ambiente marinho às estruturas de concreto”, IN: *VII Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica*, Rio Grande, 2016.

MACDONALD, K.A., NORTHWOOD, D. O., “Experimental measurements of chloride ion diffusion rates using a two-compartment diffusion cell: Effects of material and test variables”, *Cement and Concrete Research*, v.25, n.7, p. 1407, 1995.

MAGALHÃES, Fábio. C., *A problemática dos concretos não conformes e sua influência na confiabilidade de pilares de concreto armado*, Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, RS, 2014.

MAGALHÃES, Felipe. C., *Proposição de um modelo para penetração e íons cloreto em concreto: estudos dos parâmetros intervenientes e análise probabilística*, Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Construção e Infraestrutura, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2018.

MARTYS, N.S., “Diffusion in partially-saturated porous materials”, *Materials and Structures*, Vol. v.32, p.555-62, 1999.

MAZER, W., *Metodologia para a previsão da penetração de íons cloreto em estruturas de concreto armado utilizando lógica difusa*, Dissertação de Doutorado, ITA, São José dos Campos, 2010.

MEDEIROS, M. H. F., ANDRADE, J. J. O., HELENE, P., “Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto”, *Concreto: Ciência e Tecnologia*, São Paulo, IBRACON, 2011.

MEIRA, G. R., *Agressividade por Cloretos em Zona de Atmosfera Marinha Frente ao Problema da Corrosão em Estruturas de Concreto Armado*, Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina-UFSC, Florianópolis, SC, 2004.

MEIRA, G.R., ANDRADE, C., PADARATZ, I. J., ALONSO, C., BORBA, J.C., “Chloride penetration into concrete structures in the marine atmosphere zone – Relationship between deposition of chlorides on the wet candle and chlorides accumulated into concrete”, *Cement e Concrete composites*, v. 29, p. 667- 676, 2007.

MELCHERS, R. E.; BECK, A. T., *Structural Reliability Analysis and Prediction*, Wiley, 2018.

MERCADO-MENDOZA, H., LORENTE, S., BOURBON, X., “The Diffusion Coefficient of Ionic Species Through Unsaturated Materials”, *Transport in Porous Media*. v.96, Issue 3, p. 469-481, November, 2012

MERCADO-MENDOZA, H., LORENTE, S., BOURBON, X., “Ionic aqueous diffusion through unsaturated cementitious materials – A comparative study”, *Construction and Building Materials*, v. 51, p. 1-8, 2014.

NEVILLE, A., *Propriedades do concreto*, 2ª Edição, São Paulo, Pini, 1997.

NIELSEN, E. P., GEIKER, M. R., “Chloride diffusion in partially saturated cementitious material”, *Cement and Concrete Research*, v. 33, p. 133-138, 2003.

NUNES, J. L. O., *Intensidade de ataques por cloretos ao concreto em relação a distância da água do mar*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, RS, 2006.

PAGE, C. L., SHORT, N. R., EL TARRAS, A., “Diffusion of chloride ions in hardened cement pastes”, *Cement and Concrete Research*, v.11, p.395-406, USA, Pergamon Press Lt, 1981.

PERAÇA, M. G. T., *Modelos para estimativa do grau de saturação do concreto mediante variáveis ambientais que influenciam na sua variação*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, RS, 2009.

PEREIRA, V. C. O., MONTEIRO, E. C. B., ALMEIDA, K. S., “Influence of cement type in reinforcement corrosion of mortars under action of chlorides”, *Construction and Building Materials*, v. 40, p. 710-718, 2013.

PEREIRA, V.G.A., *Avaliação do coeficiente de difusão de cloretos em concretos: Influência do tipo de cimento, da relação água/cimento, da temperatura e do tempo de cura*, Dissertação

de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2001.

PETERNELLI, L. A., *Notas de aulas*, Disponível em: www.16032004/materiais/CAPITULO9.pdf, Acessado em maio de 2018.

REAL, M. V., *Análise probabilística de estruturas de concreto armado, sob estado plano de tensão, através do método dos elementos finitos*, Tese (Doutorado em Engenharia), PPGEC/UFRGS, Porto Alegre-RS, 2000.

SACIOTO, A. P., *Comportamento frente à ação de cloretos de concretos compostos com adições minerais submetidos a diferentes períodos de cura*, Tese (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria-UFSM, Santa Maria, RS, 2005.

SANTIAGO, W. C., *Estudo da (Não-)Conformidade de Concretos Produzidos no Brasil e sua Influência na Confiabilidade Estrutural*, Dissertação de Mestrado, USP, São Carlos SP, 2011.

SHENGJUN, Z., “Analytical Model of Square Root Increase of Surface Chloride Concentration and Decrease of Chloride Diffusion”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 28, Issue 4, 2016.

SONG, H. W., LEE, C. H., ANN, K. Y., “Factors influencing chloride transport in concrete structures exposed to marine environments”, *Cement e Concrete Composites*, v. 30, p. 113-121, 2008.

SONG, L., SUN, W. GAO, J., “Time dependent chloride diffusion coefficient in concrete”, *Journal of Wuhan University of Technology-Master*, v.28, n 2, p. 314-319, 2013.

SOUZA, K. N., *Estudo Experimental e Probabilístico da Vida Útil de Estruturas de Concreto Armado Situadas em Ambiente Marítimo: Influência do Grau de Saturação do Concreto sobre a Difusividade de Cloretos*, Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica). Universidade Federal do Rio Grande-FURG, Rio Grande, RS, 2005.

THOFT-CHRISTENSEN, P., FRANGOPOL, D.M., COROTIS, R.B., RACKWITZ, R., “Assessment of the reliability of concrete slab bridges reliability and optimization of structural systems”, *Pergamon*, 1997.

TUUTTI, K., “Service life of structures with regard to corrosion of embedded steel” *In: PERFORMANCE OF CONCRETE IN MARINE ENVIRONMENT*, ACI SP-65, 1980.

UJI, K., MATSUAKA, Y., MARUYA, T., “Formulation of an equation for surface chloride content due to permeation of chloride”, *IN: Proceedings of Third International Symposium on Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction*, Elsevier Applied Science. London UK, 1990.

VERA, G., ANTÓN, C., LÓPEZ, M.P., CLIMENT, M.A., “Depassivation time estimation in reinforced concrete structures exposed to chloride ingress: A probabilistic approach”, *Cement and concrete Composites*, v 79, p. 21-33, 2017.

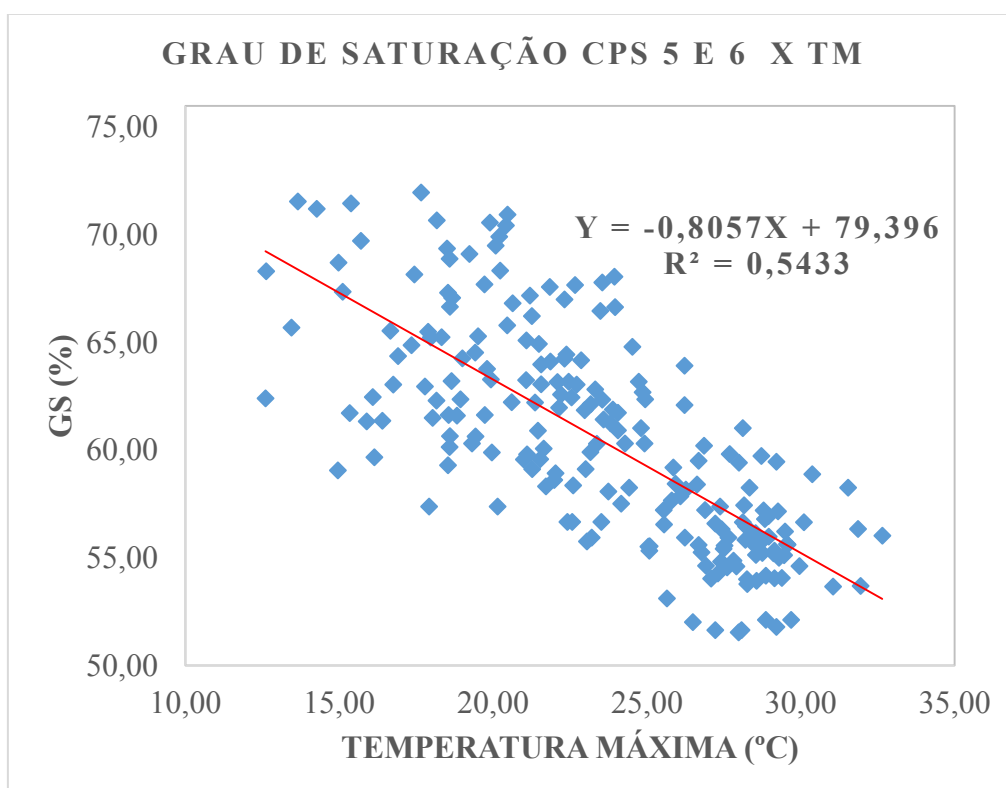
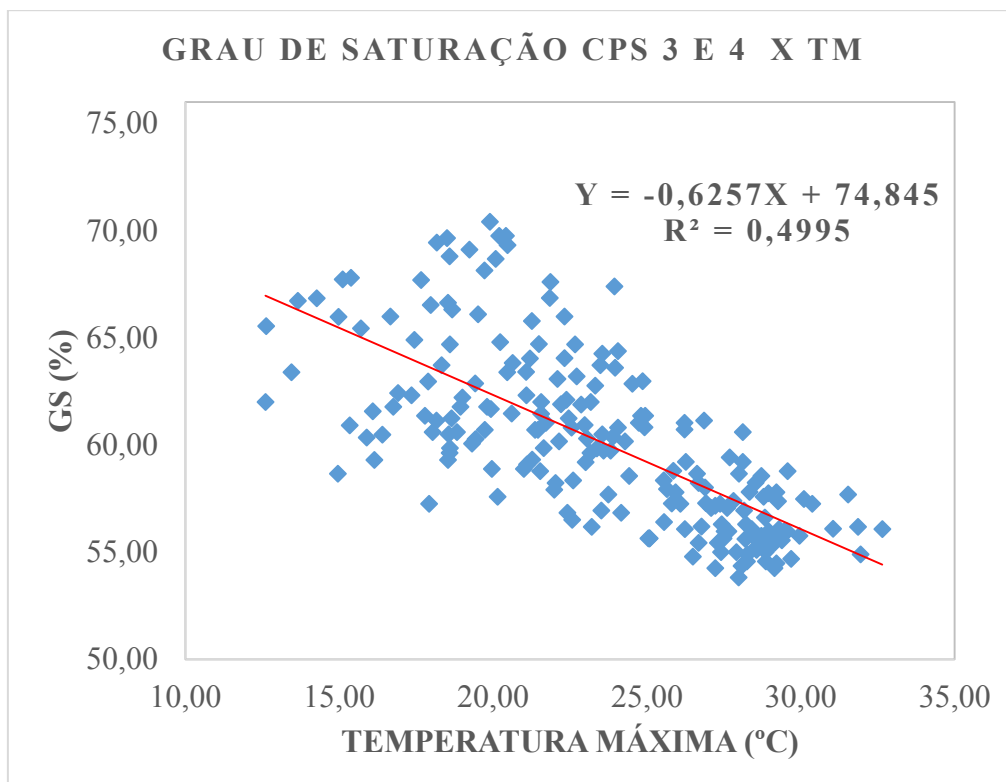
VERA, G., CLIMENT, A., VIQUEIRA, E., ANTÓN, C., ANDRADE, C., “A Test Method for Measuring Chloride Diffusion Coefficients through Partially Saturated Concrete. Part II: The Instantaneous Plane Source Diffusion Case with Chloride Binding Consideration”, *Cement and concrete Research*, v 37, p. 714-723, 2007.

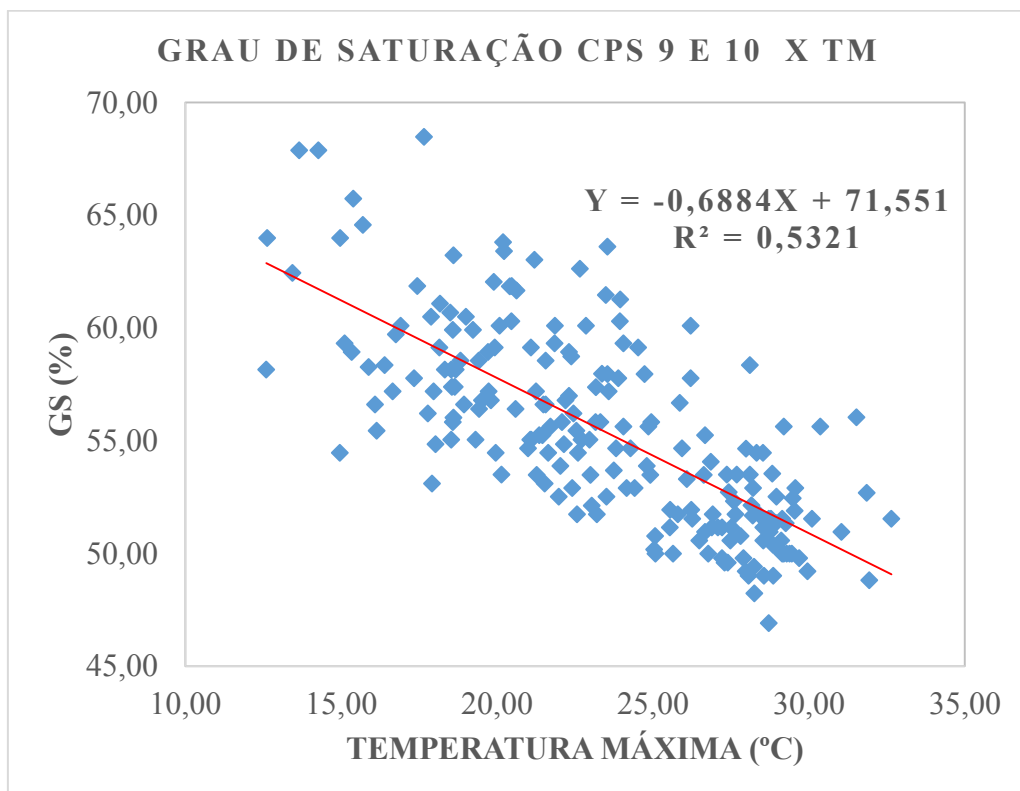
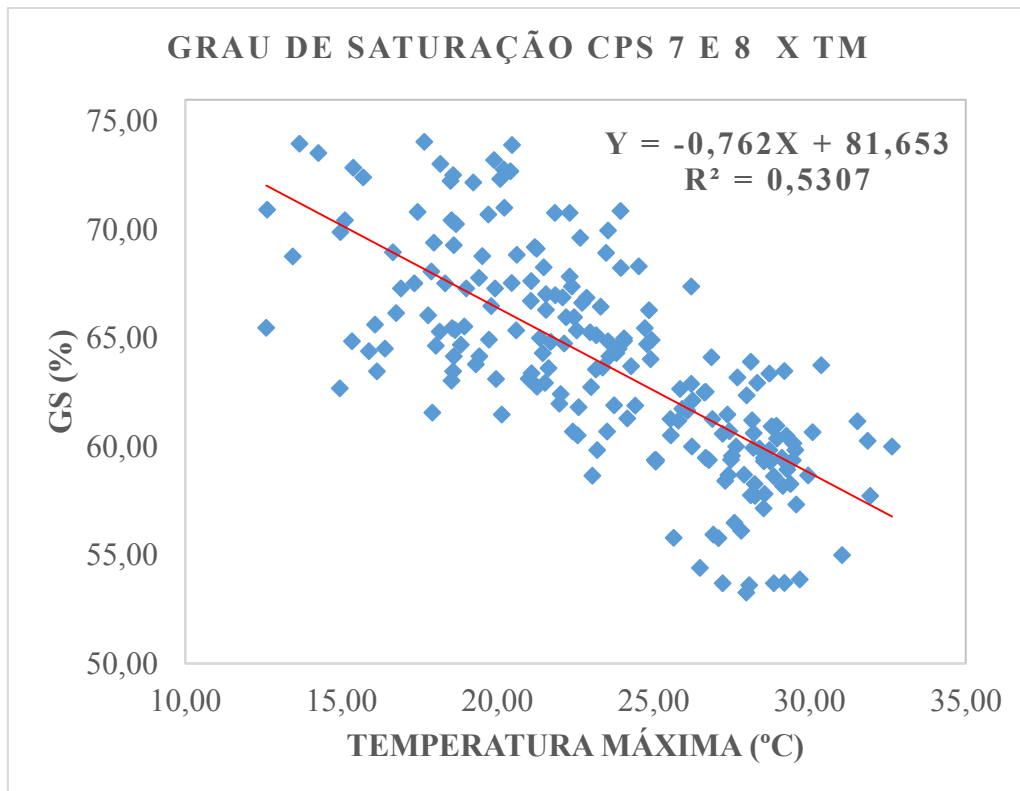
VILCHEZ, E. F., *Estudio de la influencia de las variables meterologicas em el grado de saturacion en hormigones expuesto a un ambiente marino atmosferico mediterráneo*, Trabajo fin de Master, Master en Ingenieria de los Materiales, Agua y Terreno, Universidad de Alicante, Alicante, 2011.

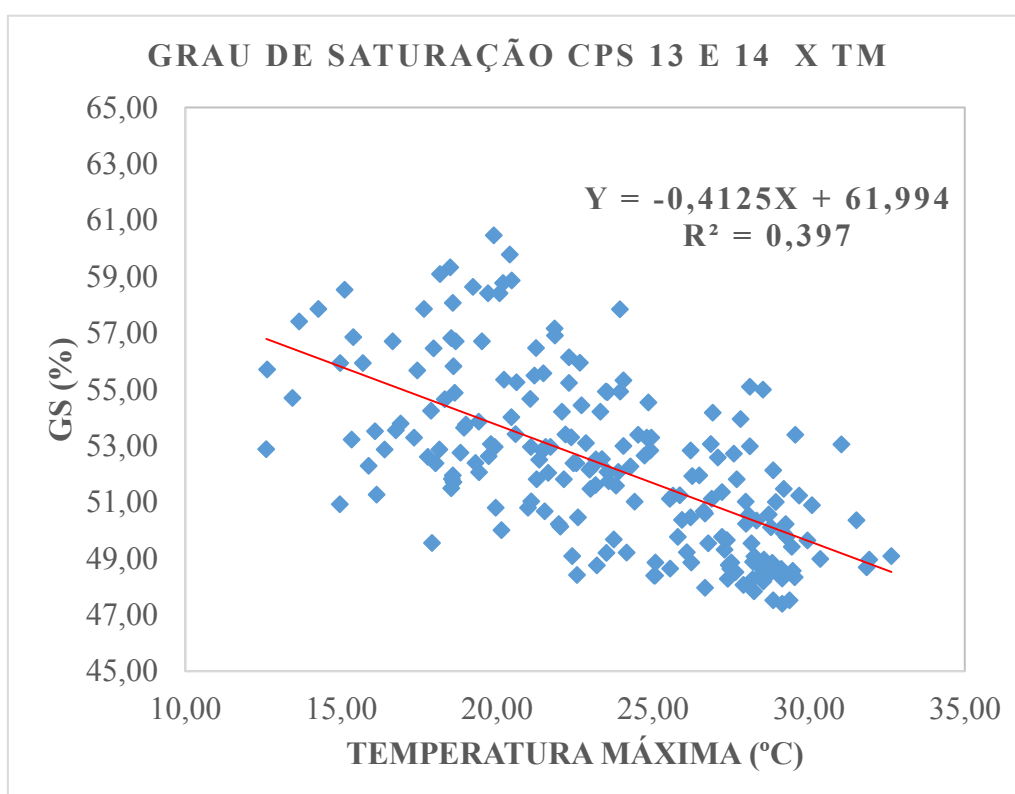
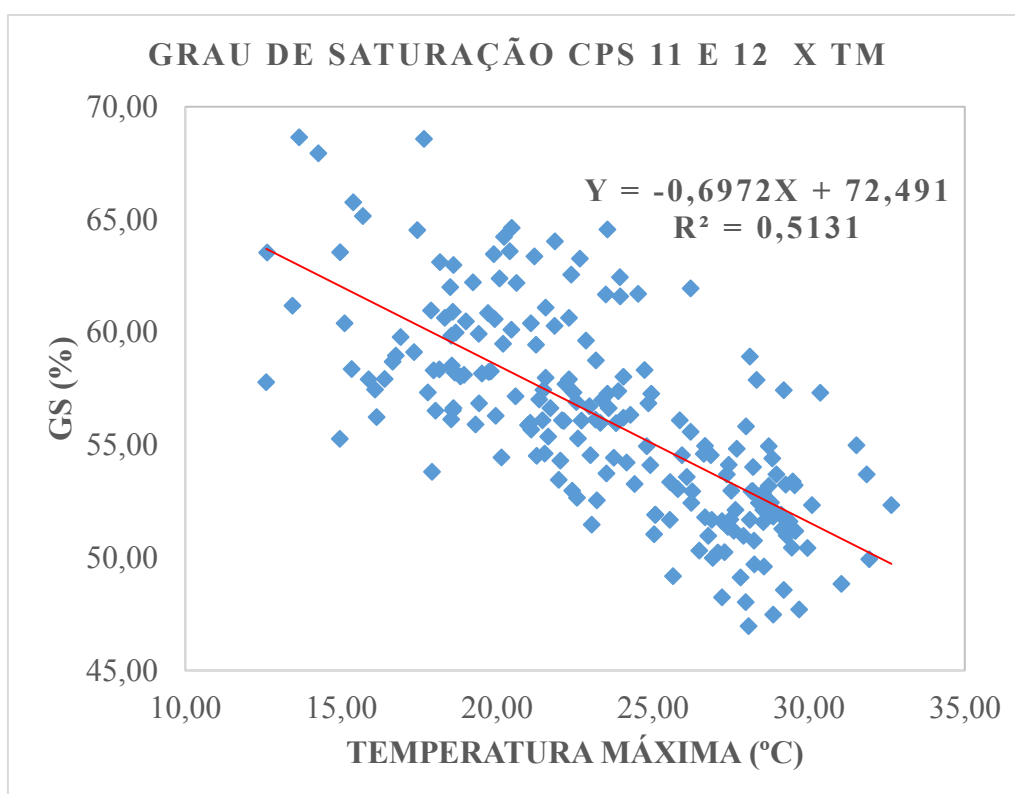
YANG, L. F., CAI, R., YU, B., “Investigation of computational model for chloride concentration of concrete in marine atmosphere zone”, *Ocean Engineering*, v. 138, p. 105- 111, 2017.

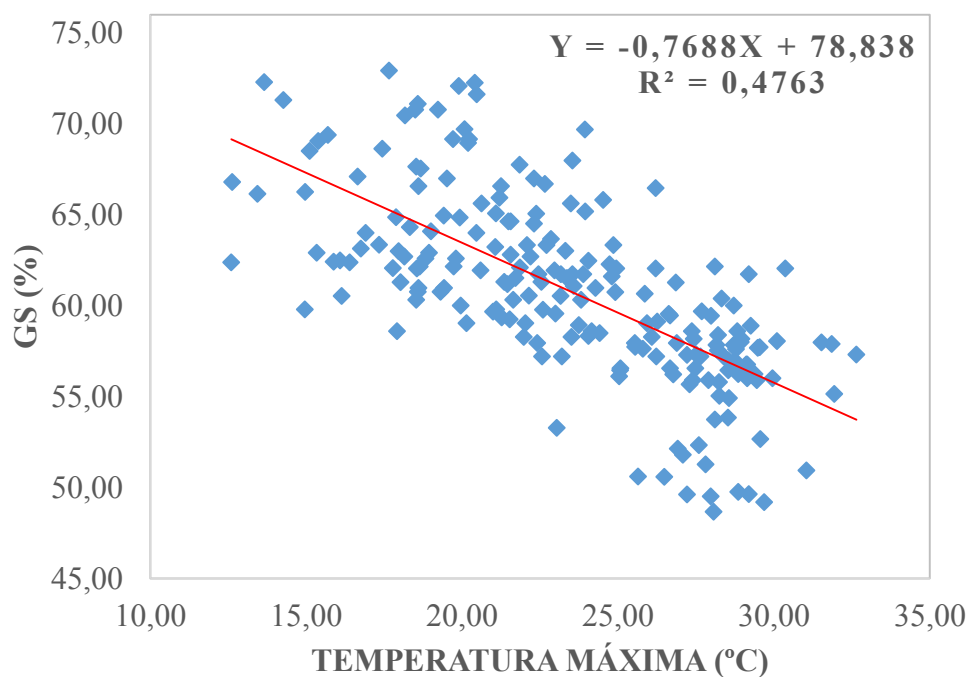
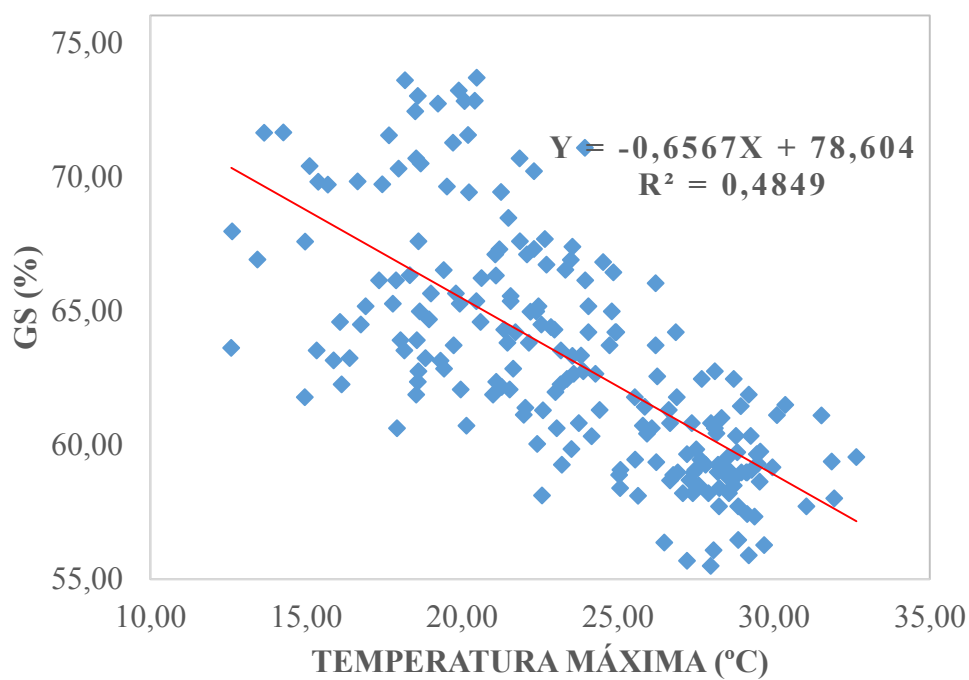
YU, B., NING, C., LI B., “Probabilistic durability assessment of concrete structures in marine environments: Reliability and sensitivity analysis”, *China Ocean Engineering*, v.31 p.63-73, 2017.

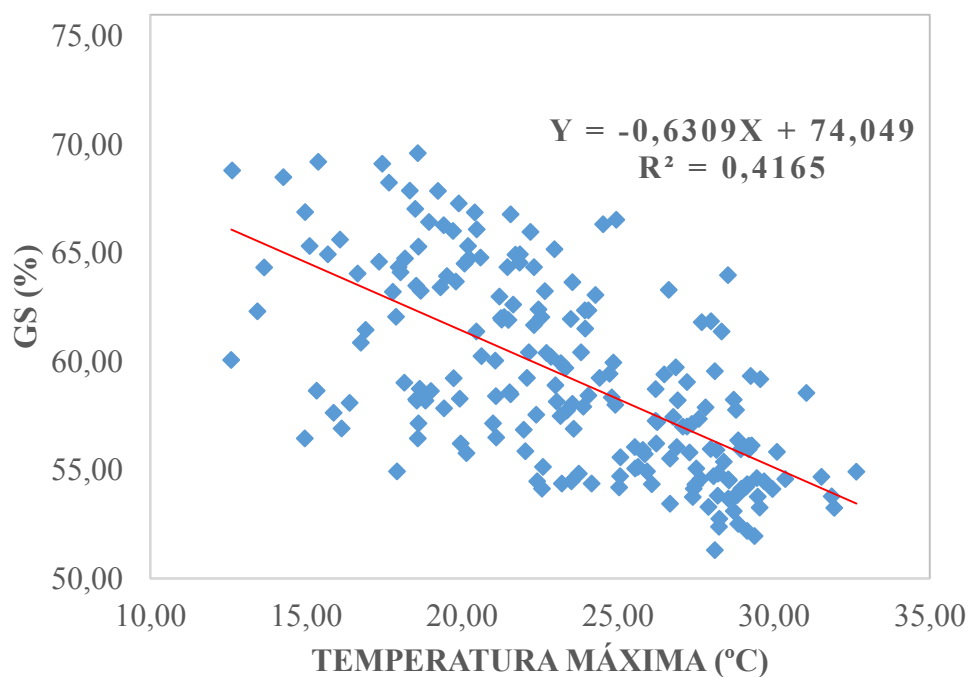
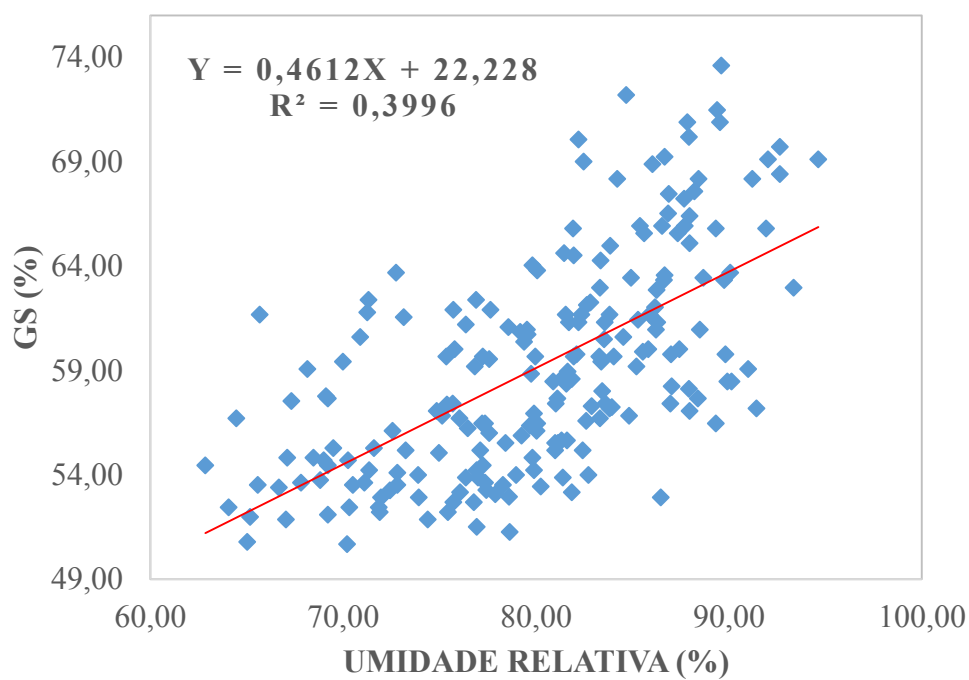
APÊNDICE A1 – Gráficos de dispersão e regressão linear simples, estação de Rio Grande para médias semanais das variáveis.

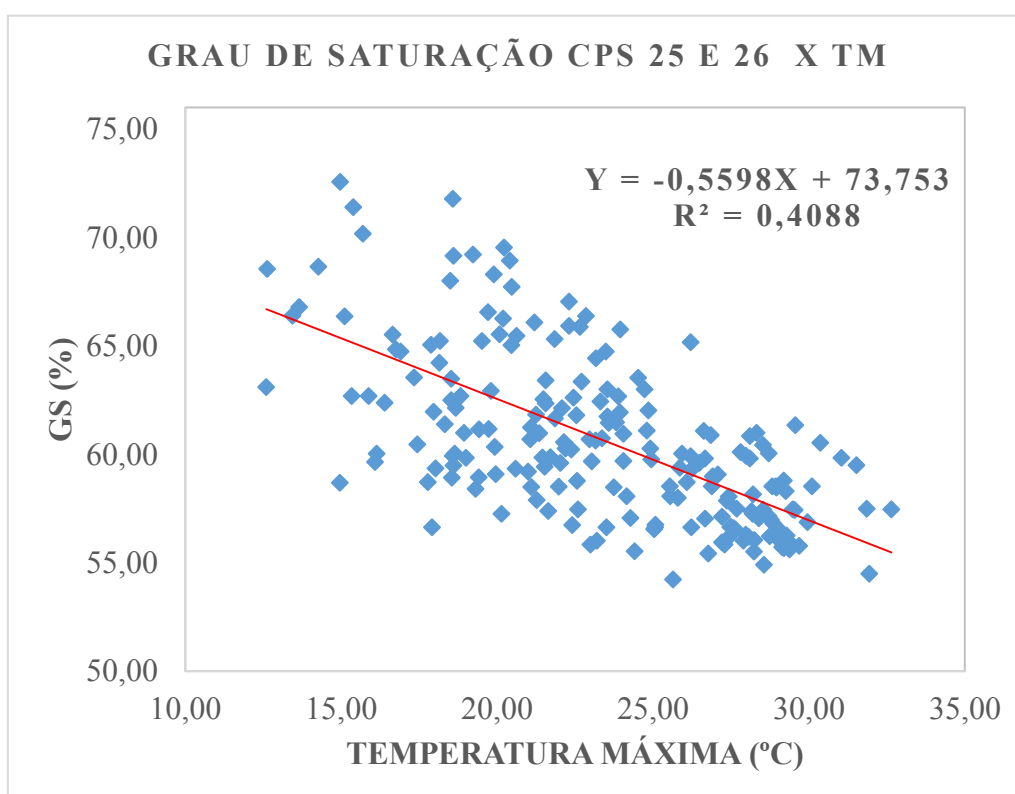
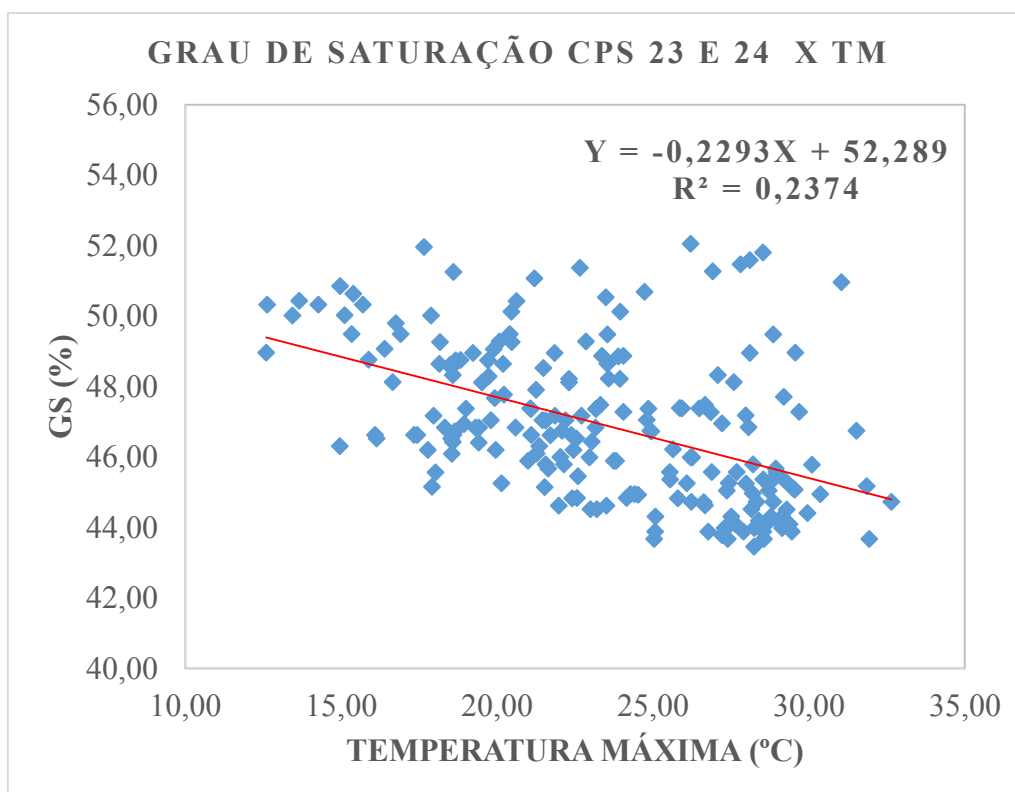


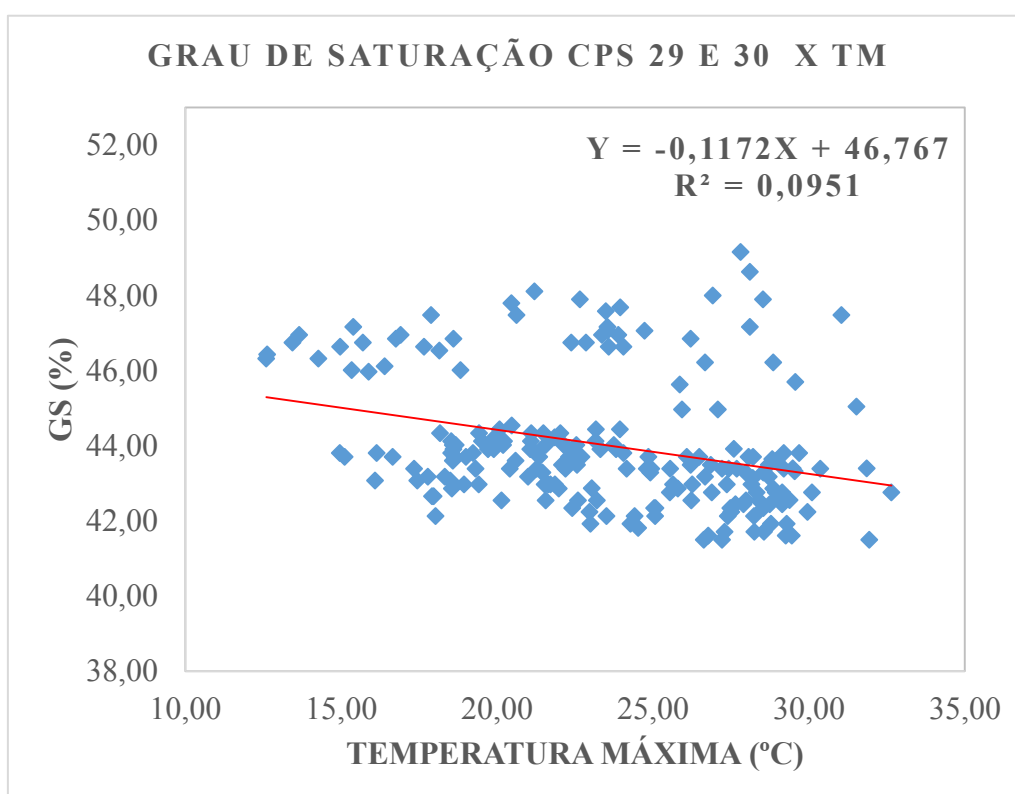
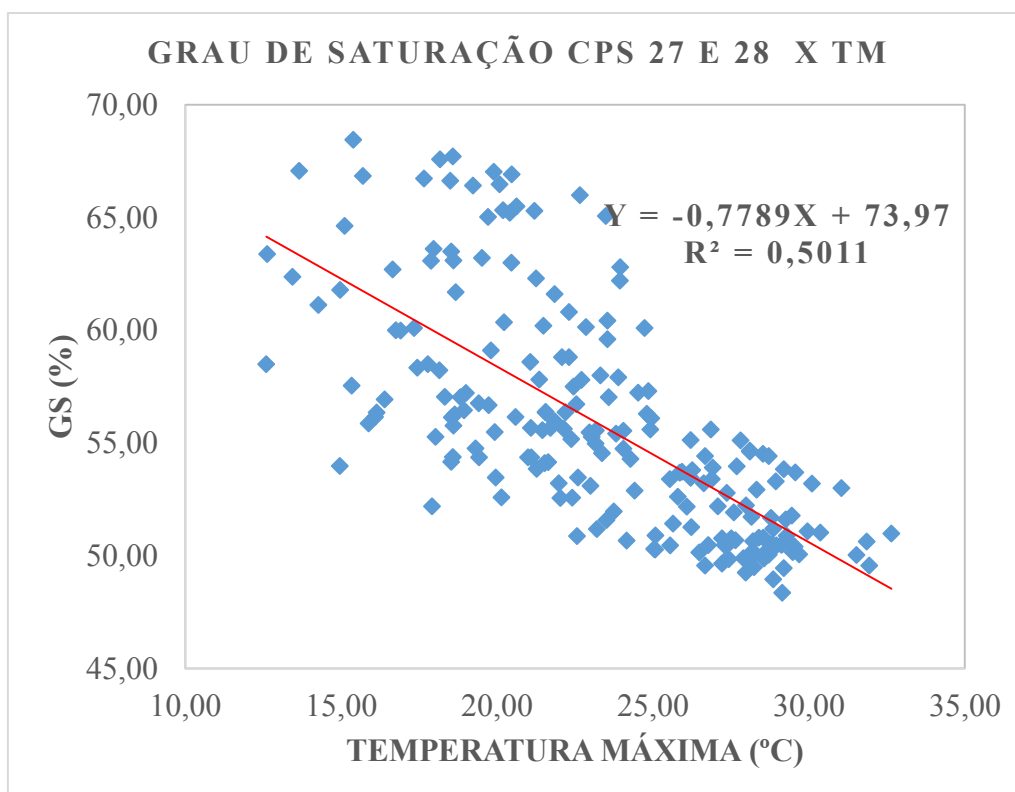


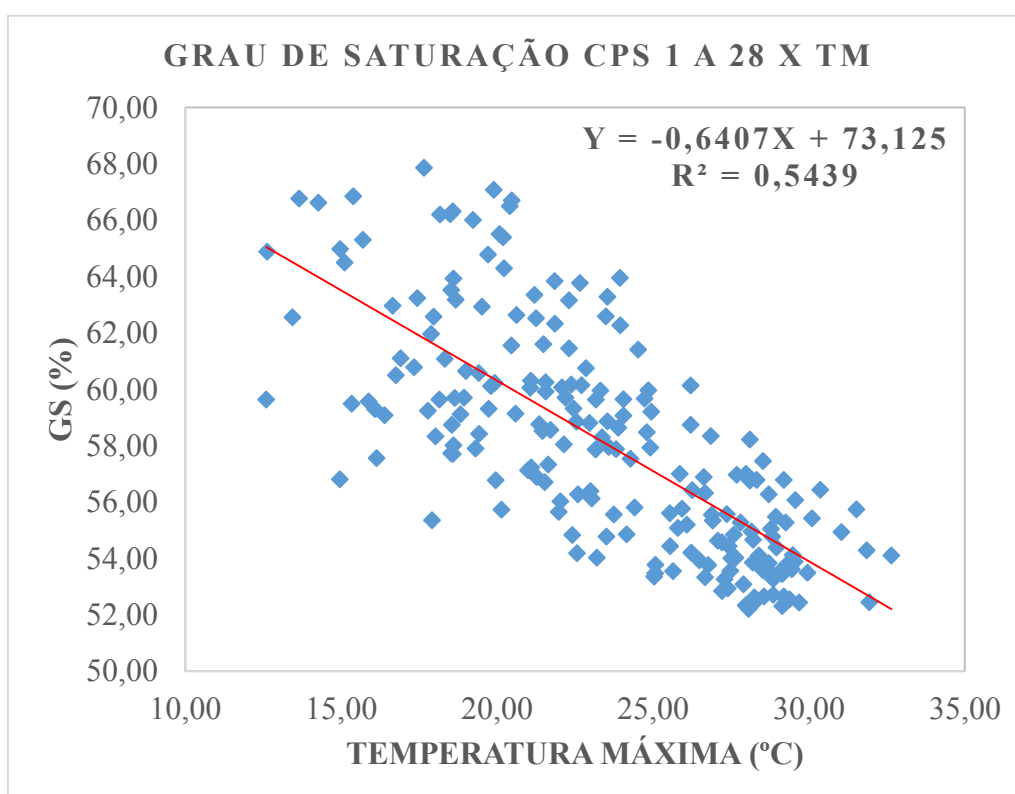
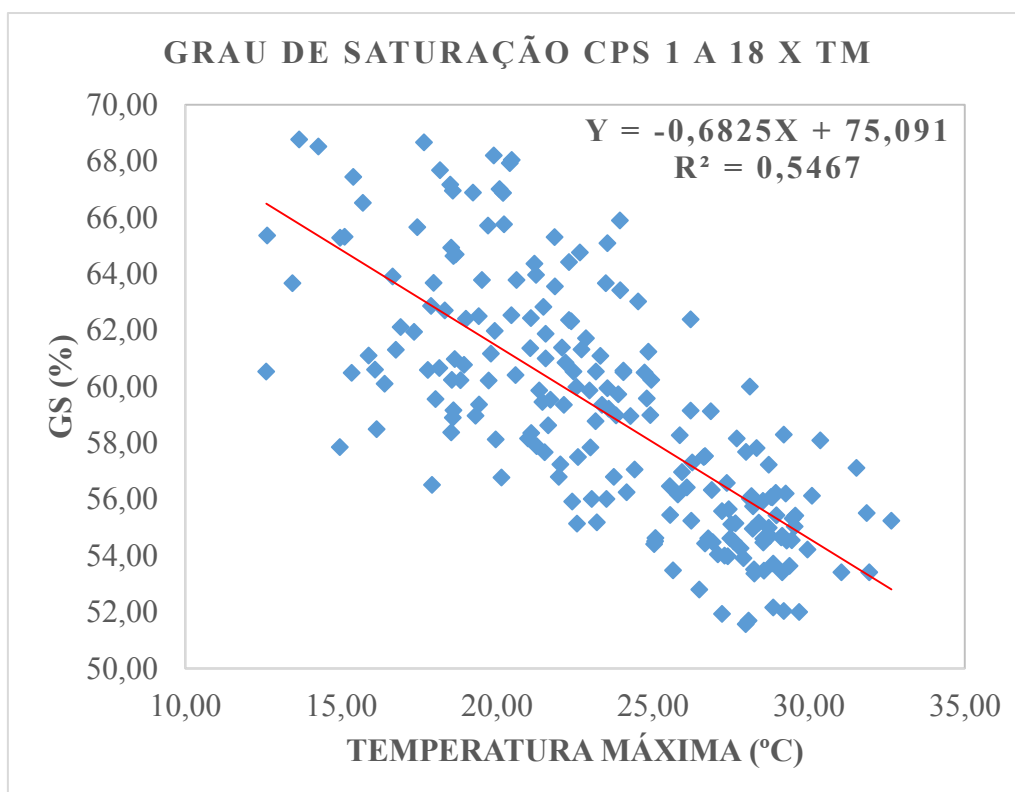


GRAU DE SATURAÇÃO CPS 15 E 16 X TM**GRAU DE SATURAÇÃO CPS 17 E 18 X TM**

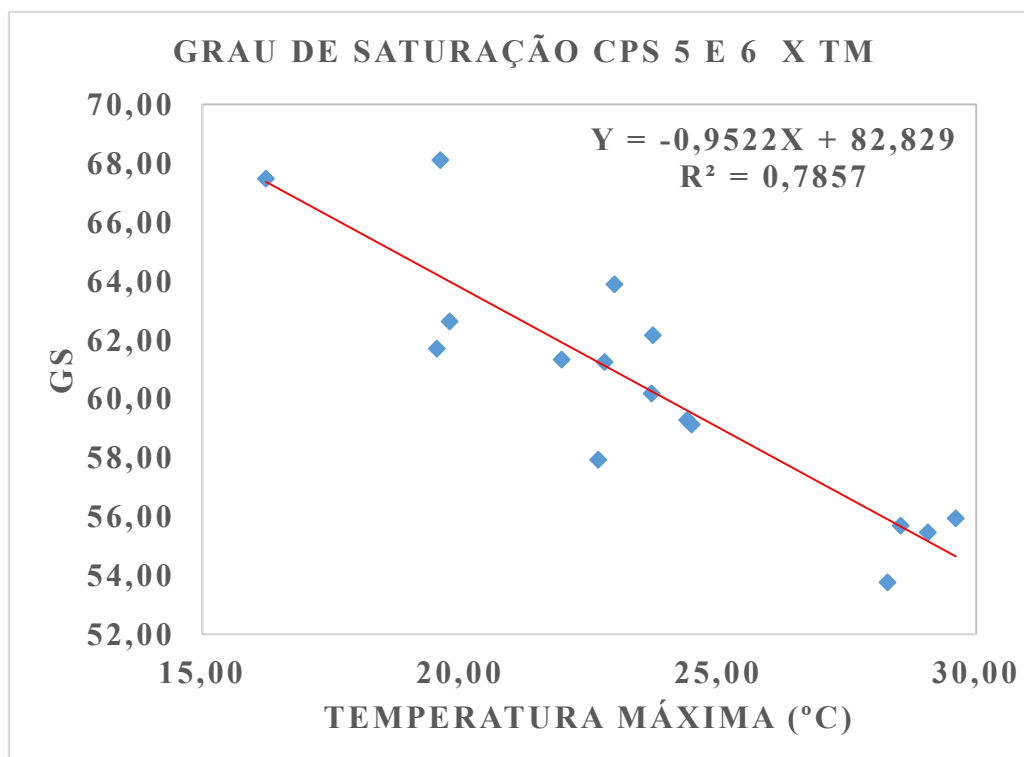
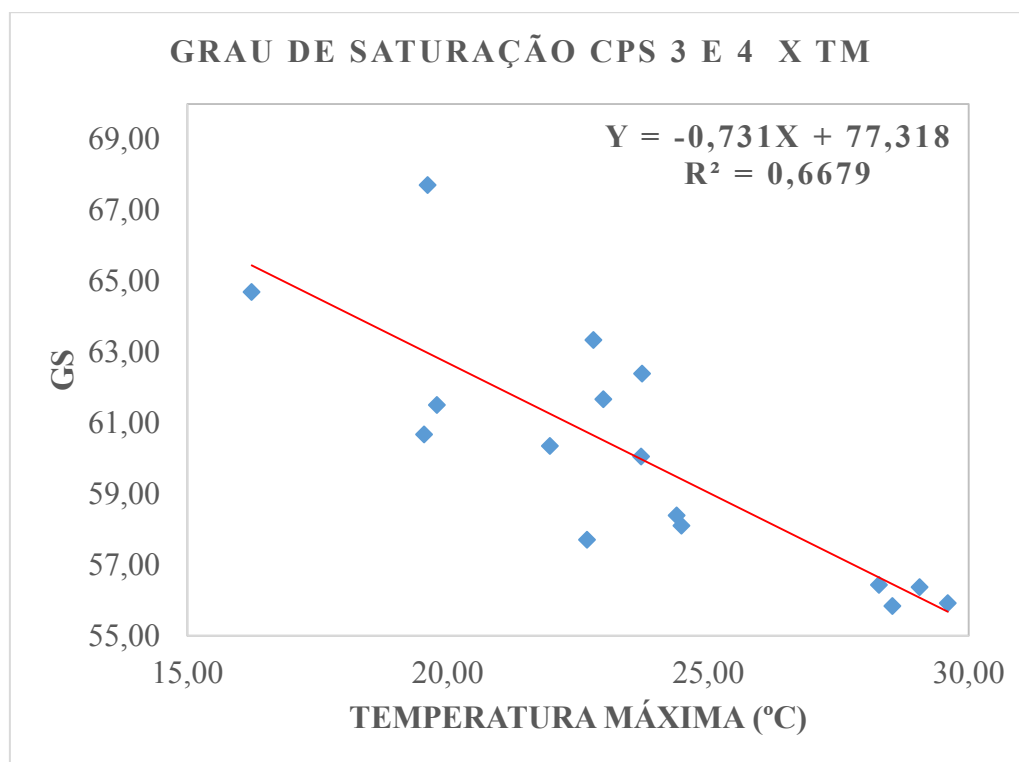
GRAU DE SATURAÇÃO CPS 19 E 20 X TM**GRAU DE SATURAÇÃO CPS 21 E 22 X UR**

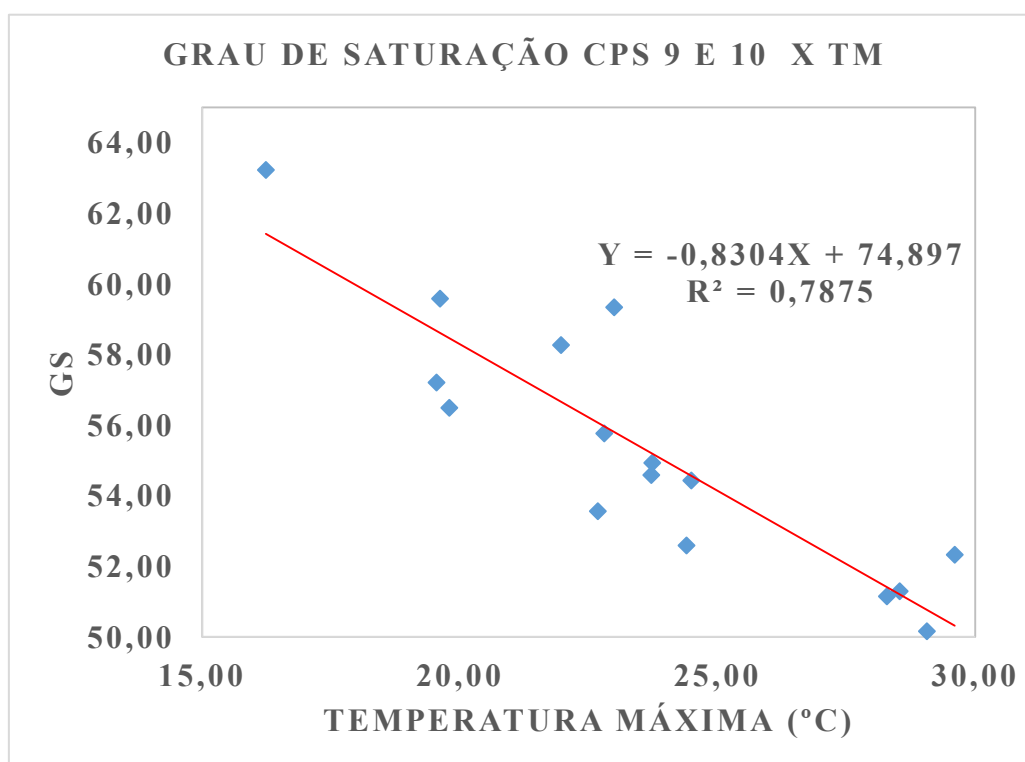
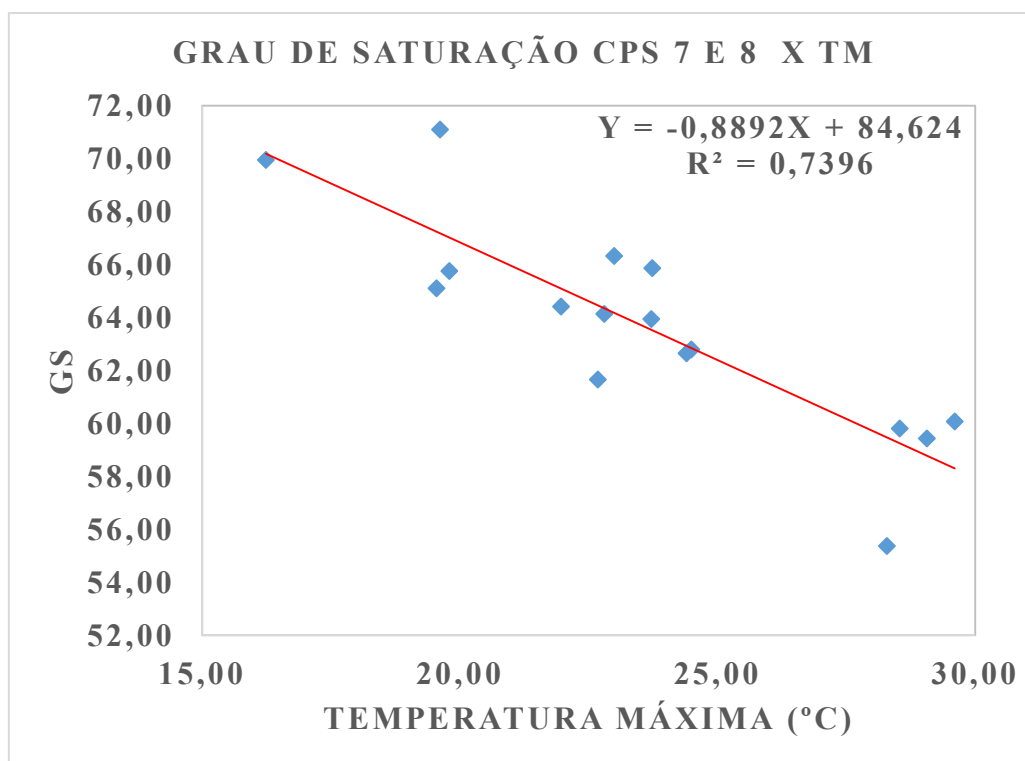


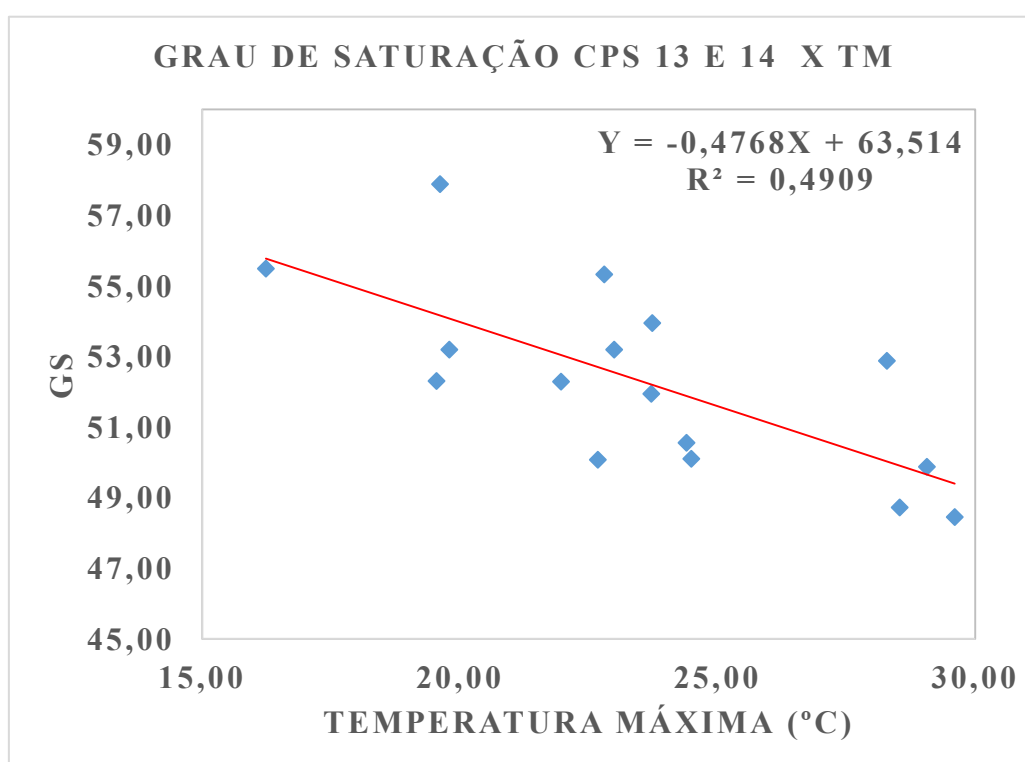
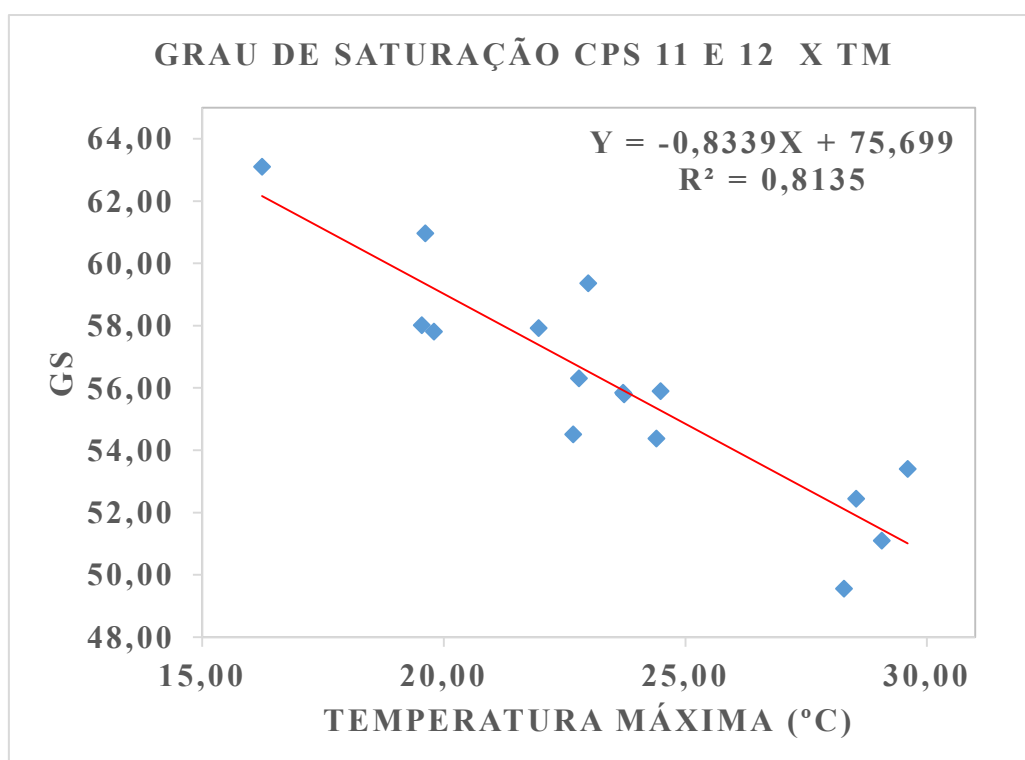




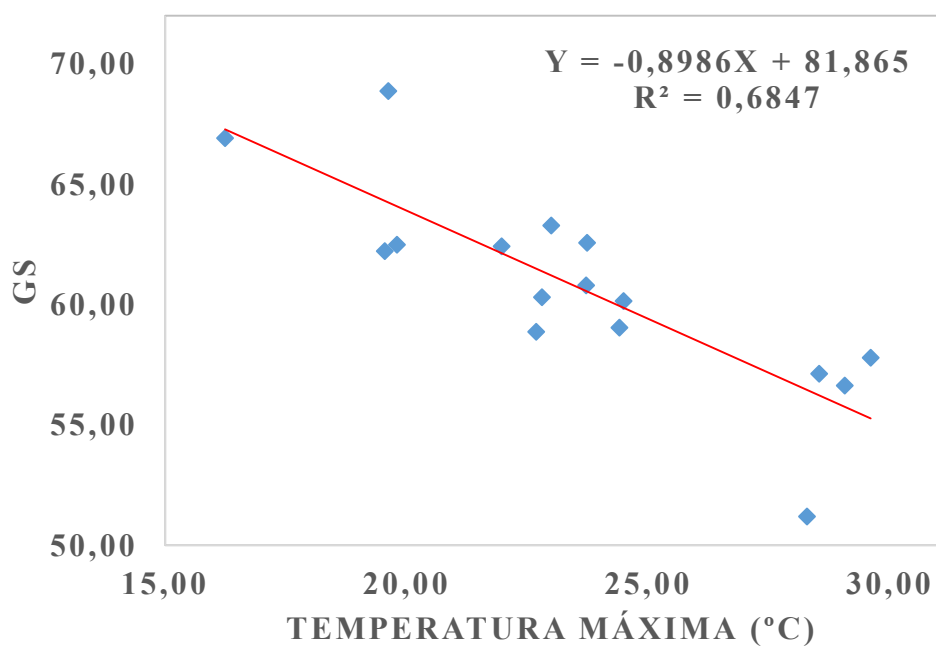
APÊNDICE A2 – Gráficos de dispersão e regressão linear simples, estação de Rio Grande para médias sazonais das variáveis.



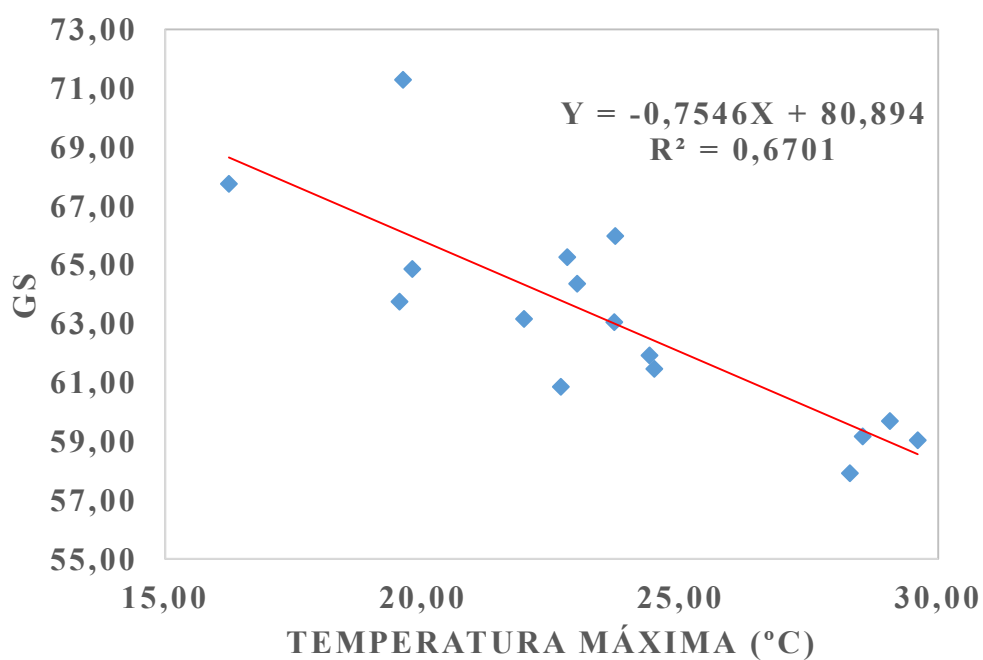


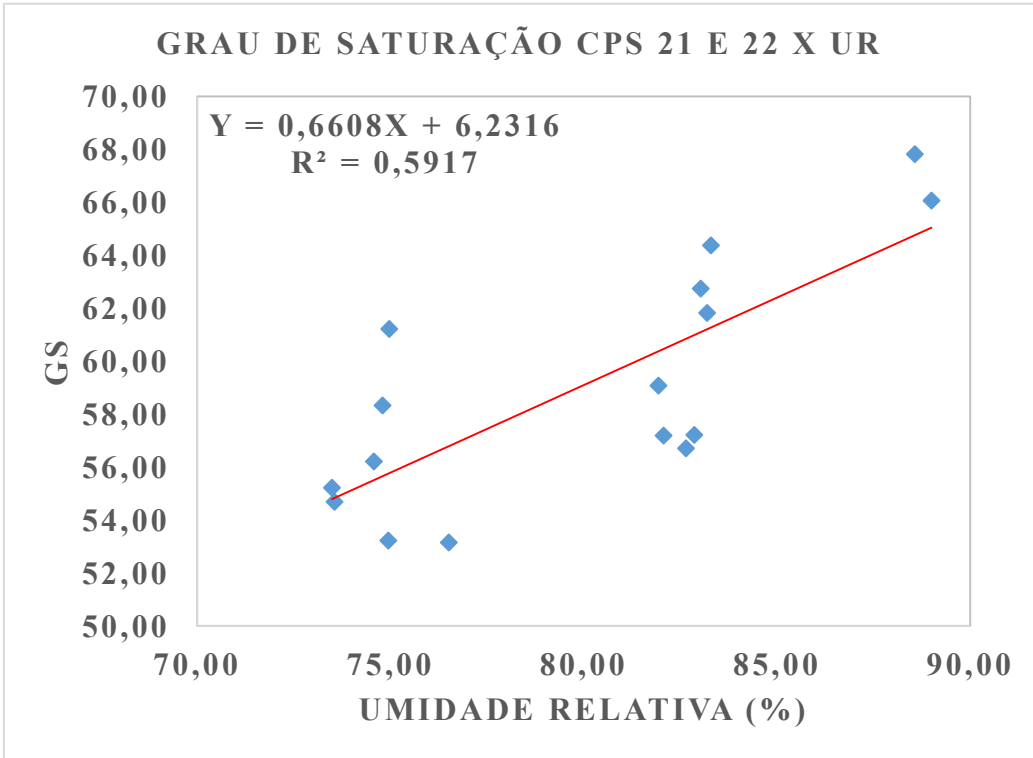
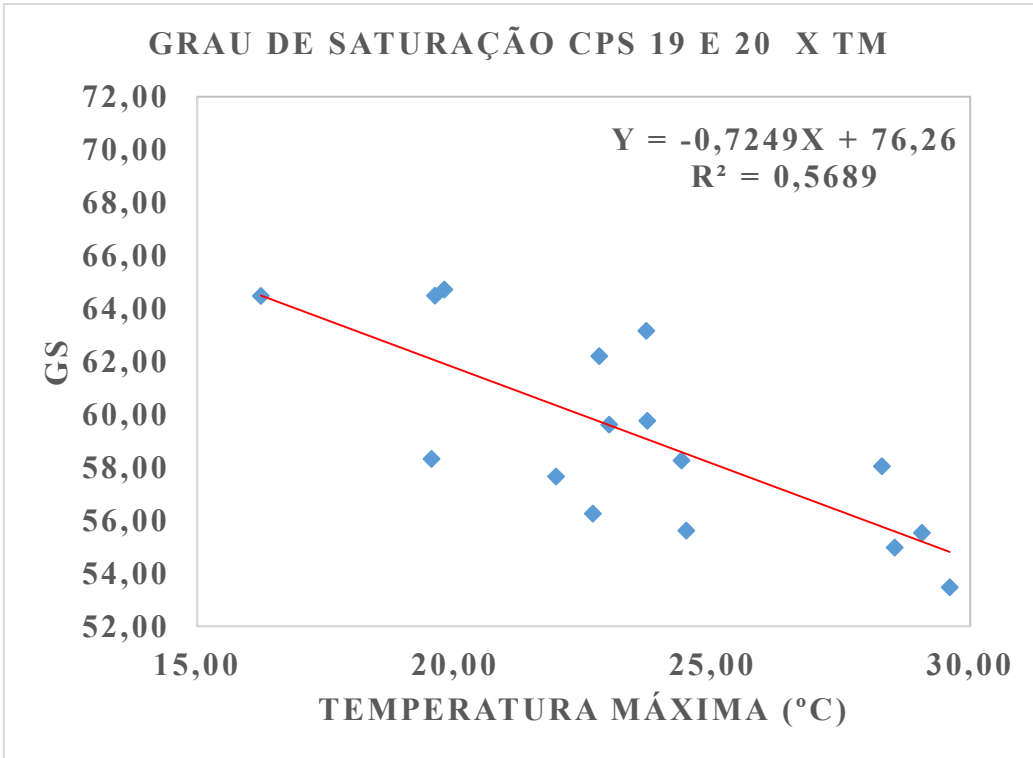


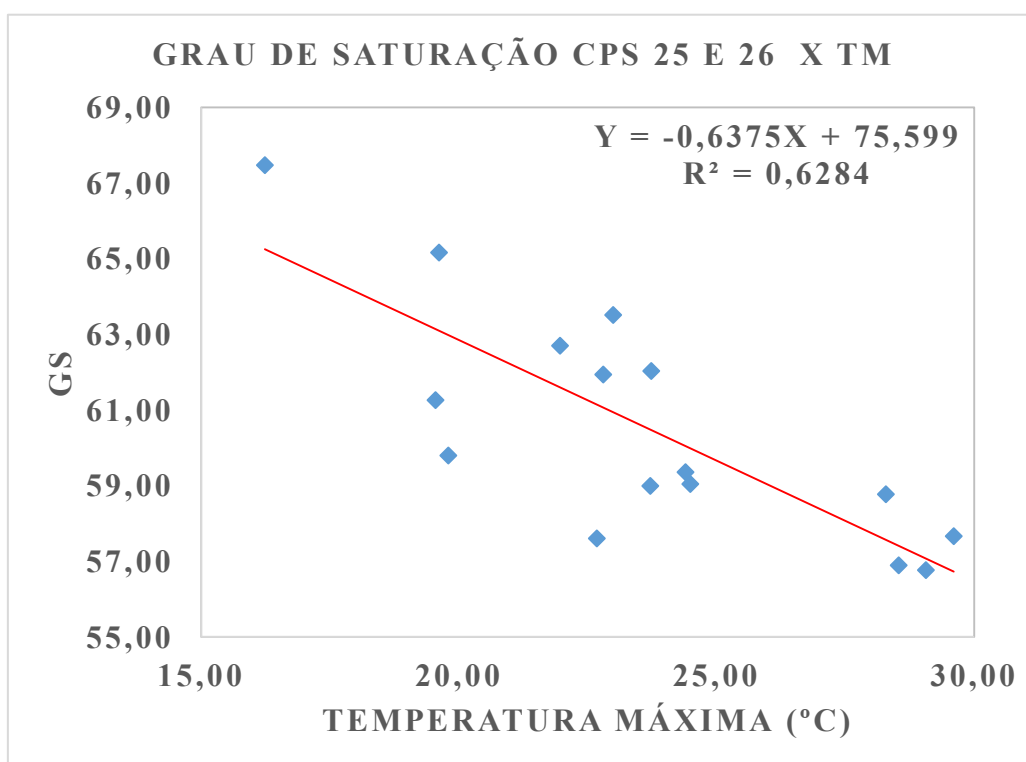
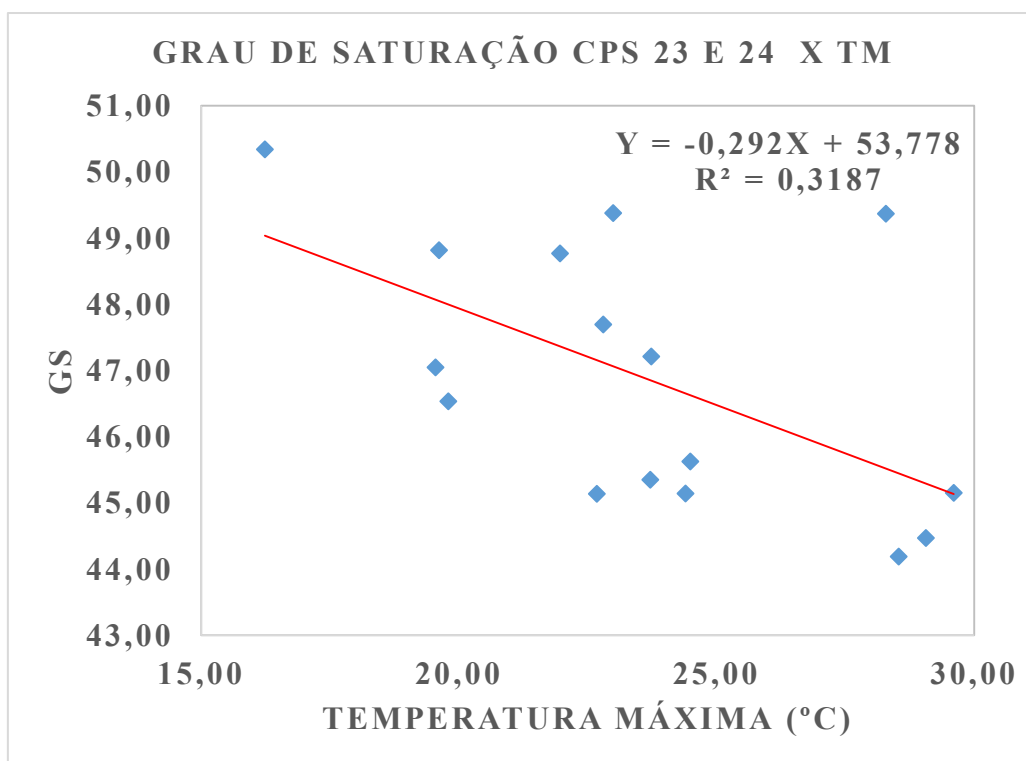
GRAU DE SATURAÇÃO CPS 15 E 16 X TM

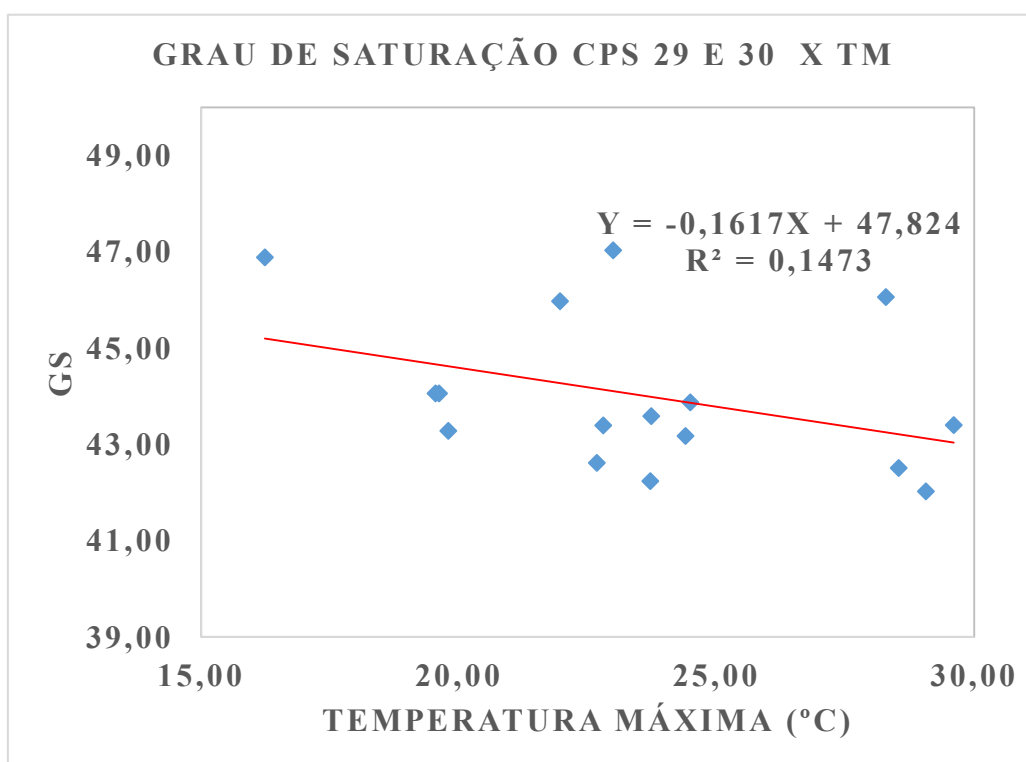
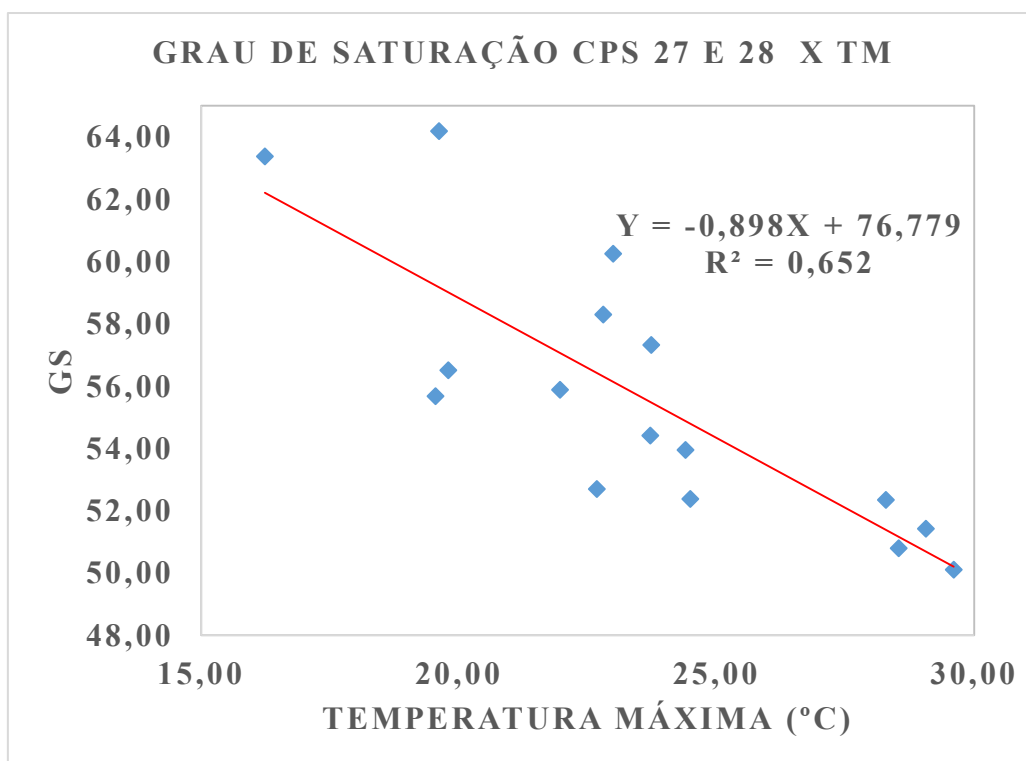


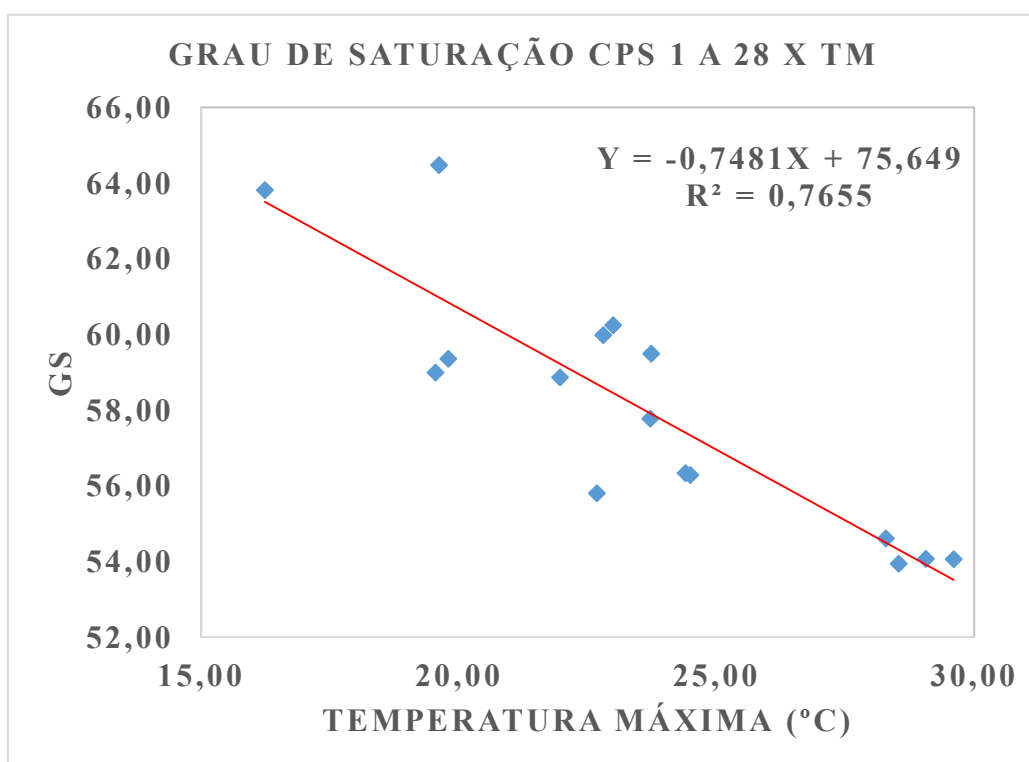
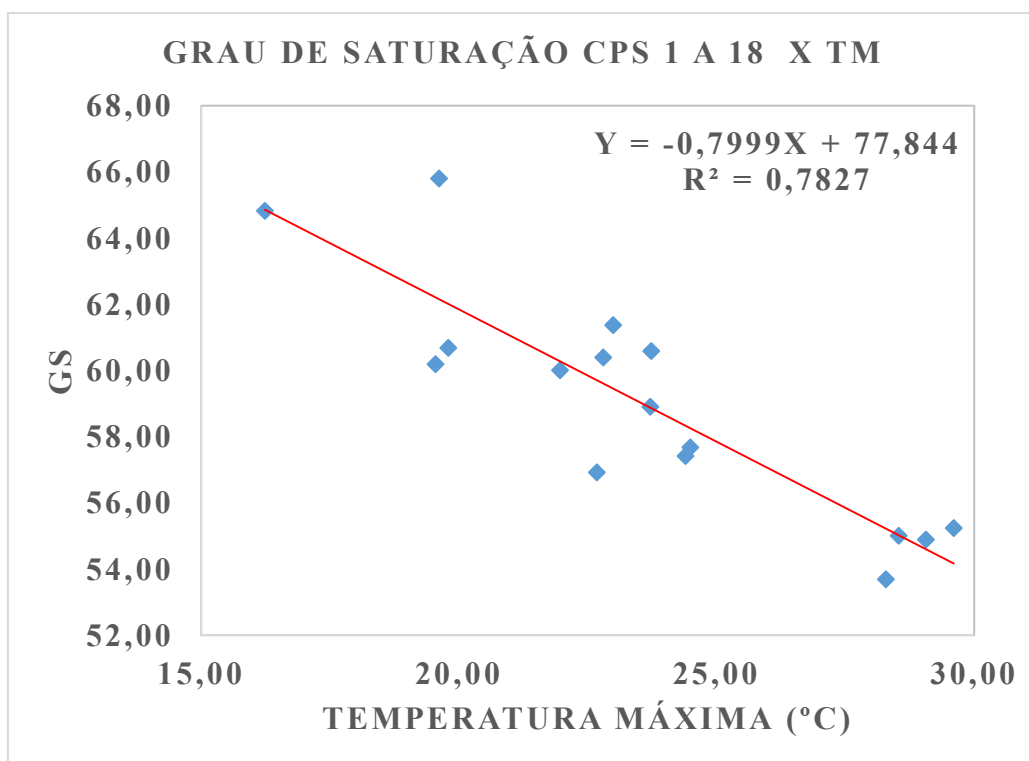
GRAU DE SATURAÇÃO CPS 17 E 18 X TM



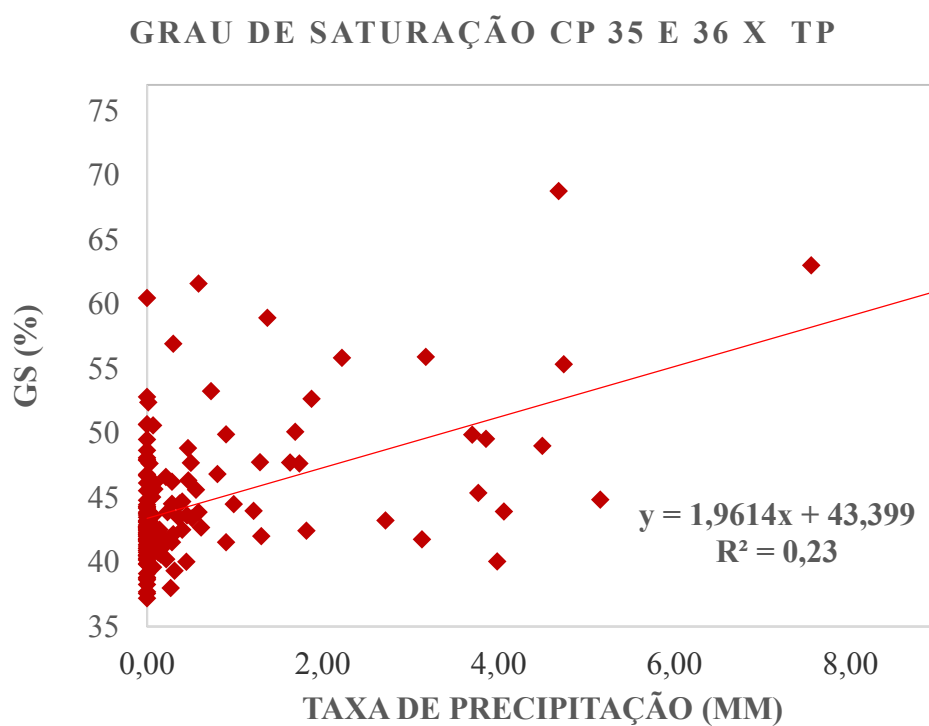
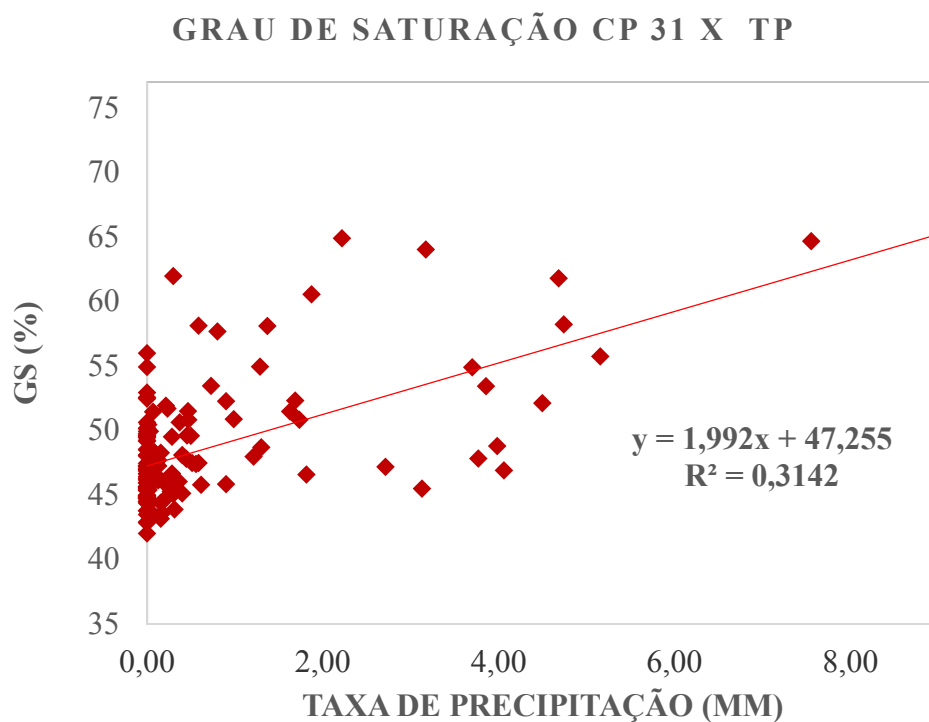




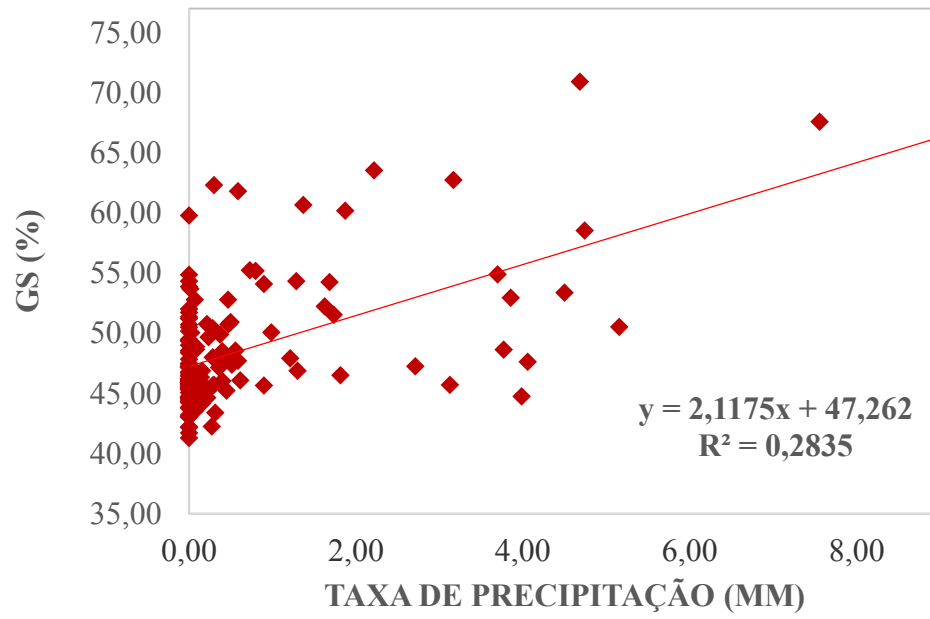




APÊNDICE B1 – Gráficos de dispersão e regressão linear simples, estação de Santa Pola, Alicante para médias semanais das variáveis.

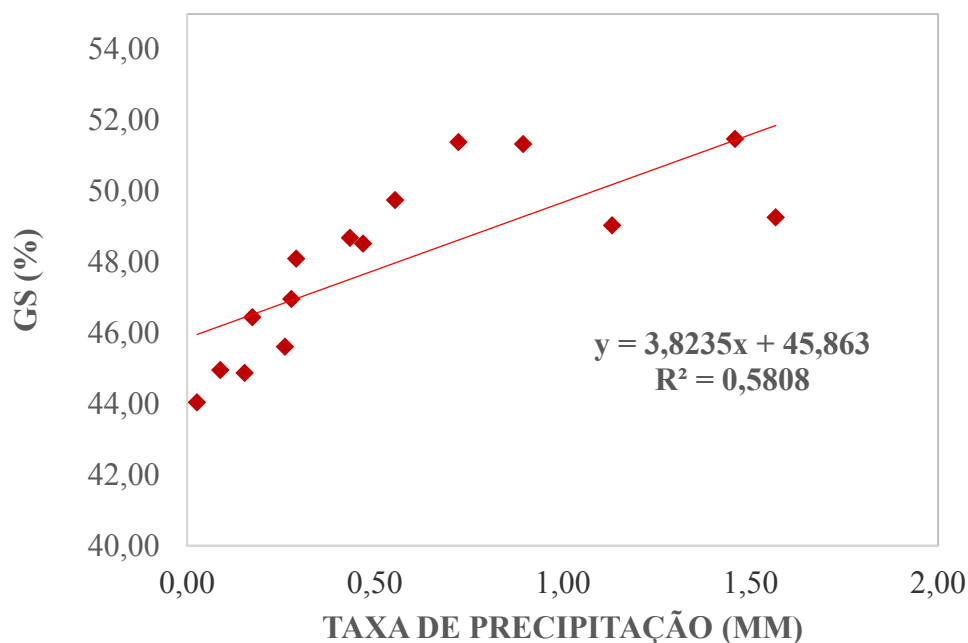


**GRAU DE SATURAÇÃO CP 30, 31, 35 E 36 X
TP**

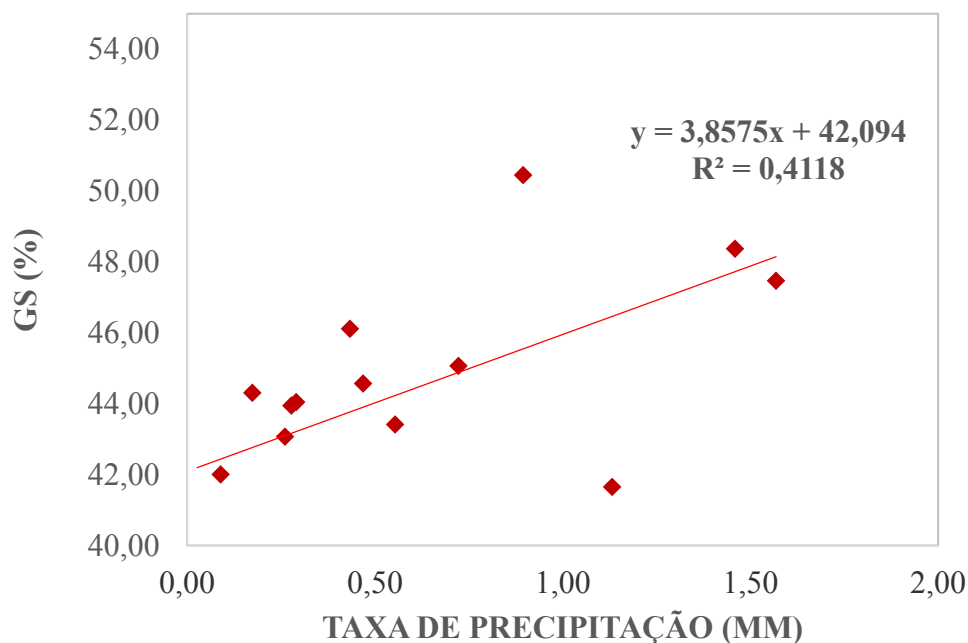


APÊNDICE B2 – Gráficos de dispersão e regressão linear simples, estação de Santa Pola, Alicante para médias sazonais das variáveis.

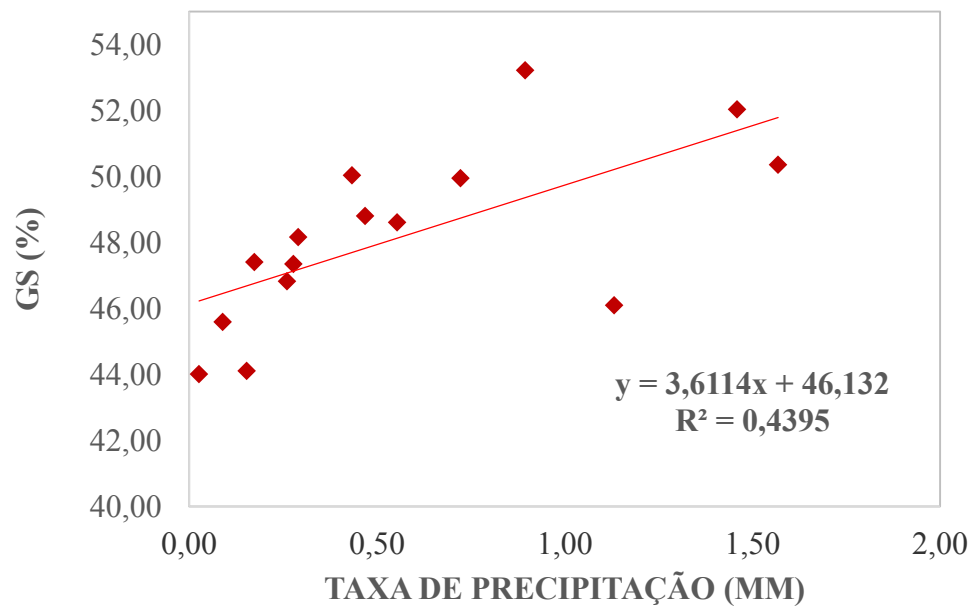
GRAU DE SATURAÇÃO CP 31 X TP



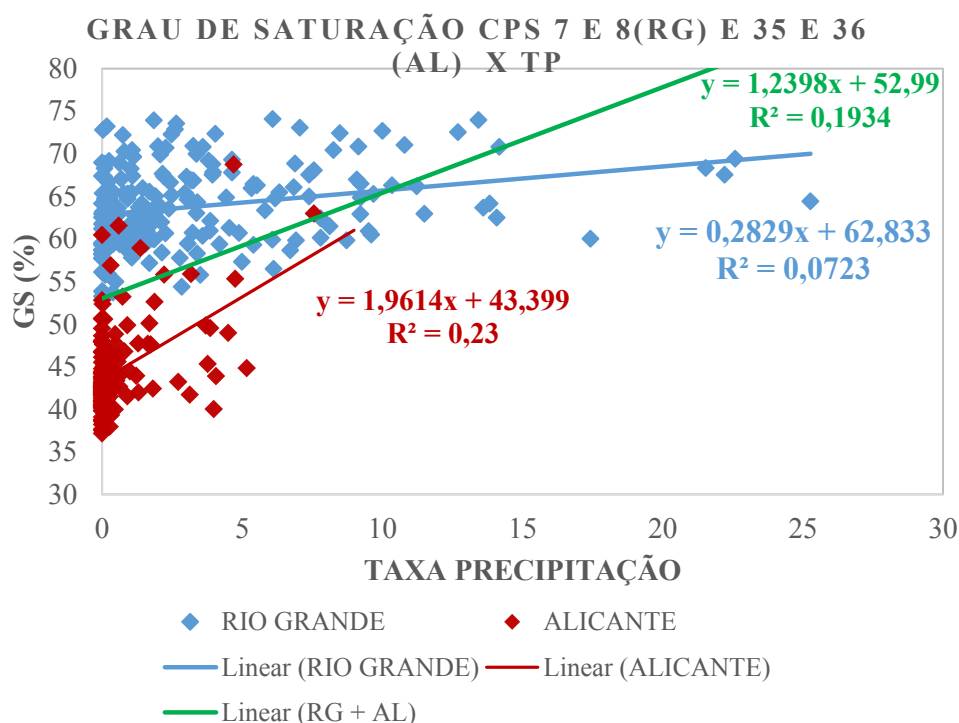
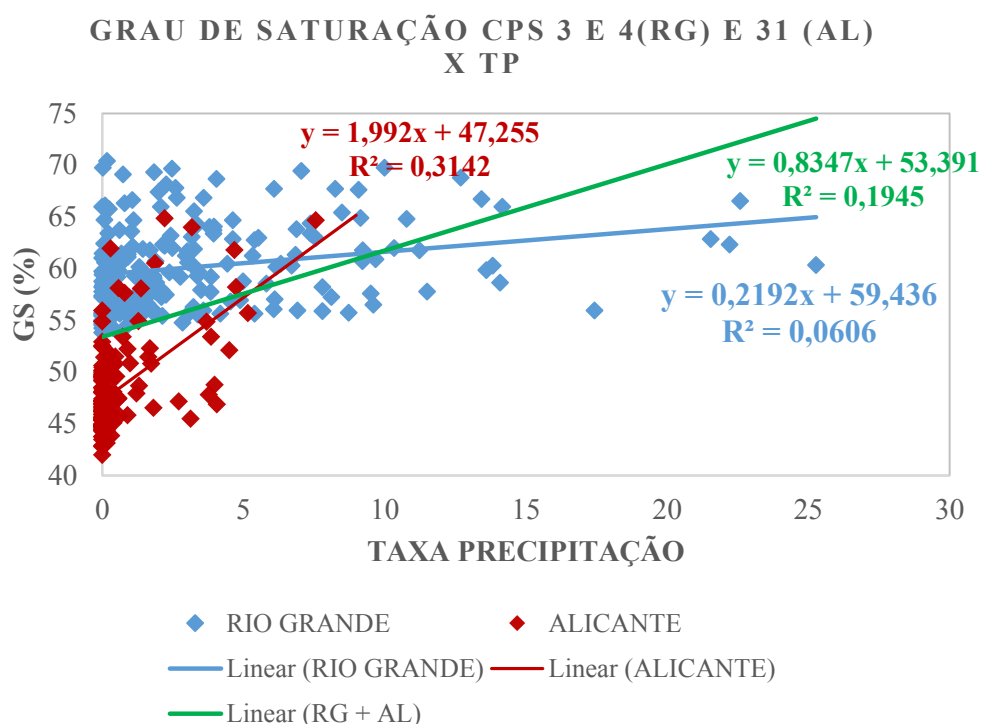
GRAU DE SATURAÇÃO CP 35 E 36 X TP

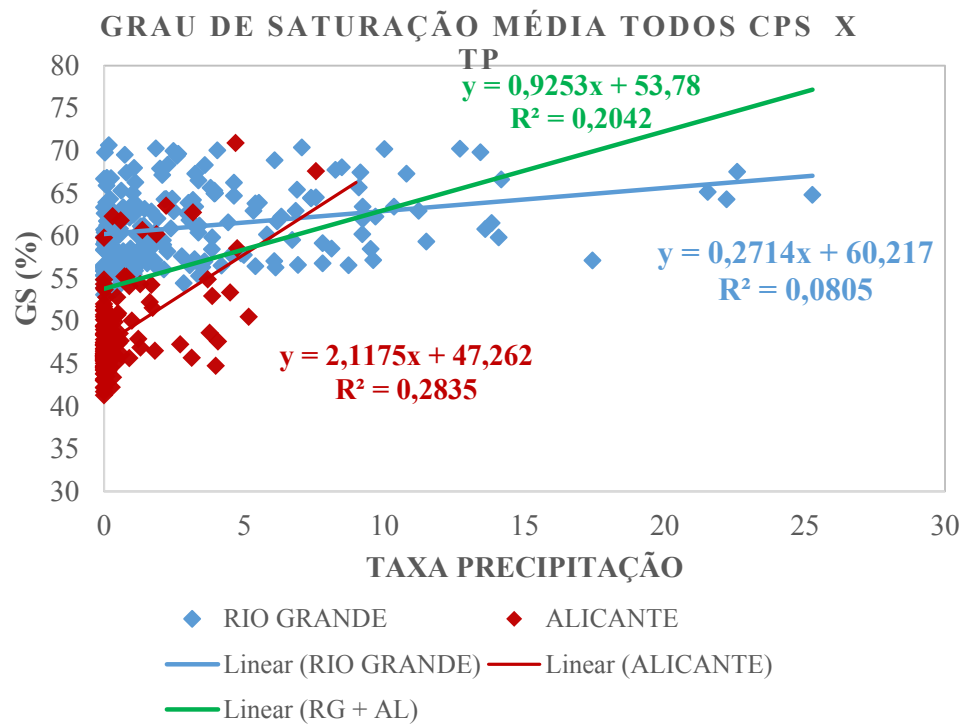


**GRAU DE SATURAÇÃO CP 30, 31, 35 E 36 X
TP**



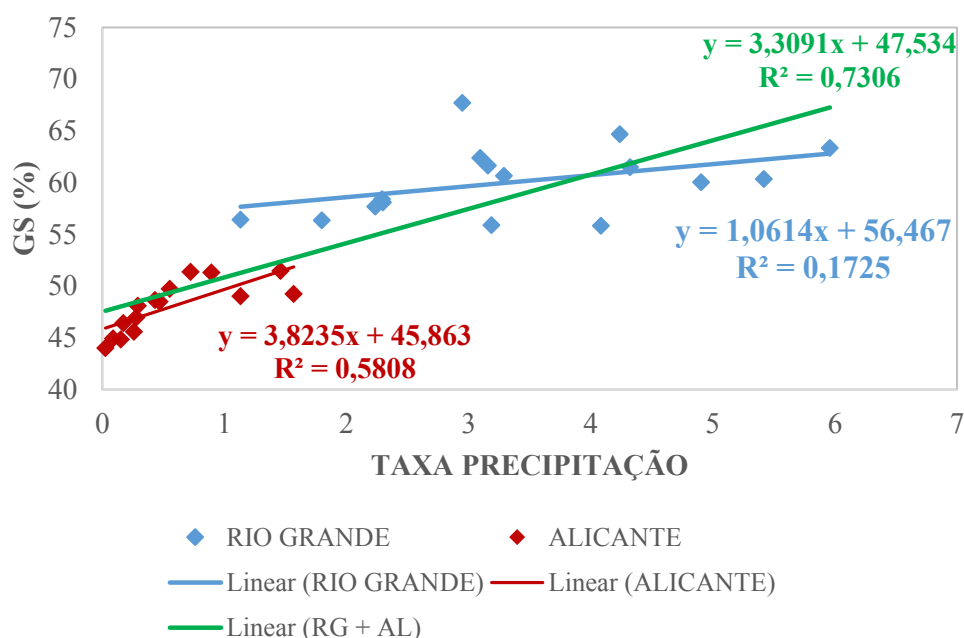
APÊNDICE C1 – Gráficos de dispersão e regressão linear simples, estação de Santa pola, Alicante e estação de Rio Grande para médias semanais de CPs iguais.



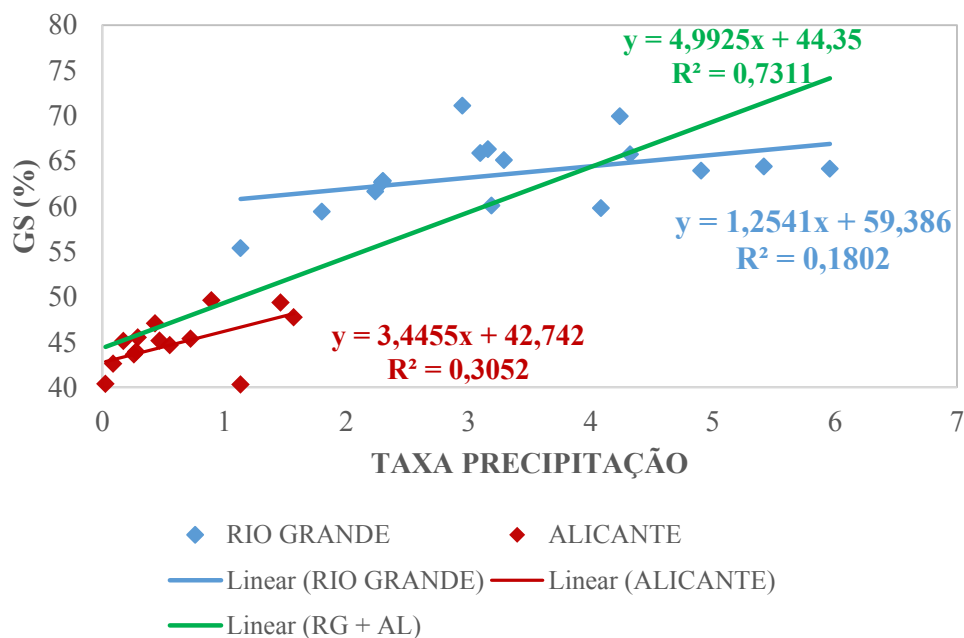


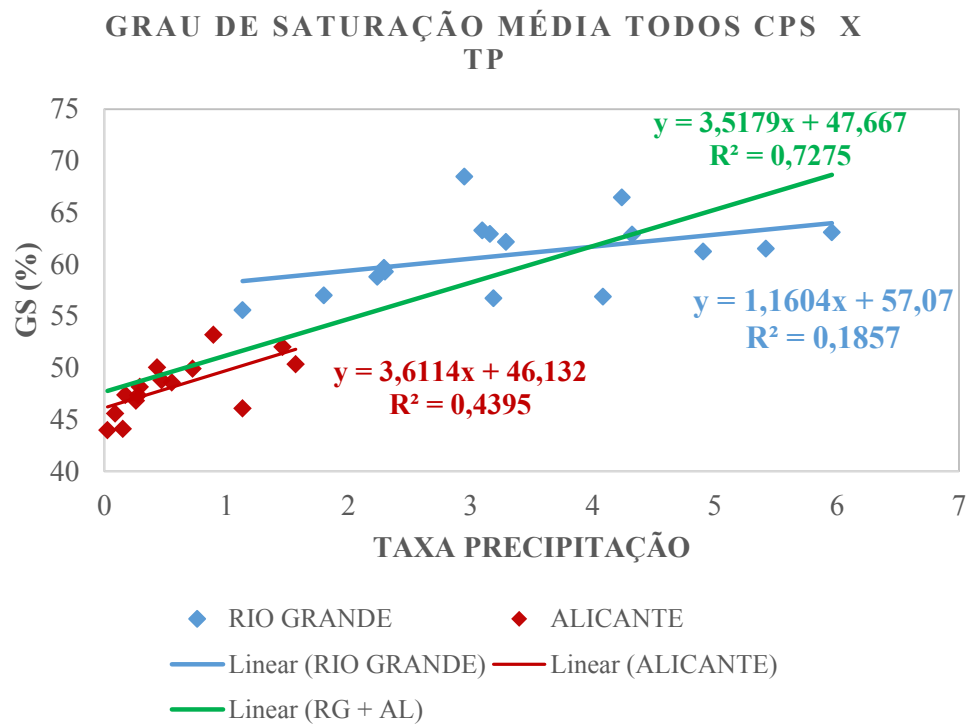
APÊNDICE C2 – Gráficos de dispersão e regressão linear simples, estação de Santa pola, Alicante e estação de Rio Grande para médias sazonais de CPs iguais.

**GRAU DE SATURAÇÃO CPS 3 E 4(RG) E 31 (AL)
X TP**



**GRAU DE SATURAÇÃO CPS 7 E 8(RG) E 35 E 36
(AL) X TP**





APÊNDICE D – Tabelas estatísticas e coeficientes da regressão linear múltipla estação de Rio Grande para médias sazonais das variáveis.

RESUMO DOS RESULTADOS CPs 3 e 4

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,8482
R-Quadrado	0,7195
R-quadrado ajustado	0,6493
Erro padrão	2,0246
Observações	16,0000

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de sig.</i>
Regressão	3,0000	126,152	42,051	10,258	0,0012
Resíduo	12,0000	49,190	4,099		
Total	15,0000	175,342			

	<i>Coeficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inf.</i>	<i>95% sup.</i>
Interseção	87,7061	8,108	10,817	0,000	70,0396	105,373
Temperatura do ar seco	-8,3180	6,415	-1,297	0,219	-22,2942	5,658
Temperatura Máxima	1,3213	2,185	0,605	0,557	-3,4397	6,082
Temperatura Mínima	6,4460	4,561	1,413	0,183	-3,4922	16,384

RESUMO DOS RESULTADOS CPs 5 e 6

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,9128
R-Quadrado	0,8332
R-quadrado ajustado	0,7916
Erro padrão	1,8748
Observações	16,0000

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de sig.</i>
Regressão	3,0000	210,750	70,250	19,987	0,0001
Resíduo	12,0000	42,177	3,515		
Total	15,0000	252,926			

	<i>Coeficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inf.</i>	<i>95% sup.</i>
Interseção	90,5371	5,212	17,370	0,000	79,1803	101,894
Temperatura de ar úmido	-0,0489	1,147	-0,043	0,967	-2,5477	2,450
Temperatura do ar seco	2,1657	1,259	1,720	0,111	-0,5784	4,910
Temperatura Máxima	-2,9536	1,195	-2,472	0,029	-5,5564	-0,351

RESUMO DOS RESULTADOS CPs 7 e 8

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,8888
R-Quadrado	0,7899
R-quadrado ajustado	0,7374
Erro padrão	2,0251
Observações	16,0000

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de sig.</i>
Regressão	3,0000	185,041	61,680	15,040	0,0002
Resíduo	12,0000	49,212	4,101		
Total	15,0000	234,254			

	<i>Coeficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inf.</i>	<i>95% sup.</i>
Interseção	90,9603	5,630	16,155	0,000	78,6928	103,228
Temperatura de ar úmido	-0,9050	1,239	-0,731	0,479	-3,6043	1,794
Temperatura do ar seco	2,3032	1,360	1,693	0,116	-0,6610	5,267
Temperatura Máxima	-2,3255	1,290	-1,802	0,097	-5,1371	0,486

RESUMO DOS RESULTADOS CPs 9 e 10

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,9641
R-Quadrado	0,9295
R-quadrado ajustado	0,9118
Erro padrão	1,0620
Observações	16,0000

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de sig.</i>
Regressão	3,0000	178,364	59,455	52,715	0,0000
Resíduo	12,0000	13,534	1,128		
Total	15,0000	191,898			

	<i>Coeficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inf.</i>	<i>95% sup.</i>
Interseção	86,5454	2,953	29,311	0,000	80,1120	92,979
Temperatura de ar úmido	1,0698	0,650	1,647	0,126	-0,3458	2,485
Temperatura do ar seco	2,5815	0,713	3,618	0,004	1,0270	4,136
Temperatura Máxima	-4,1310	0,677	-6,104	0,000	-5,6054	-2,657

RESUMO DOS RESULTADOS CPs 11 e 12

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,9494
R-Quadrado	0,9014
R-quadrado ajustado	0,8767
Erro padrão	1,2407
Observações	16,0000

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de sig.</i>
Regressão	3,0000	168,863	56,288	36,564	0,0000
Resíduo	12,0000	18,473	1,539		
Total	15,0000	187,336			

	<i>Coeficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inf.</i>	<i>95% sup.</i>
Interseção	84,5957	3,450	24,523	0,000	77,0796	92,112
Temperatura de ar úmido	-0,2025	0,759	-0,267	0,794	-1,8563	1,451
Temperatura do ar seco	2,5878	0,834	3,105	0,009	0,7717	4,404
Temperatura Máxima	-3,1084	0,791	-3,932	0,002	-4,8310	-1,386

RESUMO DOS RESULTADOS CPs 13 e 14

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,7294
R-Quadrado	0,5320
R-quadrado ajustado	0,4150
Erro padrão	1,9896
Observações	16,0000

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de sig.</i>
Regressão	3,0000	54,003	18,001	4,547	0,0238
Resíduo	12,0000	47,502	3,959		
Total	15,0000	101,505			

	<i>Coeficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inf.</i>	<i>95% sup.</i>
Interseção	-876,5104	915,388	-0,958	0,357	-2870,9703	1117,949
Pressão Atmosférica	0,9174	0,893	1,027	0,325	-1,0291	2,864
Temperatura do ar seco	1,1623	1,679	0,692	0,502	-2,4949	4,820
Temperatura Máxima	-1,0149	1,283	-0,791	0,444	-3,8108	1,781

RESUMO DOS RESULTADOS CPs 15 e 16

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,8655
R-Quadrado	0,7491
R-quadrado ajustado	0,6864
Erro padrão	2,3245
Observações	16,0000

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de sig.</i>
Regressão	3,0000	193,623	64,541	11,944	0,0006
Resíduo	12,0000	64,841	5,403		
Total	15,0000	258,464			

	<i>Coeficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inf.</i>	<i>95% sup.</i>
Interseção	89,2086	6,463	13,803	0,000	75,1272	103,290
Temperatura de ar úmido	-1,1559	1,422	-0,813	0,432	-4,2543	1,942
Temperatura do ar seco	2,7338	1,562	1,751	0,106	-0,6687	6,136
Temperatura Máxima	-2,5373	1,481	-1,713	0,112	-5,7645	0,690

RESUMO DOS RESULTADOS CPs 17 e 18

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,8251
R-Quadrado	0,6807
R-quadrado ajustado	0,6009
Erro padrão	2,2258
Observações	16,0000

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de sig.</i>
Regressão	3,0000	126,757	42,252	8,528	0,0026
Resíduo	12,0000	59,453	4,954		
Total	15,0000	186,209			

	<i>Coeficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inf.</i>	<i>95% sup.</i>
Interseção	83,5714	6,189	13,504	0,000	70,0878	97,055
Temperatura de ar úmido	0,5806	1,362	0,426	0,677	-2,3862	3,547
Temperatura do ar seco	0,3911	1,495	0,262	0,798	-2,8669	3,649
Temperatura Máxima	-1,5941	1,418	-1,124	0,283	-4,6844	1,496

RESUMO DOS RESULTADOS CPs 19 e 20

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,7926
R-Quadrado	0,6282
R-quadrado ajustado	0,5352
Erro padrão	2,5045
Observações	16,0000

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de sig.</i>
Regressão	3,0000	127,174	42,391	6,758	0,0064
Resíduo	12,0000	75,273	6,273		
Total	15,0000	202,446			

	<i>Coeficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inf.</i>	<i>95% sup.</i>
Interseção	-1391,4990	1152,304	-1,208	0,250	-3902,1534	1119,155
Pressão Atmosférica	1,4295	1,125	1,271	0,228	-1,0207	3,880
Temperatura do ar seco	0,9826	2,113	0,465	0,650	-3,6212	5,586
Temperatura Máxima	-0,7824	1,615	-0,484	0,637	-4,3020	2,737

RESUMO DOS RESULTADOS CPs 21 e 22

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,8125
R-Quadrado	0,6601
R-quadrado ajustado	0,5752
Erro padrão	2,9325
Observações	16,0000

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de sig.</i>
Regressão	3,0000	200,441	66,814	7,769	0,0038
Resíduo	12,0000	103,195	8,600		
Total	15,0000	303,636			

	<i>Coeficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inf.</i>	<i>95% sup.</i>
Interseção	1755,4722	1598,736	1,098	0,294	-1727,8739	5238,818
Umidade Relativa	0,7046	0,240	2,937	0,012	0,1819	1,227
Pressão Atmosférica	-1,7039	1,571	-1,085	0,299	-5,1268	1,719
Temperatura do ar seco	-1,2579	0,927	-1,357	0,200	-3,2780	0,762

RESUMO DOS RESULTADOS CPs 23 e 24

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,6655
R-Quadrado	0,4429
R-quadrado ajustado	0,3036
Erro padrão	1,6501
Observações	16,0000

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de sig.</i>
Regressão	3,0000	25,971	8,657	3,180	0,0633
Resíduo	12,0000	32,673	2,723		
Total	15,0000	58,645			

	<i>Coeficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inf.</i>	<i>95% sup.</i>
Interseção	58,2227	6,608	8,811	0,000	43,8245	72,621
Temperatura do ar seco	3,2087	5,228	0,614	0,551	-8,1818	14,599
Temperatura Máxima	-2,2942	1,781	-1,288	0,222	-6,1743	1,586
Temperatura Mínima	-1,1382	3,717	-0,306	0,765	-9,2377	6,961

RESUMO DOS RESULTADOS CPs 25 e 26

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,9127
R-Quadrado	0,8330
R-quadrado ajustado	0,7913
Erro padrão	1,4042
Observações	16,0000

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de sig.</i>
Regressão	3,0000	118,054	39,351	19,956	0,0001
Resíduo	12,0000	23,663	1,972		
Total	15,0000	141,717			

	<i>Coeficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inf.</i>	<i>95% sup.</i>
Interseção	87,0284	3,904	22,291	0,000	78,5218	95,535
Temperatura de ar úmido	1,6586	0,859	1,931	0,077	-0,2131	3,530
Temperatura do ar seco	2,1648	0,943	2,295	0,041	0,1094	4,220
Temperatura Máxima	-4,0231	0,895	-4,496	0,001	-5,9727	-2,073

RESUMO DOS RESULTADOS CPs 27 e 28

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,8624
R-Quadrado	0,7438
R-quadrado ajustado	0,6797
Erro padrão	2,4056
Observações	16,0000

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de sig.</i>
Regressão	3,0000	201,567	67,189	11,610	0,0007
Resíduo	12,0000	69,443	5,787		
Total	15,0000	271,010			

	<i>Coeficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inf.</i>	<i>95% sup.</i>
Interseção	86,1918	6,688	12,887	0,000	71,6193	100,764
Temperatura de ar úmido	2,0951	1,472	1,424	0,180	-1,1114	5,301
Temperatura do ar seco	1,3419	1,616	0,830	0,423	-2,1792	4,863
Temperatura Máxima	-3,8621	1,533	-2,520	0,027	-7,2019	-0,522

RESUMO DOS RESULTADOS CPs 29 e 30

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,7194
R-Quadrado	0,5175
R-quadrado ajustado	0,3969
Erro padrão	1,2504
Observações	16,0000

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de sig.</i>
Regressão	3,0000	20,124	6,708	4,290	0,0283
Resíduo	12,0000	18,762	1,563		
Total	15,0000	38,886			

	<i>Coeficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inf.</i>	<i>95% sup.</i>
Interseção	58,9879	4,994	11,813	0,000	48,1078	69,868
Visibilidade	-0,6549	0,783	-0,836	0,419	-2,3611	1,051
Temperatura do ar seco	2,0927	0,797	2,625	0,022	0,3557	3,830
Temperatura Máxima	-2,0868	0,772	-2,705	0,019	-3,7680	-0,406

RESUMO DOS RESULTADOS CPs 1 a 18

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,9055
R-Quadrado	0,8199
R-quadrado ajustado	0,7749
Erro padrão	1,6397
Observações	16,0000

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de sig.</i>
Regressão	3,0000	146,891	48,964	18,211	0,0001
Resíduo	12,0000	32,264	2,689		
Total	15,0000	179,155			

	<i>Coeficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inf.</i>	<i>95% sup.</i>
Interseção	83,6165	4,559	18,341	0,000	73,6835	93,549
Temperatura de ar úmido	0,5167	1,003	0,515	0,616	-1,6688	2,702
Temperatura do ar seco	1,2874	1,102	1,169	0,265	-1,1126	3,687
Temperatura Máxima	-2,4324	1,045	-2,328	0,038	-4,7089	-0,156

RESUMO DOS RESULTADOS CPs 1 a 28

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,9078
R-Quadrado	0,8241
R-quadrado ajustado	0,7801
Erro padrão	1,5324
Observações	16,0000

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de sig.</i>
Regressão	3,0000	132,011	44,004	18,739	0,0001
Resíduo	12,0000	28,178	2,348		
Total	15,0000	160,189			

	<i>Coeficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inf.</i>	<i>95% sup.</i>
Interseção	81,2694	4,260	19,075	0,000	71,9866	90,552
Temperatura de ar úmido	1,3410	0,937	1,431	0,178	-0,7015	3,384
Temperatura do ar seco	0,7468	1,029	0,725	0,482	-1,4962	2,990
Temperatura Máxima	-2,5397	0,976	-2,601	0,023	-4,6672	-0,412

APÊNDICE E – Tabelas estatísticas e coeficientes da regressão linear múltipla estação de Santa Pola, Alicante para médias sazonais das variáveis.

RESUMO DOS RESULTADOS CP 31

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,8463
R-Quadrado	0,7162
R-quadrado ajustado	0,6389
Erro padrão	1,4813
Observações	15,0000

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de sig.</i>
Regressão	3,0000	60,924	20,308	9,255	0,0024
Resíduo	11,0000	24,137	2,194		
Total	14,0000	85,060			

	<i>Coeficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inf.</i>	<i>95% sup.</i>
Interseção	60,5261	14,291	4,235	0,001	29,0710	91,981
Temperatura Máxima	-1,7397	2,277	-0,764	0,461	-6,7522	3,273
Temperatura Média	1,4472	2,146	0,674	0,514	-3,2755	6,170
Taxa de Precipitação	2,3948	1,336	1,792	0,101	-0,5468	5,336

RESUMO DOS RESULTADOS CPs 35 e 36

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,7218
R-Quadrado	0,5210
R-quadrado ajustado	0,3903
Erro padrão	2,3058
Observações	15,0000

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de sig.</i>
Regressão	3,0000	63,603	21,201	3,988	0,0379
Resíduo	11,0000	58,486	5,317		
Total	14,0000	122,089			

	<i>Coeficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inf.</i>	<i>95% sup.</i>
Interseção	32,3425	22,246	1,454	0,174	-16,6217	81,307

Temperatura Máxima	2,2144	3,545	0,625	0,545	-5,5882	10,017
Temperatura Média	-2,2843	3,340	-0,684	0,508	-9,6358	5,067
Taxa de Precipitação	4,1746	2,080	2,007	0,070	-0,4044	8,753

RESUMO DOS RESULTADOS MÉDIA DOS CPs

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,7583
R-Quadrado	0,5751
R-quadrado ajustado	0,4592
Erro padrão	1,9727
Observações	15,0000

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de sig.</i>
Regressão	3,0000	57,928	19,309	4,962	0,0204
Resíduo	11,0000	42,807	3,892		
Total	14,0000	100,735			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inf.</i>	<i>95% sup.</i>
Interseção	46,9474	19,032	2,467	0,031	5,0573	88,837
Temperatura Máxima	0,5708	3,033	0,188	0,854	-6,1046	7,246
Temperatura Média	-0,7549	2,858	-0,264	0,797	-7,0443	5,534
Taxa de Precipitação	3,1438	1,780	1,766	0,105	-0,7736	7,061

APÊNDICE F – Tabelas estatísticas e coeficientes da regressão linear múltipla para dados agrupados da estação de Rio Grande e da estação de Santa Pola, Alicante para médias sazonais das variáveis.

RESUMO DOS RESULTADOS CP 3 E 4 RG E 31 AL

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,8698
R-Quadrado	0,7566
R-quadrado ajustado	0,7295
Erro padrão	3,5315
Observações	31,0000

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de sig.</i>
Regressão	3,0000	1046,520	348,840	27,971	0,0000
Resíduo	27,0000	336,732	12,472		
Total	30,0000	1383,252			

	<i>Coeficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inf.</i>	<i>95% sup.</i>
Interseção	-212,3880	180,446	-1,177	0,249	-582,6331	157,857
Taxa de Precipitação	2,9384	0,453	6,490	0,000	2,0094	3,867
Horas de Insolação	0,0353	0,321	0,110	0,913	-0,6239	0,694
Pressão Atmosférica média	0,2573	0,177	1,453	0,158	-0,1061	0,621

RESUMO DOS RESULTADOS CP 7 E 8 RG e 35 E 36 AL

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,8673
R-Quadrado	0,7521
R-quadrado ajustado	0,7246
Erro padrão	5,3746
Observações	31,0000

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de sig.</i>
Regressão	3,0000	2366,740	788,913	27,311	0,0000
Resíduo	27,0000	779,934	28,886		
Total	30,0000	3146,673			

	<i>Coeficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inf.</i>	<i>95% sup.</i>
Interseção	-370,6099	274,621	-1,350	0,188	-934,0866	192,867

Taxa de Precipitação	4,7810	0,689	6,938	0,000	3,3672	6,195
Horas de Insolação	0,4678	0,489	0,957	0,347	-0,5354	1,471
Pressão Atmosférica média	0,4068	0,270	1,510	0,143	-0,1461	0,960

RESUMO DOS RESULTADOS MÉDIA DOS CPs

<i>Estatística de regressão</i>	
R múltiplo	0,8602
R-Quadrado	0,7400
R-quadrado ajustado	0,7111
Erro padrão	3,8608
Observações	31,0000

	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de sig.</i>
Regressão	3,0000	1145,219	381,740	25,610	0,0000
Resíduo	27,0000	402,456	14,906		
Total	30,0000	1547,675			

	<i>Coeficientes</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>Stat t</i>	<i>valor-P</i>	<i>95% inf.</i>	<i>95% sup.</i>
Interseção	-201,1000	197,272	-1,019	0,317	-605,8681	203,668
Taxa de Precipitação	3,2475	0,495	6,561	0,000	2,2319	4,263
Horas de Insolação	0,1628	0,351	0,463	0,647	-0,5578	0,883
Pressão Atmosférica média	0,2451	0,194	1,266	0,216	-0,1521	0,642