

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COECI - COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

ISABELLE CAJUEIRO DE OLIVEIRA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA SIMULAÇÃO DE CORROSÃO POR PITES NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ARMADURAS SUBMETIDAS À TRAÇÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO-PR

2018

ISABELLE CAJUEIRO DE OLIVEIRA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA SIMULAÇÃO DE CORROSÃO POR PITES NAS
PROPRIEDADES MECÂNICAS DE ARMADURAS SUBMETIDAS À TRAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel, do curso de Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Tino Balestra

TOLEDO-PR

2018



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Toledo
Coordenação do Curso de Engenharia Civil



TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso de Nº 159

Estudo Da Influência Da Simulação De Corrosão Por Pites Nas Propriedades Mecânicas De Armaduras Submetidas À Tração

por

Isabelle Cajueiro de Oliveira

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 16:40 h do dia **05 de novembro de 2018** como requisito parcial para a obtenção do título **Bacharel em Engenharia Civil**. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado **APROVADO**.

Prof^a Lúcia Bressiani
(UTFPR – TD)

Prof^o Rodnny Jesus Mendoza Fakhye
(UTFPR – TD)

Prof^o Carlos Eduardo Tino Balestra
(UTFPR – TD)
Orientador

Visto da Coordenação
Prof. Fulvio Natércio Feiber
Coordenador da COECI

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

*Dedico este trabalho à Deus e a minha irmã,
Gabrielle, meu anjo mais velho e minha
melhor amiga.*

AGRADECIMENTOS

Dentre todas as tarefas durante a faculdade, esta é, sem dúvidas, a mais difícil e a mais gratificante. Peço desculpas porque dificilmente conseguirei expressar toda minha gratidão com palavras.

Eu agradeço primeiro a Deus, por ter me dado força e coragem para continuar essa caminhada acadêmica, por ter colocado na minha vida pessoas que acreditaram em mim quando eu deixei de acreditar, quando achei que não iria aguentar. À Nossa Senhora de Fátima, minha Santa protetora, por todas as vezes que supliquei à ela e recebi seu amor.

Aos meus pais José Pedro e Regina Celis pelo amor incondicional, paciência, carinho e compreensão, por terem sido minha rocha durante todos esses anos. À minha irmã Gabrielle, o meu exemplo de ser humano e profissional, meu espelho e minha vida.

Aos meus amigos que caminharam comigo, aos que foram minha família em uma cidade até então nova pra mim, obrigada a todos pelo apoio e carinho.

Ao meu orientador Professor Dr. Carlos Eduardo Tino Balestra, pela paciência, incentivo, orientação e principalmente pelo exemplo de professor e ser humano. Minha eterna admiração por seu trabalho e vocação de educador, muito obrigada.

Aos membros avaliadores da banca, Professora Lúcia e Professor Rodnny, por terem sido peças primordiais na minha graduação, por ministrarem aulas onde conseguimos ver a paixão pela profissão de professor, obrigada por serem inspiração para todos os alunos da UTFPR.

Aos laboratoristas Marcos e Wilson, por toda ajuda e disponibilidade tornando este trabalho possível.

A bibliotecária responsável Carla Rech, pela ajuda e orientação na estruturação textual desta pesquisa. Obrigada pela disponibilidade e esforço para auxiliar na produção acadêmica dos alunos da UTFPR.

Enfim, agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente na minha formação como Engenheira e ser humano. Muito obrigada a todos, que Deus sempre os abençoe.

“Isto é uma ordem: sê firme e corajoso. Não te atemorizes, não tenhas medo, porque o Senhor esta contigo em qualquer parte para onde fores.”
Josué 1:9

“O conhecimento serve para encantar as pessoas, não para humilha-las.”
Mário Sérgio Cortela

RESUMO

OLIVEIRA, Isabelle C. de. **Estudo Da Influência Da Simulação De Corrosão Por Pites Nas Propriedades Mecânicas De Armaduras Submetidas À Tração**. 2018. 79 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2018.

A corrosão das armaduras destinadas ao uso de concreto armado é apontada como a principal causa de degradação de estruturas. Deste modo, o presente estudo, visou estudar a influência da corrosão por pites, simulada, nas propriedades mecânicas de barras quando comparadas com o grau de corrosão e excentricidade gerada pelo pite na seção transversal. Foram feitos ensaios de tração nas barras de aço de diâmetros nominal 10, 12,5 e 16 mm, com e sem a simulação da corrosão por pites. Os resultados obtidos indicaram que o grau de corrosão apresenta menor correlação com as propriedades mecânicas (tensão de escoamento, tensão última e alongamento), quando comparado com a correlação apresentada pela excentricidade e, além disso, que os maiores impactos da corrosão foram notados no alongamento final das barras com decréscimos significativos.

Palavras chaves: Corrosão. Corrosão por pites. Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Isabelle C. de. **Study of pitting corrosion simulation's influence on mechanical properties of reinforcement under tension**. 2018. 79 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Toledo, 2018.

The corrosion of reinforcement reinforced concrete is considered the main cause of structural degradation. The present essay is aimed to study the influence of simulated pitting corrosion on the mechanical properties of bars when compared with the degree of corrosion and eccentricity generated by the pite in the cross section of the bars. Tensile tests were made on steel bars with nominal diameters of 10, 12.5 and 16 mm, with and without pitting corrosion simulation. The results indicate that the degree of corrosion presents a lower correlation with the mechanical properties (yield strength, ultimate strength and final elongation), when compared to the correlation presented by the eccentricity and, in addition, that the most severe impacts of the corrosion were noticed in the final elongation of the bars, with significant decrements.

Keywords: Corrosion. Pitting corrosion. Mechanical proprieties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação das perdas pela corrosão.....	16
Figura 2 - Tipos de corrosão nas armaduras de concreto armado	18
Figura 3 - Estrutura em avançado estágio de deterioração por ataque de cloretos. Pier da Ilha situado na Ilhabela-SP	19
Figura 4 - Pilha eletroquímica de corrosão no concreto armado	21
Figura 5 - Esquema de penetração de cloretos através da camada de cobrimento	22
Figura 6 - Armadura com corrosão por pites. Imagem aumentada em 10x.....	22
Figura 7 - Micrografia mostrando a presença de pites.	23
Figura 8 - Esquema do mecanismo de corrosão da armadura no perímetro do vazio de concreto contaminado com íons cloreto	24
Figura 9 - Tipos de pites.....	24
Figura 10 - Esforços produzidos que levam à fissuração e ao destacamento do concreto, devido à corrosão das armaduras	25
Figura 11 - Equipamento para o ensaio de tração.....	28
Figura 12 - Esquemática dos comprimentos da barra	30
Figura 13 - Comportamento de uma barra de aço no equipamento de tração	31
Figura 14 - Morfologias típicas usadas para simular a corrosão pites.....	33
Figura 15 - Representação das dimensões dos corpos de prova. Medidas em milímetros.....	34
Figura 16 - Corpos de Prova devidamente cortados.	37
Figura 17 - Dimensão dos corpos de prova.....	39
Figura 18 - Comprimento de corte da barra original	40
Figura 19 - Furadeira de bancada utilizada para simular os pites	40
Figura 20 - A: Marcação do meio da barra para posterior furação. B: Pite simulado no corpo de prova A2-5.....	41
Figura 21 - Esquemática dos corpos de prova	42
Figura 22 - Onde B1 representa as barras submetidas à situação 1, B2 as barras submetidas à situação 2 e B3 as barras submetidas à situação 3.	43
Figura 23 - Uso do comando massprop na seção transversal do corpo de prova C2-3	44
Figura 24 - Ensaio do Tração. A - sem a utilização do extensômetro. B - com a utilização do extensômetro.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estudos históricos do custo da corrosão em diferentes nações	15
Tabela 2 - Características das barras	27
Tabela 3 - Propriedades mecânicas de barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado	27
Tabela 4 - Corpos de prova de seção transversal circular	29
Tabela 5 - Representação das situações simuladas.....	42
Tabela 6 - Representação das situações simuladas.....	43
Tabela 7 - Propriedades das amostras sem corrosão	48
Tabela 8 - Tensão de escoamento	49
Tabela 9 - Redução da tensão de escoamento de acordo com a profundidade do pite	50
Tabela 10 - Tensão Máxima	51
Tabela 11 - Redução da tensão última	52
Tabela 12 - Alongamento Final	52
Tabela 13 - Redução do Alongamento	53
Tabela 14 - Redução da tensão de escoamento	54
Tabela 15 - Redução média da tensão última	55
Tabela 16 - Redução do Alongamento	57
Tabela 17 - Redução média da tensão de escoamento.....	59
Tabela 18 - Redução média da tensão última.....	60
Tabela 19 - Redução média do alongamento	62
Tabela 20 - Coeficiente de Determinação para as correlações	63

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Tensão de escoamento vs Grau de corrosão	54
Gráfico 2 - Tensão de escoamento vs Grau de corrosão, para todos os diâmetros.....	55
Gráfico 3 - Tensão Última vs Grau de corrosão	56
Gráfico 4 - Tensão última vs Grau de corrosão para todos os diâmetros	56
Gráfico 5 - Alongamento vs Grau de corrosão	57
Gráfico 6 - Alongamento vs Grau de corrosão para todos os diâmetros	58
Gráfico 7 - Excentricidade vs Tensão de escoamento	59
Gráfico 8 - Excentricidade vs Tensão de escoamento para todos os diâmetros.....	60
Gráfico 9 - Excentricidade vs Tensão Última.....	61
Gráfico 10 - Excentricidade vs Tensão Última para todos os diâmetros	61
Gráfico 11 - Excentricidade vs Alongamento.....	62
Gráfico 12 - Excentricidade vs Alongamento para todos os diâmetros	63
Gráfico 13 - Tensão vs Tempo para o diâmetro de 10 mm	64
Gráfico 14 - Tensão vs Tempo para o diâmetro de 12,5 mm	64
Gráfico 15 - Tensão vs Tempo para o diâmetro de 16 mm	65

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	Instituto Americano de Concreto
ASTM	Sociedade Americana de Testes e Materiais
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
IBGE	Instituto brasileiro de geografia e estatística
ISO	Organização Internacional de Normalização
JSCE	Sociedade Japonesa de Engenheiros Civis
NBR	Norma Brasileira
PIB	Produto interno Bruto

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 JUSTIFICATIVA	16
1.2 OBJETIVOS	16
1.2.1 Objetivo Geral	16
1.2.2 Objetivos Específicos	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 CORROSÃO	18
2.3 ENSAIO DE TRAÇÃO EM BARRAS	28
2.4 ESTUDOS ENCONTRADOS NA LITERATURA	31
2.4.1 Estudos Baseados a Partir De Ensaio Acelerados	32
2.4.2 Estudos Baseados em Condições Naturais	33
3 MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS	37
3.2 DELIMITAÇÃO DO TAMANHO DOS CORPOS DE PROVA	38
3.3 METODOLOGIA DE EXECUÇÃO DOS PITES SIMULADOS E SITUAÇÕES DE ENSAIOS	40
3.4 DETERMINAÇÃO DO GRAU DE CORROSÃO DOS CORPOS DE PROVA	43
3.5 DETERMINAÇÃO DA EXCENTRICIDADE GERADA PELO PITE SIMULADO	44
3.7 CÁLCULO DAS PROPRIEDADES	46
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1 ANÁLISE DE BARRAS ISENTAS DE CORROSÃO UTILIZADAS PARA REFERÊNCIA	47
4.2 ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS EM BARRAS SOB CORROSÃO SIMULADA	48
4.2.1 Tensão de Escoamento (f_y)	49
4.2.2 Tensão Máxima (f_{st})	50
4.2.3 Alongamento Final (A)	52
4.3 ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS VS GRAU DE CORROSÃO	53
4.3.1 Tensão de escoamento (f_y)	53
4.4.2 Tensão última (f_{st})	55
4.4.3 Alongamento (A)	56

4.4 ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS VS MUDANÇA DE EXCENTRICIDADE.....	58
4.4.1 Tensão de escoamento (f_y).....	58
4.3.2 Tensão última (f_{st}).....	60
4.3.3 Alongamento Final	61
4.5 COMPARAÇÃO DOS GRÁFICOS DE TENSÃO VS TEMPO	63
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	66
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
APÊNDICE A1	72
APÊNDICE A2	73
APÊNDICE A3	74
APÊNDICE B1	75
APÊNDICE B2	76
APÊNDICE B3	77
APÊNDICE C1	78
APÊNDICE C2	79
APÊNDICE C3	80

1 INTRODUÇÃO

O concreto caracteriza-se como sendo um material que apresenta uma resistência à compressão superior a sua resistência à tração. Neste sentido, diversos autores como Roberge (1999), Alonso (2002), Cascudo (2005) e Callister (2008) ressaltam, em termos de projeto, que a resistência à tração do concreto deve ser desprezada no dimensionamento de estruturas, uma vez que esta corresponde, de maneira geral, a valores da ordem de 10% de sua resistência à compressão. Assim sendo, é imperiosa a necessidade de associar ao concreto um material que o provenha de resistência à tração.

Nesse sentido, barras de aço, conhecidas como armaduras, são os elementos usados para resistir à tração. Com esse material composto (concreto e armadura/barras de aço), surge então o chamado “concreto armado”, onde a armadura resiste aos esforços de tração e o concreto absorve as tensões de compressão. (BASTOS, 2006)

Para Bastos (2006), o conceito de concreto armado ainda envolve a aderência entre o concreto e a armadura, a qual é essencial e deve de maneira obrigatória, estar presente. Pode-se definir aderência como o mecanismo de transferência de tensões que existe na interface entre a armadura e o concreto que a envolve. A aderência assegura a igualdade de deformações específicas da armadura e do concreto que as envolve, quando sob a ação de cargas. O seu comportamento tem importância decisiva com relação à capacidade de resistir ao carregamento das estruturas de concreto armado (REYES, 2009).

Juntamente com a melhoria que o aço trouxe ao concreto, ele também acabou trazendo algumas patologias. Diversos pesquisadores, como Helene (1993), Apostolopoulos et al.(2013), Balestra (2013) e Balestra et al. (2016), apontam a corrosão como um dos maiores problemas na durabilidade e segurança das estruturas de concreto armado e protendido. Cairns et al. (2005) afirmam que a degradação dessas estruturas acarreta em grandes gastos econômicos com manutenção e reabilitação das mesmas. Ueda e Takewaka (2007) apresentam que os custos de manutenção e reparo de estruturas, em alguns países europeus, chegam a apresentar 50% do que os países investem na construção civil.

Entre os estudos disponíveis, a corrosão se mostrou responsável, ao longo dos anos, por gastos da ordem de 0,77 a 5,2% do PIB de diversos países (Tabela

1). Um dos mais recentes estudos avaliou os custos da corrosão na economia norte-americana em mais de 230 setores, comprovando mais uma vez que cerca de 3% do PIB tem sido gasto com a corrosão (KOCH et al, 2002).

Tabela 1 - Estudos históricos do custo da corrosão em diferentes nações

Autor	Ano	País	PIB (%)	Custo
Uhlig	1949	Estados Unidos	2.1	\$5.5 bilhões
Worner	1955	Austrália	-	\$240 milhões
Rajagopalan	1960	Índia	-	\$320 bilhões
Tradgaidh	1964	Suécia	-	-
Linderborg	1965	Finlândia	-	\$54 bilhões
Behrens	1967	Alemanha Ocidental	3.0	\$6 bilhões
Hoar	1970	Reino Unido	3.5	£1365 bilhões
Potter	1972	Austrália	3.5	\$900 milhões
Revie, Uhlig	1973	Austrália	1.5	\$470 milhões
CCLJ ¹	1975	Japão	1.8	\$9,2 bilhões
Battelle	1975	Estados Unidos	4.2	\$70 bilhões
Zhu	1980	China	-	-
Cherry, Skerry	1982	Austrália	1.5	\$2 bilhões
Al-Kharafi et al	1987	Kuwait	5.2	\$1 bilhão
Corrosion-club	1996	Suíça	3 à 5	-
JSCE	1997	Japão (método de Uhlig)	0.77	¥3938 bilhões (Yen)
JSCE	1997	Japão (método de Hoar)	1.02	¥5258 bilhões (Yen)
Corrosion-club	2001	Austrália	2.0	-
Payer, Koch	1998	Estados Unidos	3.1	\$276 bilhões
Sastri et al	2003	Canadá	-	\$46,4 bilhões

¹ Committee on Corrosion Loss in Japan

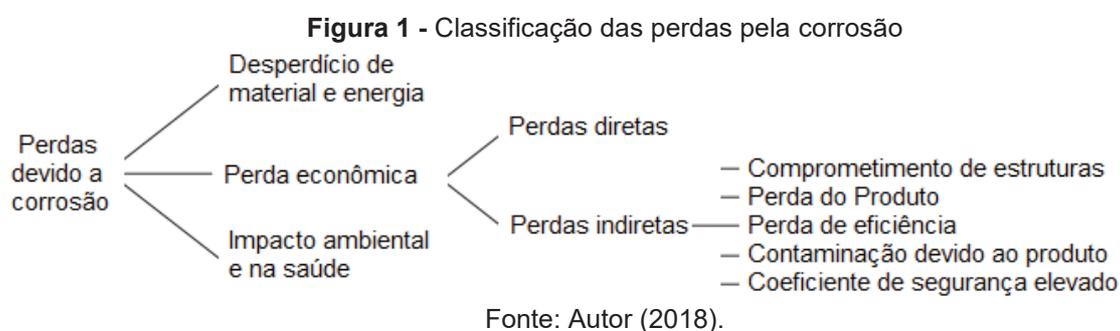
Fonte: adaptado de BIEZMA, CRISTÓBAL, 2005

Desta forma, o presente trabalho visa contribuir através do estudo dos efeitos da corrosão sobre as propriedades mecânicas de armaduras através da simulação da corrosão por pites em laboratório.

1.1 JUSTIFICATIVA

A literatura sobre durabilidade das estruturas de concreto, frequentemente aponta a corrosão da armadura devido à ação dos íons cloreto como um dos mais sérios problemas que sofre esse material (HELENE, 1993).

A corrosão afeta a sociedade tanto economicamente, quanto socialmente. Economicamente a partir da necessidade de reabilitar estruturas, e socialmente devido ao impacto nos recursos naturais e na segurança da população. A Figura 1 deixa explícita as consequências econômicas devido às perdas indiretas da corrosão na construção civil.



O número de pesquisas que tratam sobre a corrosão ainda é pequeno quando comparado ao tamanho de sua problemática. Para minimizar estes impactos são necessários maiores estudos e investimentos em pesquisas na área, para que o comportamento de estruturas degradadas seja mais bem entendido e também para que medidas preventivas possam ser tomadas. Por conta disso, realizar um estudo através da simulação da corrosão por pites permite controlar as variáveis geométricas dos mesmos permitindo avaliar qualitativamente seus efeitos sobre as propriedades mecânicas das armaduras.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do presente estudo é avaliar a influência da corrosão nas propriedades mecânicas de armaduras, simulando a ocorrência de corrosão por pites em barras de aço.

1.2.2 Objetivos Específicos

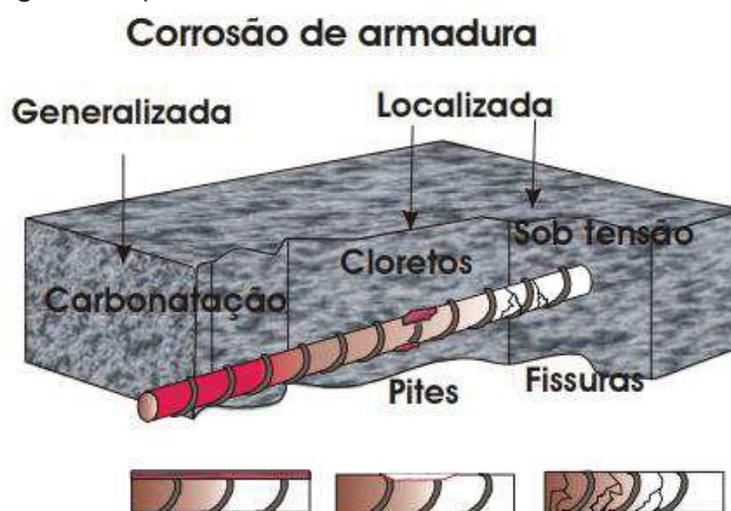
- Simular a corrosão por pites através de furos.
- Comparar as propriedades mecânicas dos corpos de prova de acordo com as variações de profundidade dos pites simulados nos corpos de prova.
- Avaliar as variações em termos de resistência ao escoamento (f_{st}), limite de resistência (f_{st}) e alongamento final (A) de barras com diferentes diâmetros e graus de corrosão simulados.
- Verificar a influência da mudança da excentricidade (e) da seção transversal das armaduras causada pela corrosão (perda de massa) devido aos pites nas propriedades mecânicas das armaduras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CORROSÃO

Silva (2010) define que a corrosão das armaduras é um processo natural no qual o aço tende a retornar à forma de óxidos de ferro (principais constituintes do minério de ferro). No concreto armado a corrosão é estimulada pela redução do pH do concreto, através da ação do dióxido de carbono em um processo conhecido por carbonatação, ou pela presença de cloretos, como por exemplo, os cloretos presentes na água do mar que se depositam sobre a superfície das estruturas de concreto em regiões costeiras. Estes cloretos penetram a camada de cobrimento e criam condições para desencadear o processo corrosivo das barras, em um processo denominado corrosão por pites, que são pontos bem definidos na superfície das barras que vão aprofundando-se a medida que o processo corrosivo evolui (Cascudo, 2005).

Figura 2 - Tipos de corrosão nas armaduras de concreto armado



Fonte: Cascudo, 1997. (apud Polito, 2006).

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, IBGE (2007) a costa brasileira tem cerca de 7363 km onde 283 municípios localizam-se na costa litorânea. Destes 283 municípios 2/3 da população estão distribuídos em centros urbanos, havendo uma significativa infraestrutura e, concomitantemente a isso, há uma grande quantidade de estruturas de concreto armado presentes na costa, como por exemplo, píers, pontes, edifícios entre outras. Neste ponto, sabe-se, em termos

de durabilidade e vida útil de estruturas de concreto o ambiente marinho é mais agressivo, uma vez que, segundo Mehta e Monteiro (2008), a estrutura é sujeita a ataques simultâneos físicos (colisão das ondas do mar contra as estruturas de concreto) e químicos (espécies químicas presentes na água do mar podem levar à degradação do concreto e/ou das armaduras). Neste ponto, a grande quantidade de cloretos presente tanto na água do mar, quanto na atmosfera marinha é responsável por promover a corrosão das armaduras em estruturas de concreto armado.

Angst et al, (2009) constata que a penetração de cloretos no concreto endurecido pode ocorrer por difusão (diferença de potencial químico), absorção capilar ou ainda pela combinação desses dois mecanismos. No "Guía para la Durabilidad del Hormigón", relatado pelo comitê ACI 201 (2001), em regiões de clima tropical - clima predominante no Brasil - o concreto quando exposto à água do mar, está suscetível à mecanismos de difusão e absorção capilar, podendo provocar graves problemas em estruturas de concreto armado por conta da corrosão das barras em apenas alguns anos.

Segundo Cascudo (2005), a corrosão nas armaduras é um processo que evolui no decorrer do tempo, desta forma, estruturas com esta patologia, podem ter seu uso comprometido, e até mesmo serem levadas ao colapso dependendo do seu grau de degradação, gerando gastos e impactos na segurança. As Figuras 3a e 3b apresentam um exemplo de estruturas corroídas com riscos à segurança estrutural.

Figura 3 - Estrutura em avançado estágio de deterioração por ataque de cloretos. Pier da Ilha situado na Ilhabela-SP



Fonte: Técnicas Especiais De Engenharia LTDA (2015).

A corrosão das armaduras por íons cloreto presentes em ambiente marinho é um processo eletroquímico que tem como consequência a degradação do aço, causando a perda de sua funcionalidade. Segundo Cascudo (2005), o processo de

corrosão eletroquímica consiste na formação de pilhas eletroquímicas no interior do concreto. Essas pilhas são caracterizadas por existir uma área anódica, onde ocorre a reação de oxidação e têm-se a perda de massa/seção, e pela presença de uma área catódica, onde se dá a reação de redução do oxigênio. De maneira simplificada tem-se que:

Nas áreas anódicas ocorre a oxidação, ou seja, as reações de dissolução do ferro.



Nas áreas catódicas ocorrem as reações de redução do oxigênio:

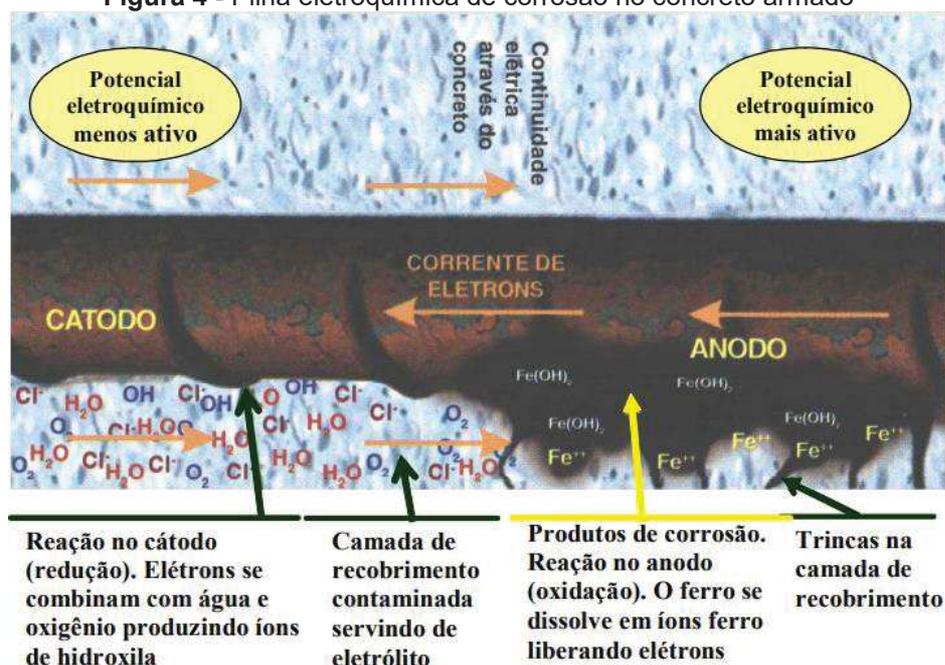


Ambas as reações acontecem de maneira simultânea e dependem uma da outra para ocorrer. Então os íons Fe^{2+} migram para o cátodo pelo eletrólito e os íons hidroxila (OH^{-}) migram em direção do ânodo e em uma região intermediária, estes se encontram e formam o hidróxido de ferroso (Equação 3), dependendo do teor de oxigênio, o hidróxido de ferroso pode se transformar em outros produtos de corrosão.



A Figura 4 mostra uma pilha eletroquímica no concreto, ilustrando o mecanismo de corrosão das armaduras.

Figura 4 - Pilha eletroquímica de corrosão no concreto armado



Fonte: Rodrigues, 2000. (Apud Polito, 2006).

Resumidamente o processo de corrosão eletroquímica só ocorre se:

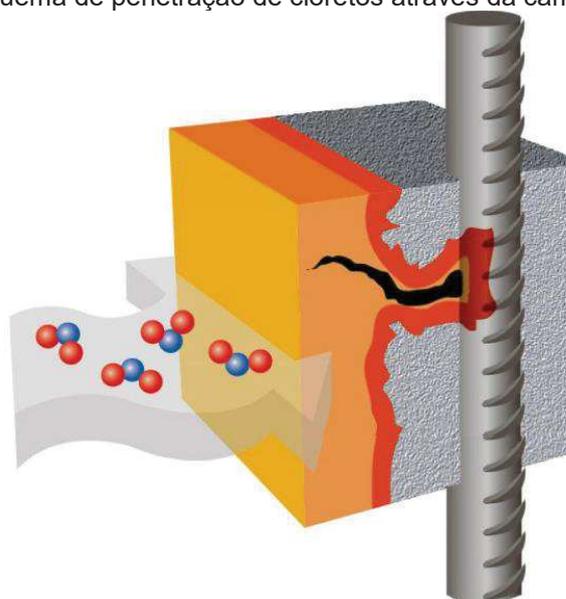
- Há uma diferença de potencial;
- O concreto apresente umidade em seus poros;
- Haja oxigênio e ocorra o rompimento da camada passivadora.

A camada de passivação é uma camada de óxidos de ferro que se forma naturalmente sobre a superfície das armaduras presentes no concreto graças ao pH alcalino do meio onde estas barras estão presentes (BALESTRA et al., 2016). Roberge (1999) ainda acrescenta que nos concretos armado e protendido, seus poros estão cheios de soluções alcalinas, de pH entre 12,6 e 13,8, em um nível de umidade normal. A alcalinidade da solução é uma característica fundamental para a resistência a corrosão de barras de aço estrutural. Com o pH alcalino e sem o ataque de agentes corrosivos, a barra de aço no interior do concreto tende a desenvolver naturalmente a camada protetora passiva. Segundo Figueiredo (2013), esta camada refere-se a uma película que confere taxas de corrosão desprezíveis, isso porque ela impede o acesso de umidade, oxigênio e agentes agressivos à superfície do aço e também dificulta a dissolução do ferro.

Nakamura (2004) descreve que no caso do ataque às estruturas de concreto armado pela ação de íons cloreto presentes em ambiente marinho, estes penetram através da rede de poros da camada de cobrimento do concreto e, quando atingem

determinada concentração sobre a superfície das barras, levam a ruptura localizada da camada de passivação, dando condições para iniciar o processo corrosivo das armaduras, conforme exemplificado na Figura 5.

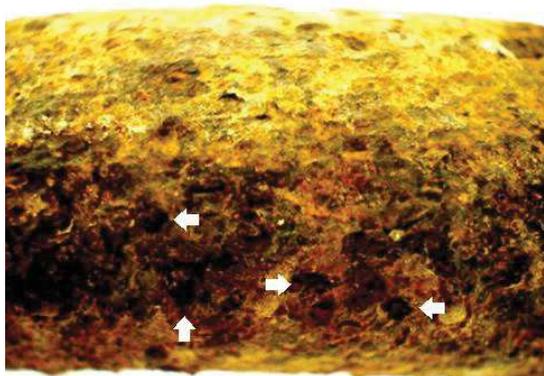
Figura 5 - Esquema de penetração de cloretos através da camada de cobrimento



Fonte: adaptado BARRIOS (2017).

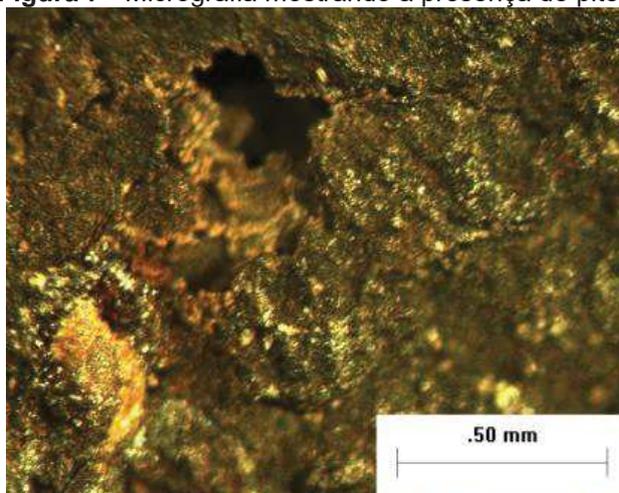
A corrosão se processa então por pequenas áreas localizadas na superfície metálica que vão aprofundando-se à medida que o processo corrosivo avança, a essas áreas localizadas de corrosão denominamos “pites”. A Figura 6 e Figura 7 mostram exemplos deste tipo de corrosão.

Figura 6 - Armadura com corrosão por pites. Imagem aumentada em 10x



Fonte: Silva, 2010.

Figura 7 - Micrografia mostrando a presença de pites.



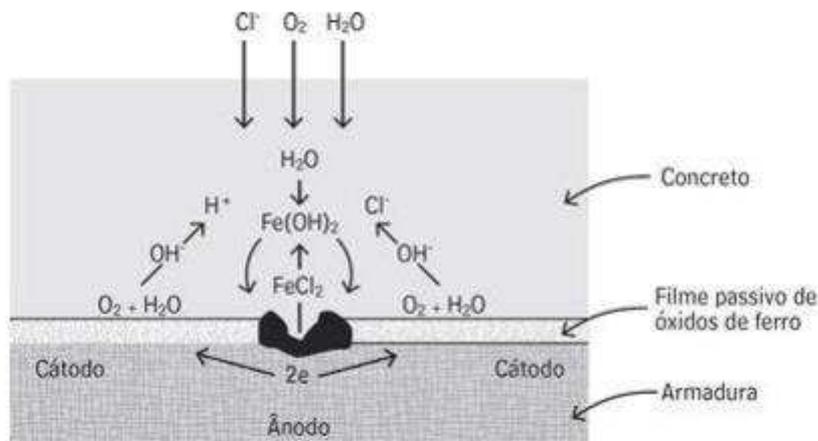
Fonte: Balestra et al., 2016.

Como já explanado, o mecanismo da corrosão da armadura é um processo desenvolvido de modo espontâneo como o de qualquer pilha eletroquímica onde exista um ânodo, um cátodo, um eletrólito e a presença de um condutor elétrico. A ausência de um destes elementos impedirá o início da corrosão ou não concluirá o processo, caso já esteja em andamento (FORTES e ANDRADE, 1995).

A Figura 8 mostra um exemplo do mecanismo de atuação dos íons cloreto na corrosão das armaduras. Os íons cloretos, ao atingirem as armaduras, despassivam a mesma e iniciam o processo de corrosão. Neste caso, os cloretos se combinam com o ferro das armaduras dando origem ao cloreto de ferro (FeCl_2). Este, por sua vez, passa para a solução dos poros do concreto onde acaba ocorrendo uma dissociação entre o ferro e o cloreto.

A partir disto, o ferro combina-se com os íons hidroxila (OH^-) presentes na solução dos poros do concreto, formando produtos de corrosão (FeOH_2) que se depositam próximos a região catódica, ao passo que os cloretos acabam retornando para o interior do pite para uma nova combinação e remoção do ferro a partir da armadura. A corrosão por pites é um processo autocatalítico, ou seja, as condições em seu interior propiciam a continuidade de seu crescimento. No interior do pite o metal é dissolvido criando cátions, os quais liberam elétrons que são consumidos numa reação de redução pelo oxigênio. A rápida dissolução de cátions produz um excesso de carga positiva no interior do pite, atraindo íons cloreto para manter a eletro-neutralidade, isso leva a diminuição do pH do concreto e realimenta o processo corrosivo (POLITO, 2006).

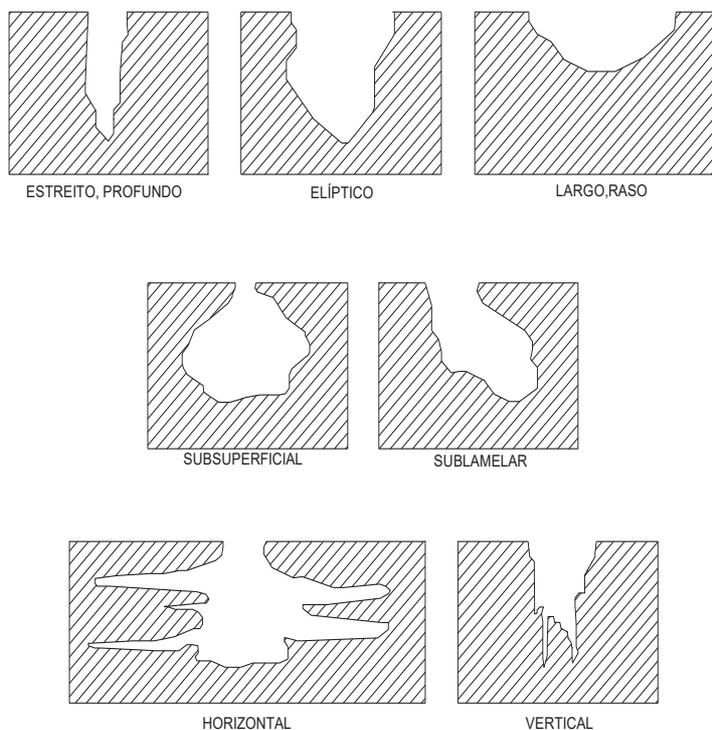
Figura 8 - Esquema do mecanismo de corrosão da armadura no perímetro do vazio de concreto contaminado com íons cloreto



Fonte: CORSINI (2013)

Segundo a Norma ASTM G46 - 94 (2013) *Standard Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion*, os pites são cavidades que apresentam o fundo em forma angulosa e profundidade geralmente maior que seu diâmetro. Esta mesma norma, apresenta as diferentes formas que os pites podem se manifestar conforme representado na Figura 9.

Figura 9 - Tipos de pites.



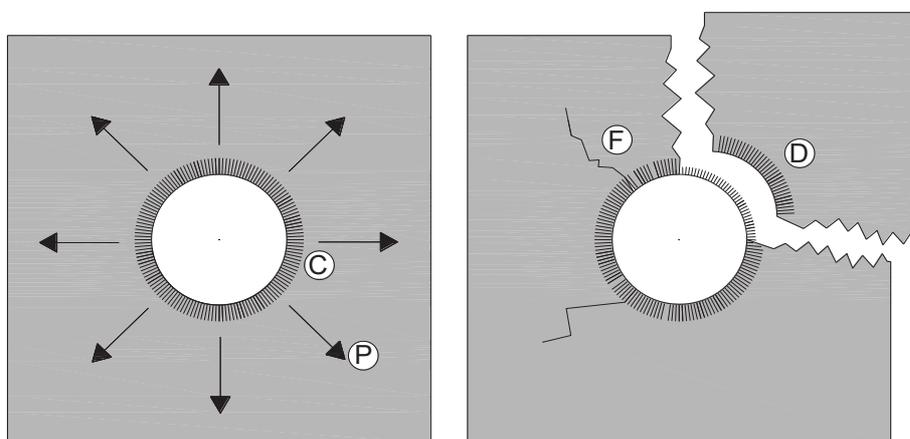
Fonte: Adaptado ASTM G46 - 94 (2013).

Na literatura, como em Rosenberg et. al. (1999), Palssom & Mirza (2002), é possível apontar que entre as principais consequências da corrosão em estruturas de concreto armado estão:

- A perda de parte seção transversal da armadura em conjunto com a redução da capacidade de carga e resistência da barra de aço;
- A formação de produtos de corrosão que posteriormente provoca destacamento da camada de cobrimento e;
- A perda de aderência na interface do aço/concreto prejudicando seu monolitismo estrutural.

Como exemplificado na Figura 10, os produtos de corrosão (C), gerados produzem esforços no concreto na direção radial das barras (P), as quais geram tensões de tração provocando a fissuração (F) do concreto. À medida que a fissuração evolui, existe a possibilidade de lascamento do concreto e o posterior destacamento (D) do mesmo, comprometendo o seu monolitismo e deixando as armaduras expostas, agravando seu processo corrosivo.

Figura 10 - Esforços produzidos que levam à fissuração e ao destacamento do concreto, devido à corrosão das armaduras



Fonte: Adaptado CASCUDO, 2005.

O grau de corrosão da armadura, definido como sendo a variação de massa das barras promovida pela corrosão, e o decréscimo da resistência, tanto das barras de aço, quanto do elemento estrutural, devem ser avaliados para prover mecanismos que permitam verificar a resistência de uma estrutura degradada pela corrosão de armaduras, determinando níveis de segurança para as mesmas (BALESTRA, 2013).

2.2 CARACTERÍSTICAS DE BARRAS DESTINADAS AO USO EM CONCRETO ARMADO

As características das barras destinadas ao concreto armado no Brasil devem satisfazer as exigências normativas da ABNT NBR 7480/2007 - *Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - Especificações*.

De acordo com a NBR 7480/2007, são classificados como barras os produtos com diâmetro nominal superior ou igual a 6,3mm, produzidos por laminação a quente.

Ainda de acordo com a NBR 7480/2007, as barras de aço são classificadas nas categorias CA-25 e CA-50, e os fios de aço na categoria CA-60, a numeração é feita a partir do valor característico da resistência de escoamento. Segundo Carvalho e Figueiredo Filho (2012), o valor característico da resistência representa, em um dado lote de material, a probabilidade da resistência ser ou não ultrapassada de maneira desfavorável à segurança.

As barras da categoria CA-50, devem obrigatoriamente apresentar nervuras horizontais oblíquas. As barras pertencentes à categoria CA-25, devem ter superfície lisa, desprovida de qualquer nervura e os fios da categoria CA-60, podem ser lisos, nervurados ou entalhados, os fios com diâmetro nominal igual a 10 mm devem, obrigatoriamente, ter entalhes ou nervuras.

As barras nervuradas foram desenvolvidas para prover maior aderência do que as barras lisas, visto que a adesão química é pequena, o atrito é inexistente até que haja o escorregamento entre a barra e o concreto, a resistência ao deslizamento se deve em sua maior parte à resistência que o concreto exerce contra as pressões que as nervuras causam sob o mesmo. Segundo Ducatti (1993), somente um fendilhamento generalizado pode romper a aderência concreto-armadura nervurada, isto porque a engrenagem com as nervuras não podem ser perdidas.

As características das barras, fios e propriedades mecânicas são dadas a partir das tabelas a seguir (Tabelas 2 e 3), disponíveis na NBR 7480/2007 anexo B, de caráter normativo.

Tabela 2 - Características das barras

Diâmetro Nominal ¹ mm	Massa e tolerância por unidade de comprimento		Valores Nominais	
Barras	Massa nominal ² kg/m	Máxima variação permitida para massa nominal	Área da seção mm ²	Perímetro mm
6,3	0,245	±7%	31,2	19,8
8,0	0,395	±7%	50,3	25,1
10,0	0,617	±6%	78,5	31,4
12,5	0,963	±6%	122,7	39,3
16,0	1,578	±5%	201,1	50,3
20,0	2,466	±5%	314,2	62,8
22,0	2,984	±4%	380,1	69,1
25,0	3,853	±4%	490,9	78,5
32,0	6,313	±4%	804,2	100,5
40,0	9,865	±4%	1256,6	125,7

¹ Outros diâmetros nominais podem ser fornecidos a pedido do comprador, mantendo-se as faixas de tolerância do diâmetro mais próximo

² A densidade linear de massa (em quilogramas por metro) é obtida pelo produto da área da seção nominal em metros quadrados por 7850kg/m³

Fonte: Adaptado NBR 7480/2007 - *Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificações.*

Tabela 3 - Propriedades mecânicas de barras e fios de aço destinados a armaduras para concreto armado

Categoria	Valores mínimos de tração			
	Resistência característica de escoamento (f_{yk}) [MPa]	Limite de resistência (f_{st}) [MPa]	Alongamento na ruptura em 10 ϕ (A) %	Alongamento total na força máxima (Agt) %
CA-25	250	1,20 f_y	18	-
CA-50	500	1,08 f_y	8	5
CA-60	600	1,05 f_y	5	-

Nota : f_y corresponde a resistência ao escoamento da barra ensaiada

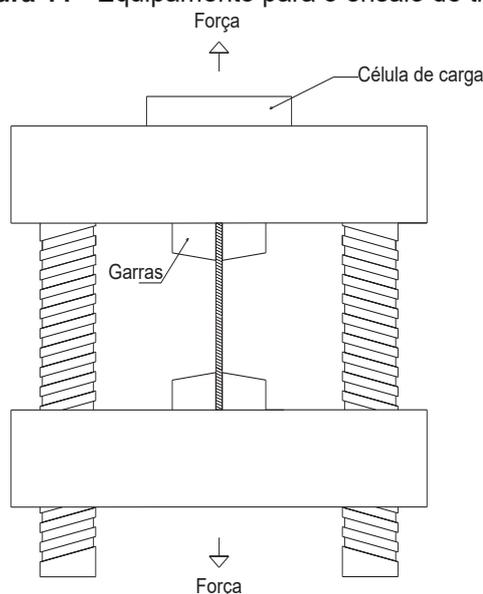
Fonte: Adaptado NBR 7480/2007 - *Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificações*

2.3 ENSAIO DE TRAÇÃO EM BARRAS

O ensaio consiste em solicitar os corpos de provas ao esforço de tração, desta maneira determina-se uma ou mais de suas propriedades mecânicas à temperatura ambiente.

O corpo de prova é fixado em garras da máquina de teste e alongado pelo movimento das mesmas no equipamento. A carga aplicada sobre o corpo de prova é medida por meio de células de carga e extensômetros acoplados ao corpo de prova medem o seu alongamento (CALLISTER, 2008). A Figura 11 apresentam um esquema geral do ensaio de tração

Figura 11 - Equipamento para o ensaio de tração



Fonte: Autor (2018).

O ensaio de tração toma como parâmetros as respectivas normas técnicas nacionais: NBR ISO 6892-1 / 2013 - Materiais metálicos - Ensaio de tração a temperatura ambiente; NBR 7480/2007 - Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificações.

Segundo a seção 6.1.1 da NBR ISO 6892-1 / 2013 - Materiais metálicos - Ensaio de tração a temperatura ambiente, a forma e as dimensões dos corpos de prova são dependentes da maneira que foram retirados e dos produtos metálicos que os compõem. De maneira geral, o corpo de prova é obtido através da usinagem

forjamento ou fundição. Porém, para produtos de seção constante, como barras, podem ser ensaiados sem a necessidade de processos de usinagem.

Ainda segundo esta norma, no anexo "C": "*Tipos de corpos-de-prova a serem usados em folhas e chapas com espessura igual ou maior que 3mm e fios, barras e perfis com diâmetro ou espessura igual ou maior que 4mm*", de caráter normativo, em sua seção C.2.3.1 o comprimento de medida original (L_0) é relacionado com a área original da seção transversal do corpo-de-prova (S_0), dada pela equação 4:

$$L_0 = k\sqrt{S_0} \quad (4)$$

Onde:

$K= 5,65$, segundo da norma NBR ISO 6892-1 / 2013.

Corpos-de-prova com as características ditadas acima são classificados como proporcionais.

A norma indica que para corpos de prova com seção transversal circular, as dimensões mínimas do mesmo devem ser iguais a dimensões fornecidas na Tabela 4:

Tabela 4 - Corpos de prova de seção transversal circular

K	Diâmetro do corpo de prova D (mm)	Área da seção transversal original S_0 (mm ²)	Comprimento		Comprimento total L_t (mm)
			original (mm) $L_0 = k\sqrt{S_0}$	paralelo mínimo L_c (mm) ¹	
5,65	20 ± 0,15	314	100 ± 1,0	110	2
	10 ± 0,075	78,5	50 ± 0,5	55	
	5 ± 0,040	19,6	25 ± 0,25	28	

¹ Em corpos de prova não usinados, a norma ainda prevê que o conceito de comprimento paralelo (L_c) seja substituído pelo conceito de distância entre as garras.

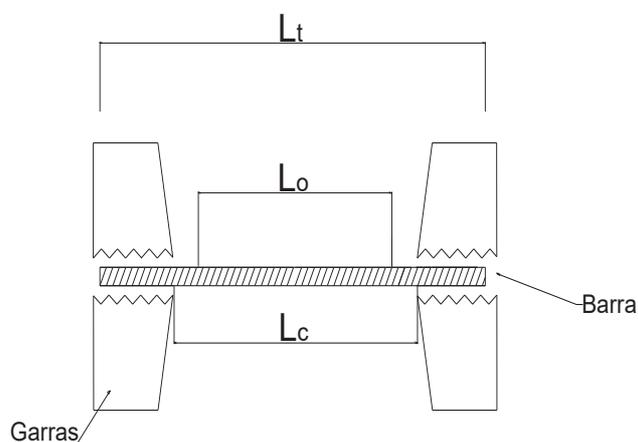
² Depende do método de fixação do corpo de prova na máquina. Em princípio $L_t > L_c + 2d$ ou $4d$, onde d corresponde ao diâmetro nominal em corpos-de-prova não usinados.

Fonte: Adaptado NBR ISO 6892-1 / 2013 - *Materiais metálicos - Ensaio de tração a temperatura ambiente*

A esquematização dos comprimentos do corpo de prova pode ser observada na Figura 12, a qual delimita o comprimento paralelo (L_c) referente a distância entre

as garras do equipamento, o comprimento total da barra (L_t) e o comprimento de medida original (L_o).

Figura 12 - Esquemática dos comprimentos da barra



Fonte: Autor (2018).

Onde:

L_o : comprimento de medida original;

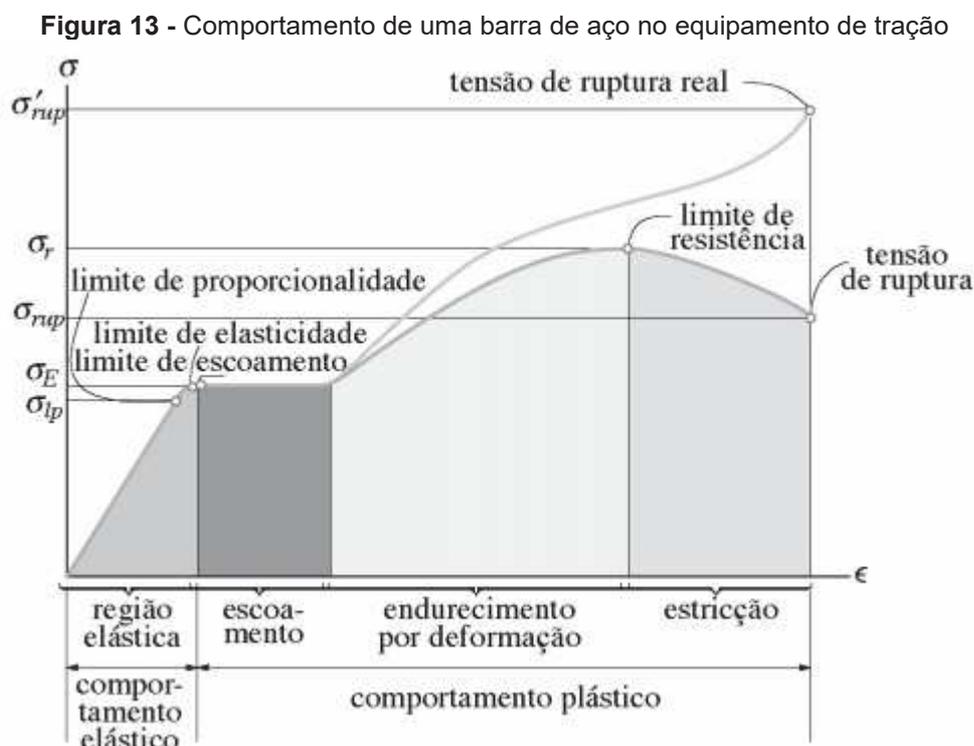
L_c : Comprimento paralelo mínimo;

L_t : comprimento total do corpo de prova.

A norma NBR 7480/2007 - *Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - Especificações*, seção 6.6.1.1 indica que o comprimento de medida original deve ser no mínimo, igual a dez vezes o diâmetro nominal, não sendo permitido o uso de corpos-de-prova usinados. Neste ponto, o corpo de prova é fixado nas garras do equipamento de tração que, através do movimento de seus cabeçotes, acaba promovendo a aplicação de uma força de tração sobre o corpo de prova. A relação entre a força aplicada e a área da seção dos corpos de prova representa a tensão aplicada no mesmo e de acordo com a variação de comprimento no corpo de prova é possível determinar as deformações (BALESTRA, 2013). Através do comportamento obtido ao longo do ensaio é possível identificar graficamente as seguintes propriedades mecânicas: resistência ao escoamento, limite de resistência e alongamento final do corpo de prova.

O comportamento de uma barra de aço que não apresenta corrosão na sua seção quando tracionada é graficamente apresentada na Figura 13, com este gráfico é possível interpretar o diagrama tensão-deformação quanto às

propriedades mecânicas supracitadas, a primeira fase corresponde a deformação elástica, a segunda o patamar de escoamento, na terceira a deformação plástica uniforme, e a quarta fase a estrição (estrangulamento) e então o último ponto, o qual caracteriza a ruptura.



Fonte: HIBBELER (2000).

2.4 ESTUDOS ENCONTRADOS NA LITERATURA

Há um grande esforço na comunidade acadêmica para tentar correlacionar diversos fatores que influenciam na vida útil das estruturas de concreto armado, contudo mostra-se difícil observar a aplicabilidade das formulações propostas devido ao alto grau de aleatoriedade dos resultados e as diversas condições de ensaio, Helene (1993) afirma que alguns modelos e formulações são muito complexos, pouco práticos e de utilidade discutível.

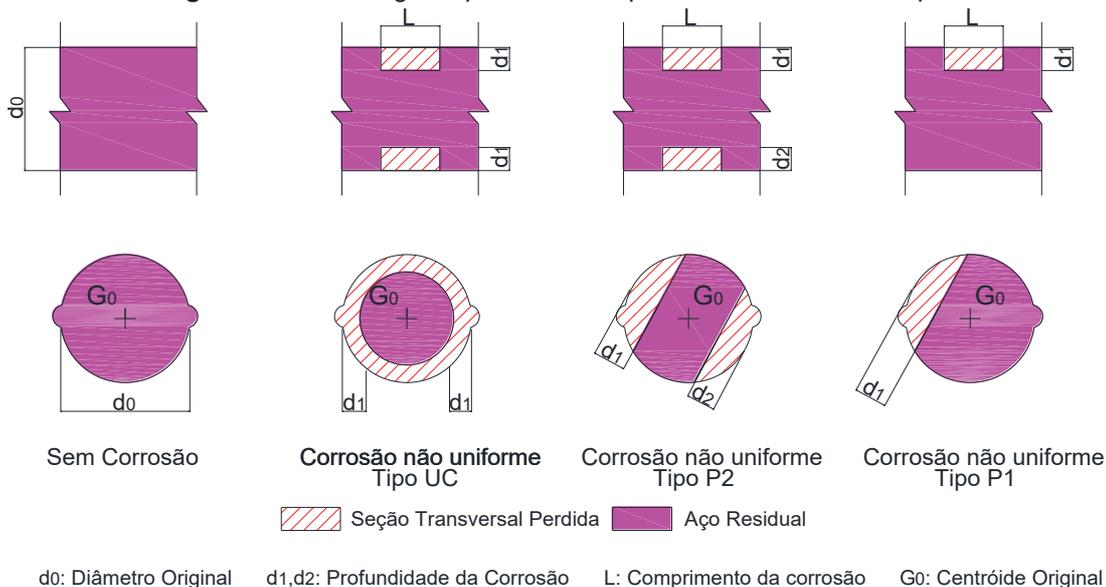
Nos dois subcapítulos seguintes, serão expostos alguns métodos e resultados encontrados na bibliografia referente a pesquisas com ensaios de corrosão acelerados e naturais.

2.4.1 Estudos Baseados a Partir De Ensaaios Acelerados

Grande parte dos estudos que avaliam a corrosão por pites é feita a partir de métodos que, teoricamente, simulam em laboratório o processo da corrosão em ambientes onde há a presença natural de cloretos, seja por exposição dos corpos de prova em câmaras de névoa salina como relatado em Apostolopoulos (2008) e Caines et al. (2013) e métodos acelerados de adição de cloretos ao concreto fresco, conforme Mancini et al., (2014) e Jin et al., (2016), de ciclos de molhagem e secagem, conforme o experimento de Ramezani pour et al., (2014) e de migração iônica, descrita por Pereira et al., (2013) e Ortega & Robles (2014), ou pelo método de perda de seção transversal induzida mecanicamente, descrito por Zhu et al. (2017).

A problemática, segundo Mancini et al., (2014), dos ensaios acelerados é que o efeito da corrosão produzida pode diferir da corrosão natural, em termos de óxidos produzidos, da física da formação, da expansão e liberação de pressão interna devido ao fluxo de óxido dentro dos micro poros e da capilaridade do concreto. Os ensaios de corrosão acelerados não possuem um padrão dentro da comunidade científica. Apesar do grande número de pesquisas sendo desenvolvidas, elas são realizadas através de diferentes metodologias, dificultando a correlação dos resultados (TORRES et al., 2008).

Em Zhu et al. (2017), foram utilizados os métodos da câmara salina e perda de seção transversal induzida mecanicamente. Foram ensaiados 7 e 8 corpos de prova, de comprimento que variável entre 420 mm e 670 mm, extraídos de duas barras de armadura de concreto armado de diâmetro nominal de 12 mm expostos à um ambiente rico em cloretos em uma câmara salina por 26 e 28 anos respectivamente no Laboratório Malheureux et durabilité des construction (LMDC) à uma concentração de 35g/l correspondente à concentração de cloretos na água do mar comum, a partir deste ensaio foram determinadas 3 morfologias típicas de corrosão por pites, as quais foram simuladas mecanicamente como mostrado na Figura 14.

Figura 14 - Morfologias típicas usadas para simular a corrosão pites

Fonte: Zhu et al ,2017

O ensaio foi realizado a partir de barras de aço para concreto armado de diâmetro nominal de 12 mm e tensão máxima de 500 MPa, onde foram ensaiados 12 corpos de prova do tipo UC, 13 do tipo P1 e 10 do tipo P2 e objetivou quantificar a relação entre a ductilidade da armadura, morfologia e grau de corrosão. Segundo Zhu et al (2013), para todas morfologias ensaiadas a tensão ultima foi reduzida exponencialmente com o grau de corrosão até o nível crítico (30% de massa perdida) e então permaneceu estável. Porém diferentes morfologias de corrosão levaram a taxas de degradação significativamente diferentes com o grau de corrosão. A pesquisa permitiu isolar as variáveis geométricas dos corpos de prova, proporcionando resultados mais padronizados, o que possibilita relacionar as propriedades mecânicas das barras de aço, com a perda de massa, morfologia do pite e excentricidade formada na barra, com um grau de confiança mais elevado.

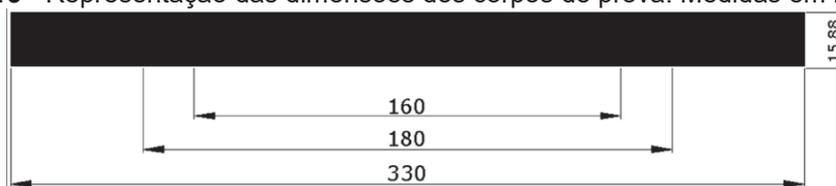
2.4.2 Estudos Baseados em Condições Naturais

Os estudos baseados em condições naturais abrangem uma parcela muito menor nas pesquisas encontradas na literatura, isto por que o método de extração dos corpos de prova é invasivo, sendo necessário escolher lugares estratégicos onde a armadura é influenciada pelos cloretos e também onde não ocorreria dano estrutural para a edificação.

Balestra (2013) realizou um destes estudos na Ala Zero do ITA – São José dos Campos, SP, onde foram analisadas as variações nas propriedades mecânicas de armaduras pertencentes às antigas fundações da mesma (dois blocos de fundação) que permaneceram enterradas por aproximadamente 60 anos, totalizando 25 corpos de prova, 20 corpos de prova retirados a partir de 8 barras encontradas após a ruptura de um dos blocos de fundação, destinadas ao ensaio de tração e 5 corpos de prova de referência, o segundo bloco de fundação foi usado para ensaios de carbonatação.

As amostras que posteriormente virariam corpos de prova destinados à tração passaram por uma análise visual, permitindo identificar trechos de barras que não apresentassem deformações ou curvaturas significativas ao longo do seu eixo. Os corpos de prova apresentaram em projeto diâmetro igual a 5/8" (15,88 mm), portanto atendendo as normas NBR 6892/2002 e da norma NBR 7480/2007, os corpos de prova tiveram comprimento total de 330 mm, onde 160 mm foram destinados a medida original (L_0), 180 mm corresponderam ao comprimento entre as garras do equipamento de tração (L_c), sobrando então 75 mm para a fixação de cada garra do equipamento de tração, para melhor visualização as medidas estão dispostas na Figura 15.

Figura 15 - Representação das dimensões dos corpos de prova. Medidas em milímetros.



Fonte: Balestra, 2013.

Este conjunto preliminar foi submetido a uma análise em laboratório que contempla os procedimentos de decapagem química e análise de deformações e pites nos locais de fixação. Somente a partir desta análise laboratorial, um conjunto de corpos de prova apto ao ensaio de tração foi definido (Balestra, 2013).

Balestra (2013), comparando os valores obtidos a partir dos menores diâmetros encontrados nos corpos de prova corroídos com o diâmetro original das barras previsto em projeto (15,88mm), notou uma redução que variava da ordem de 8,06 até 36,08% e, a partir dos menores diâmetros obtidos para os corpos de prova

e referência, foi possível notar uma diferença da ordem de 4,97% até 9,95% em comparação com o diâmetro original das barras previsto em projeto.

Com os resultados obtidos do ensaio de tração, foi analisada a variação da resistência ao escoamento, limite de resistência e alongamento final para cada corpo de prova segundo seu grau de corrosão e segundo o menor diâmetro dos mesmos, desta maneira foi possível observar a correlação entre o menor diâmetro com o limite de resistência apresenta uma melhor relação comparada à correlação entre o grau de corrosão para os corpos de prova corroídos ou a variação percentual de massa para os corpos de prova de referência.

Os resultados obtidos neste trabalho mostraram que mesmo pequenas variações de massa, podem levar a significativas reduções das propriedades mecânicas das armaduras, devido ao dano geométrico produzido pela corrosão por pites.

Balestra et. al, (2016), realizou outro estudo baseado em condições naturais, o qual avaliou o efeito da corrosão em armaduras de aço enterrada a mais de 60 anos, o estudo teve por objetivo analisar a influência do grau de corrosão no rendimento e nas resistências finais (nominais e efetivas) do aço enterrado.

Para o estudo foram coletados um total de 211 barras, com diâmetro nominal de 15,88 mm, a partir do diâmetro nominal foi possível calcular o comprimento total necessário de cada amostra, o valor do comprimento mínimo foi de 330 mm. A fim de obter um conjunto de amostras que não tivessem grandes desvios ao longo de sua extensão, o que poderia influenciar nos resultados do ensaio de tração, trechos mais retilíneos foram analisados e então marcados e cortados.

As amostras foram preparadas e limpas de acordo com a norma ASTM G1 (ASTM 2003) e então foram selecionadas barras que não apresentassem alto grau de corrosão ao longo do comprimento destinado ao acoplamento das garras do equipamento de tração. No total 20 amostras atendiam todos os critérios citados anteriormente.

Os resultados dos ensaios de tração mostraram que as amostras com grau de corrosão de cerca de 12% tinham resistência ao escoamento e resistência final superiores a amostras com metade deste percentual, este comportamento irregular pode ser relacionado a corrosão por pites cujos efeitos não são explicitamente explicados pelo grau de corrosão.

O estudo em concordância com Almusallan (2001) mostrou que a tendência descendente dessas propriedades mecânicas são observadas a partir do grau de corrosão de 17%, este comportamento está associado ao dano causado pelos pites na seção transversal, à medida que os pites se aprofundam, eles causam reduções progressivas na seção transversal da barra, ou seja, a medida que o processo de corrosão progride, mesmo apresentando pequenas variações de massa, a sua resistência é reduzida. Além disso, a medida que os pites se aprofundam o centro de gravidade da barra muda ao longo de seu comprimento contribuindo assim, para um comportamento desigual.

Também foram observados que as amostras com grau de corrosão de 25% e 5% apresentaram a mesma resistência efetiva, porém valores distantes quanto à resistência final. Desta maneira, pode-se dizer que a má interpretação dos valores efetivos leva a conclusões errôneas na análise do comportamento de estruturas corroídas. Parâmetros efetivos devem ser utilizados para avaliar se a carga aplicada nas barras pode levar uma estrutura em colapso, enquanto que os parâmetros nominais devem ser utilizados para avaliar estruturas não corroídas pois consideram a seção transversal original (não corroída).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

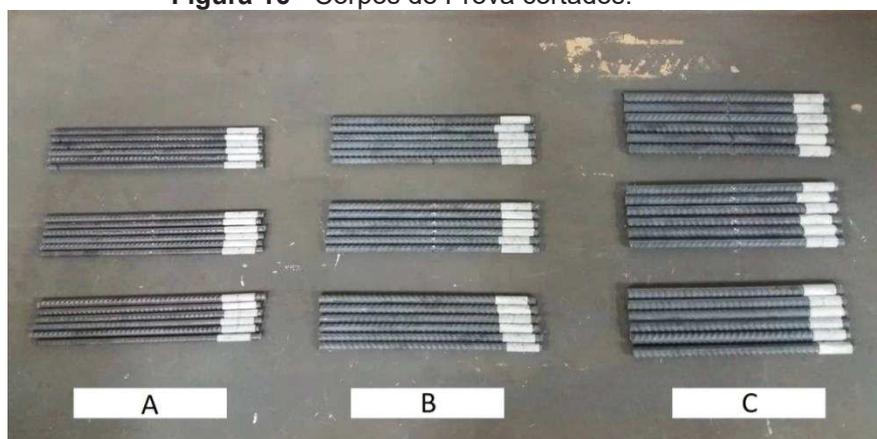
Neste capítulo estão especificados os materiais e a metodologia empregados no estudo prático realizado no Laboratório de Materiais e Construção Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – *campus* Toledo (UTFPR-TD), que teve por intuito avaliar influência da corrosão por pites nas propriedades mecânicas de armaduras submetidas à tração.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Na presente pesquisa, utilizaram-se 54 barras de aço CA-50 destinadas ao ensaio de tração. O valor característico da resistência de escoamento (f_{yk}), onde a unidade de medida é em Kgf/mm², é utilizado para classificar e nomear o tipo do aço utilizado. Desta forma, tem-se que o aço CA-50, apresenta a resistência ao escoamento mínima de 50 Kgf/mm² (ou 500 MPa).

Foram utilizadas 18 barras para cada diâmetro ensaiado (10, 12,5 e 16 mm) com comprimento nominal de 330 mm destinadas ao processo de simulação de pites como mostrado na Figura 16, sendo o grupo A corresponde as barras com diâmetro de 10 mm, o grupo B corresponde as barras de 12,5mm e o grupo C as barras de 16mm. O comprimento dos corpos de prova foi padronizado como sendo igual a 330mm visando atender as normas de ensaio, segundo a NBR 7480 (2007), conforme será descrito no item 3.2.

Figura 16 - Corpos de Prova cortados.



Fonte: Autor (2018).

3.2 DELIMITAÇÃO DO TAMANHO DOS CORPOS DE PROVA.

Como o material de análise do estudo foram barras de aço CA-50 de diâmetros nominais iguais a 10, 12,5 e 16 mm, o tamanho dos corpos de prova puderam ser determinados segundo duas instruções normativas brasileiras: a NBR ISO 6892-1 / 2013 - *Materiais metálicos - Ensaio de tração a temperatura ambiente*, ou pela norma NBR 7480 (2007) - *Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - Especificação*, conforme abordado anteriormente. A primeira norma ressalta que o comprimento total mínimo (L_t) do corpo de prova proveniente de uma armadura pode ser dado através da Equação 5, ao passo que, a segunda norma determina que o comprimento original de medida (L_o), definido como o comprimento nos quais é de 10 vezes o diâmetro da barra.

$$L_t > L_c + 2d \text{ ou } 4d \quad (5)$$

Onde:

L_t : Comprimento total mínimo da barra de aço (mm).

L_c : Comprimento paralelo mínimo refere-se à distância entre as garras do equipamento de tração (mm).

d : Diâmetro da barra (mm).

Para o cálculo a partir da NBR ISO 6892-1 / 2013 padronizou-se o tamanho dos corpos de prova para facilitar o corte das barras, utilizou-se para o cálculo das medidas das barras a Tabela 4 Corpos de prova de seção transversal circular, adaptado da Norma pela NBR ISO 6892-1 / 2013 - *Materiais metálicos - Ensaio de tração a temperatura ambiente*, adotando os parâmetros para o diâmetro de 20mm, é satisfeita as dimensões mínimas necessária para a realização do ensaio de tração de todas as barras escolhidas para o dado experimento.

Desta forma, utilizando a equação 5, têm-se que

$$L_t > 110 + 2 \times 20$$

$$L_t > 150 \text{ mm}$$

$$L_t > 4 \times 20$$

$$L_t > 80 \text{ mm}$$

Ou

Apesar do comprimento total de 150 mm (mais restritivo segundo as equações acima) seja suficiente para os corpos de prova, o equipamento utilizado para os ensaios de tração necessitam que tenha, no mínimo, 75 mm para que a garra consiga fixar o corpo de prova de maneira eficiente, e não somente 20 mm como a NBR dita. Portanto, para os corpos de prova sejam devidamente fixados no equipamento de tração disponível tem-se:

$$L_t > 110 + 2 \times 75$$

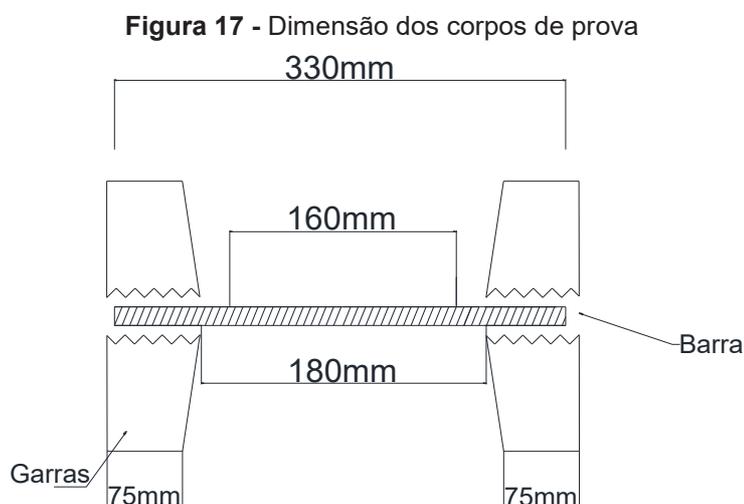
$$L_t > 260 \text{ mm}$$

Para o cálculo do comprimento de medida original a partir da NBR 7480/2007, utilizou-se o maior diâmetro das barras, deste modo tem-se:

$$L_o = 16 \times 10$$

$$L_o = 160 \text{ mm}$$

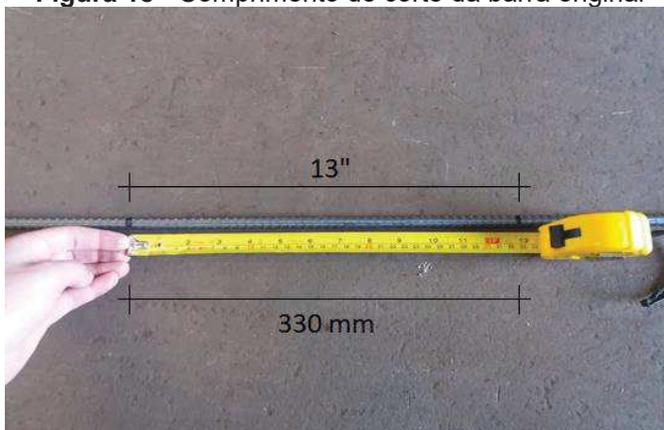
Visando atender o parâmetro mais restritivo de ambas as normas supracitadas, o comprimento total dos corpos de prova, L_t , foi adotado como sendo de 330 mm onde, 160 mm corresponde ao comprimento de medida original, L_o , 180mm corresponde ao comprimento entre as garras do equipamento de tração, comprimento paralelo, L_c , e 75 mm foram destinados à fixação do corpo de prova em cada garra do equipamento de tração, como pode ser observado na Figura 17.



Fonte: Autor (2018).

Desta forma, o comprimento de corte para a execução do ensaio de tração foi de 330 mm para todos os corpos de prova, independentemente de seu diâmetro, como ilustrado nas Figura 18.

Figura 18 - Comprimento de corte da barra original



Fonte: Autor (2018).

3.3 METODOLOGIA DE EXECUÇÃO DOS PITES SIMULADOS E SITUAÇÕES DE ENSAIOS.

De maneira geral, o processo de simulação de pites consistiu na perfuração da barra de aço utilizando brocas de aço rápido com ângulo de afiação da ponta de 118° , acopladas a uma furadeira de bancada como pode ser observado na Figura 19.

Figura 19 - Furadeira de bancada utilizada para simular os pites



Fonte: Autor (2018).

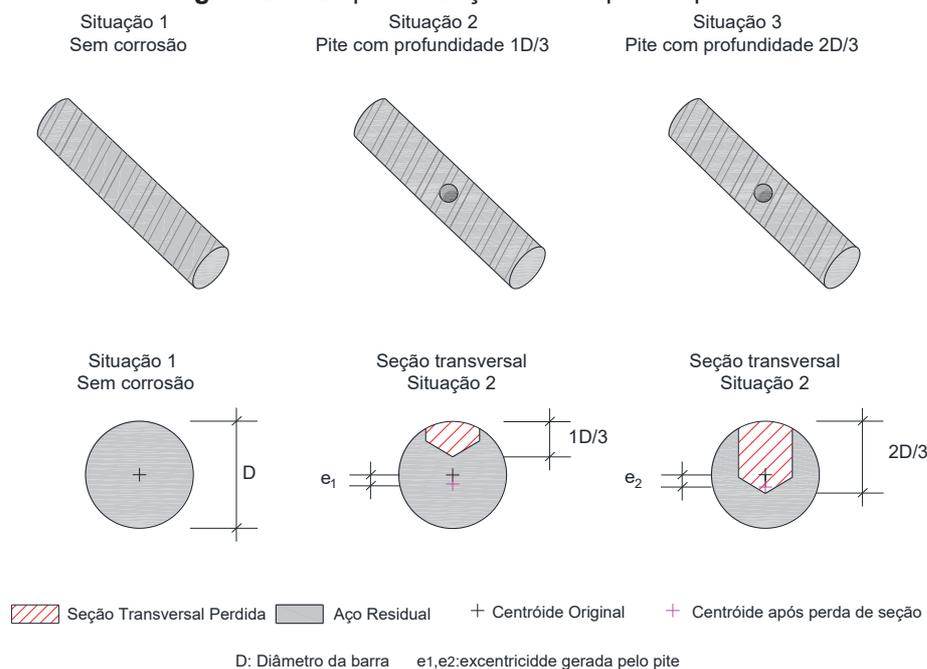
Antes da perfuração fez-se uma marcação no meio da barra e então fora simulado o pite no ponto central da barra como mostrado na Figura 20. Para tanto, o diâmetro da broca utilizada foi de metade do diâmetro da barra e a profundidade do pite foi definida segundo o diâmetro da barra conforme será detalhado na sequência.

Figura 20 - A: Marcação do meio da barra para posterior furação. B: Pite simulado no corpo de prova A2-5



Fonte: Autor (2018).

Cada diâmetro apresentou três situações a serem ensaiadas, a primeira situação corresponde à barra sem corrosão, ou seja, sem nenhum pite simulado, a segunda situação corresponde a um pite que atinge a profundidade de $1/3$ do diâmetro da barra e a terceira situação corresponde a um pite com profundidade de $2/3$ de seu diâmetro, como mostrado na Figura 21. Desta forma foi possível analisar efeitos da mudança da excentricidade na resistência final da barra de aço após o ensaio de tração.

Figura 21 - Esquemática dos corpos de prova

Fonte: Autor (2018).

Além disso, para padronização, neste trabalho foi adotada uma broca com diâmetro igual à metade do diâmetro das barras, em concordância com o trabalho de Zhu et al. (2017) e Balestra et al. (2016), que demonstram mudança de comportamento entre 20 e 30% da perda de seção transversal. Desta maneira, usando brocas com metade do diâmetro das barras foi visto que resultam na perda de seção que abrangem estas porcentagens, com é possível observar na Tabela 5.

Tabela 5 - Representação das situações simuladas

(contiuua)

CP	Profundidade do Pite simulado (mm)	Diâmetro do corpo de prova (mm)	Broca utilizada para simulação do pite (mm)	Seção Transversal perdida (%)	Qtd. de corpos de prova	Exc. (mm)
A1-X	0	10	-	0	6	0
A2-X	1D/3	10	5 mm	15,0557	6	-0,6326
A3-X	2D/3	10	5 mm	36,2787	6	-1,0935
B1-X	0	12,5	-	0	6	0
B2-X	1D/3	12,5	6 mm	14,7475	6	-0,7709

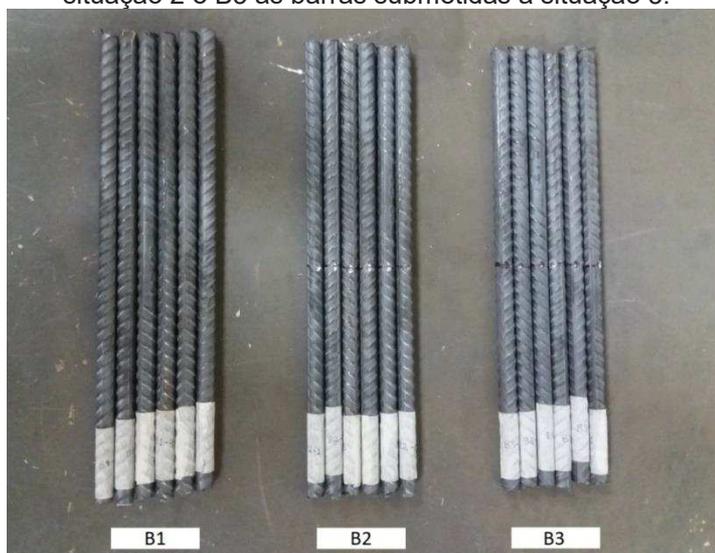
Tabela 6 - Representação das situações simuladas

Amostra	Profundidade do Pite simulado (mm)	Diâmetro do corpo de prova (mm)	Broca utilizada para simulação do pite (mm)	Seção Transversal perdida (%)	Qtd. de corpos de prova	(conclusão)
						Exc. (mm)
B3-X	2D/3	12,5	6 mm	35,0378	6	-1,2959
C1-X	0	16	-	0	6	0
C2-X	1D/3	16	8 mm	15,581	6	-1,0123
C3-X	2D/3	16	8 mm	36,2787	6	-1,7496
Total					54	

Fonte: Autor (2018)

Com os dados da tabela, foi possível executar os pites com a furadeira de bancada como explanado anteriormente. A Figura 22 apresenta as três situações de ensaio das barras de diâmetro de 12,5 mm.

Figura 22 - Onde B1 representa as barras submetidas à situação 1, B2 as barras submetidas à situação 2 e B3 as barras submetidas à situação 3.



Fonte: Autor (2018)

3.4 DETERMINAÇÃO DO GRAU DE CORROSÃO DOS CORPOS DE PROVA

O grau de corrosão (G) é definido em função da variação de massa apresentada pelo corpo de prova (BALESTRA, 2016). A diferença percentual do

corpo de prova antes e após a simulação do pite expressa o grau de corrosão, portanto o mesmo pode ser apresentado em porcentagem segundo a Equação 6 (APOSTOLOPOULOS, MICHALOPOULOS & KOUTSOUKOS, 2008).

$$G(\%) = \frac{m_o - m_f}{m_o} \times 100 \quad (6)$$

Onde:

G : Grau de corrosão;

m_o : massa inicial do corpo de prova;

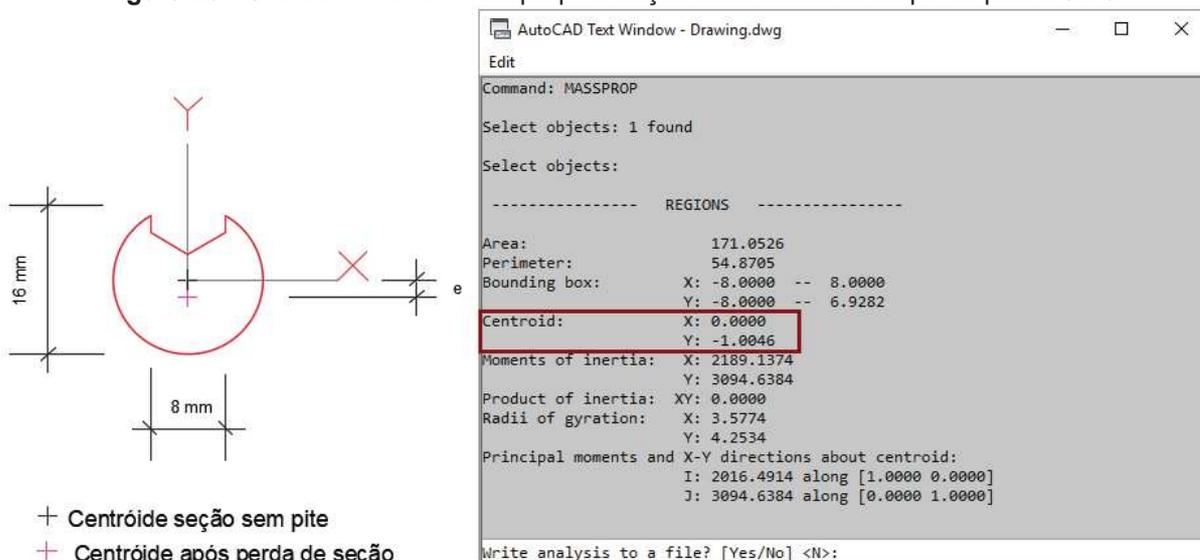
m_f : massa final do corpo de prova.

3.5 DETERMINAÇÃO DA EXCENTRICIDADE GERADA PELO PITE SIMULADO

A excentricidade é determinada como sendo o desvio do centro de gravidade (CG) de uma seção transversal. O cálculo da excentricidade da seção transversal dos corpos de prova deu-se calculando a diferença do CG da seção transversal antes e depois do pite.

Usou-se o comando *massprop* do software Autocad para a definição do centro de gravidade da seções transversais, como mostrado na Figura 23.

Figura 23 - Uso do comando massprop na seção transversal do corpo de prova C2-3



Fonte: Autor (2018).

Para facilitar, foi colocado o centro de gravidade da seção sem corrosão no eixo (0,0) do plano cartesiano. Ao colocar a seção com o pite na mesma posição que a seção, o comando *massprop*, consegue-se o valor do centro de gravidade, que é também, nesse caso, a excentricidade da seção com pite.

3.6 ENSAIO DE TRAÇÃO

Após a execução dos pites simulados, os corpos de prova foram encaminhados para o ensaio de tração em uma máquina universal de 300KN (Figura 24) para a determinação de suas propriedades mecânicas, seguindo as diretrizes normativas para o ensaio de tração.

Para os corpos de prova sem corrosão simulada, utilizou-se acoplado à barra um extensômetro para determinar seu alongamento e determinar o escoamento da barra (Figura 24B). Para as barras que apresentam corrosão simulada o extensômetro não foi utilizado por não se saber o instante de ruptura da barra e, conseqüentemente, por haver a possibilidade de quebra do extensômetro.

Figura 24 - Ensaio do Tração. A - sem a utilização do extensômetro. B - com a utilização do extensômetro.



Fonte: Autor (2018).

3.7 CÁLCULO DAS PROPRIEDADES

O sistema de coleta de dados que acompanha o equipamento de tração, fornece a partir do ensaio somente os valores da tensão de escoamento e tensão máxima. Dessa maneira se fez necessário obter o alongamento medindo o corpo de prova antes e após o ensaio com o auxílio de um paquímetro. O alongamento pode ser expressado em porcentagem segundo a Equação 7.

$$A(\%) = \frac{Lt_f - Lt_i}{Lt_i} \times 100 \quad (7)$$

Onde:

$A(\%)$: Alongamento;

Lt_f : Comprimento total final;

Lt_i : Comprimento total inicial.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As barras destinadas ao uso no concreto armado foram analisadas quanto à resistência ao escoamento (f_y), resistência máxima (f_{st}), alongamento final (A), grau de corrosão (G), e excentricidade (e) gerada pelo pite simulado na seção transversal do corpo de prova. Os valores retirados dos ensaios de tração e dados calculados das propriedades estão no APÊNDICE A1, A2 e A3.

Este capítulo apresenta os resultados obtidos no ensaio de tração sendo comparados com as características de cada corpo de prova, como será demonstrado a seguir.

4.1 ANÁLISE DE BARRAS ISENTAS DE CORROSÃO UTILIZADAS PARA REFERÊNCIA.

Utilizando as diretrizes da norma NBR 7480/2007 - *Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificações*, onde barras do tipo CA-50 devem apresentar no mínimo a tensão de escoamento (f_y) de 500 Mpa, tensão máxima (f_{st}) de no mínimo 540 Mpa e alongamento final (A) de pelo menos 8% do seu comprimento original.

Neste caso podê-se observar que, em geral, as barras A1-X, B1-X e C1-X utilizadas estavam dentro do padrão de qualidade exigido pela ABNT, salvo nas seguintes ocasiões: A1-1 e C1-1, onde o extensômetro escorregou da barra e a tensão de escoamento não foi medida, A1-6, onde o alongamento não pode ser medido devido fim precoce da plotagem, gerando erro nesses dados, estes erros são chamados *outliner*, e para a análise a amostra correspondente a eles foram desconsideradas, conforme Tabela 7, que também apresenta a média (\bar{x}) e desvio padrão (S) de cada amostra (CP).

Tabela 7 - Propriedades das amostras sem corrosão

Amostras sem corrosão										
D (mm)	CP	Tensão de escoamento f_y (MPa)	\bar{x} (Mpa)	S	Tensão máxima f_{st} (MPa)	\bar{x} (Mpa)	S	Alongamento A (%)	\bar{x} (Mpa)	S
10	A1-1	*			673,58			8,84		
	A1-2	587,57	587,86	2,72	675,16	674,47	2,18	9,34	9,03	0,22
	A1-3	584,60			671,48			8,87		
	A1-4	591,24			677,39			9,09		
	A1-5	588,02			673,85			8,81		
	A1-6	587,40			587,65			0,60		
12,5	B1-1	576,13	569,80	4,13	670,57	664,30	3,94	9,70	9,40	0,62
	B1-2	567,50			663,18			8,73		
	B1-3	570,89			664,61			9,24		
	B1-4	571,90			665,70			10,49		
	B1-5	568,24			663,27			9,12		
	B1-6	564,14			658,48			9,12		
16	C1-1	*			649,80			7,27		
	C1-2	533,84	533,69	7,00	645,09	644,92	6,30	12,50	12,88	0,63
	C1-3	537,97			650,01			12,42		
	C1-4	524,05			636,63			13,51		
	C1-5	530,34			640,99			13,64		
	C1-6	542,25			651,90			12,35		

Observações:

*	O aparelho de tração não mediu esta propriedade
	Erro no Ensaio de tração – Dado excluído
	Dados que atingiram o padrão de qualidade

Consoantes os resultados obtidos, as barras estão aptas à análise que é objeto deste estudo. Estes valores apresentados são utilizados como referência nas análises que seguem.

4.2 ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS EM BARRAS SOB CORROSÃO SIMULADA.

Neste capítulo são analisadas as propriedades mecânicas das barras de diâmetros 10, 12,5 e 16 mm sob corrosão simulada. As propriedades mecânicas analisadas são: tensão de escoamento (f_y), tensão máxima (f_{st}) e alongamento final (A).

4.2.1 Tensão de Escoamento (f_y)

A tensão de escoamento apresentou praticamente o mesmo comportamento para as amostras dos três diâmetros, onde observa-se na Tabela 8 uma queda a medida que o pite se aprofundava. Porém, somente as amostras sem corrosão e as amostras com corrosão 1D/3 correspondentes aos diâmetros de 10 e 12,5 mm continuaram a respeitar a tensão de escoamento mínima permitida pela norma.

Tabela 8 - Tensão de escoamento

D (mm)	Amostras sem corrosão				Amostras com corrosão 1D/3				Amostras com corrosão 2D/3			
	CP	f_y (MPa)	\bar{x} (Mpa)	S	CP	f_y (MPa)	\bar{x} (Mpa)	S	CP	f_y (MPa)	\bar{x} (Mpa)	S
10	A1-1	*			A2-1	526,86			A3-1	434,83		
	A1-2	587,57			A2-2	526,61			A3-2	409,25		
	A1-3	584,60	587,86	2,72	A2-3	522,62	523,40	5,19	A3-3	378,80	414,23	24,15
	A1-4	591,24			A2-4	529,09			A3-4	446,75		
	A1-5	588,02			A2-5	517,70			A3-5	407,83		
	A1-6	587,40			A2-6	517,54			A3-6	407,91		
12,5	B1-1	576,13			B2-1	493,95			B3-1	439,63		
	B1-2	567,50			B2-2	504,75			B3-2	388,82		
	B1-3	570,89	569,80	4,13	B2-3	508,05	505,01	6,53	B3-3	438,55	422,8	18,55
	B1-4	571,90			B2-4	503,00			B3-4	418,90		
	B1-5	568,24			B2-5	506,68			B3-5	427,02		
	B1-6	564,14			B2-6	513,65			B3-6	424,05		
16	C1-1	*			C2-1	402,15			C3-1	383,16		
	C1-2	533,84			C2-2	396,22			C3-2	382,26		
	C1-3	537,97			C2-3	411,84	403,78	5,74	C3-3	357,32	376,10	10,11
	C1-4	524,05	533,69	7,00	C2-4	405,74			C3-4	378,07		
	C1-5	530,34			C2-5	399,13	C3-5	372,39				
	C1-6	542,25			C2-6	407,61			C3-6	383,38		

Observações:

* O aparelho de tração não mediu esta propriedade

Erro no Ensaio de tração

Dados que atenderam aos parâmetros de norma

Dados que não atenderam aos parâmetros de norma

Fonte: Autor (2018)

A barra com o diâmetro de 10 mm, quando perdeu 1D/3 de sua seção transversal teve sua tensão de escoamento reduzida em média 10,96 %, enquanto a barra de 12,5 mm 11,37 % e a barra de 16 mm cerca de 24,34%. Quando a redução da seção passou para 2D/3, a barra de diâmetro 10 mm, reduziu em média sua

tensão de escoamento quando comparada à amostra sem corrosão em 29,54%, enquanto a amostra de 12,5 mm apresentou uma redução de 25,79% e a de 16 mm uma redução de 29,53 %, como pode-se observar na Tabela 9.

Tabela 9 - Redução da tensão de escoamento de acordo com a profundidade do pite

D (mm)	Redução (%)	
	Amostras com corrosão 1D/3	Amostras com corrosão 2D/3
10	10,96	29,54
12,5	11,37	25,79
16	24,34	29,53

Fonte: Autor (2018)

Na Tabela 9 é possível concluir portanto que quanto menor o diâmetro das barras e mais profundo o pite for, maior será a redução da resistência ao escoamento. Em contrapartida, barras com maiores diâmetros acabam, mesmo com pites de menor profundidade, apresentando uma redução média significativa da resistência ao escoamento. Isto leva a concluir que os efeitos da corrosão são mais severos em barras de maior diâmetro sob a perspectiva da resistência ao escoamento.

4.2.2 Tensão Máxima (f_{st})

A tensão de máxima, consoante com a tensão de escoamento, apresentou praticamente o mesmo comportamento para as amostras dos três diâmetros, uma queda a medida que o pite se aprofundava. Na Tabela 10 pode-se perceber, que a tensão máxima mínima exigida pela norma só foi satisfeita nas amostras que não apresentavam corrosão e em duas amostras corroídas de diâmetro 12,5 e 16 mm.

Tabela 10 - Tensão Máxima

D (mm)	Amostras sem corrosão				Amostras com corrosão 1D/3				Amostras com corrosão 2D/3			
	CP	f_{st} (MPa)	\bar{x} (Mpa)	S	CP	f_{st} (MPa)	\bar{x} (Mpa)	S	CP	f_{st} (MPa)	\bar{x} (Mpa)	S
10	A1-1	673,58	674,47	2,18	A2-1	533,72	530,99	5,62	A3-1	437,68	422,49	20,10
	A1-2	675,16			A2-2	535,30			A3-2	419,32		
	A1-3	671,48			A2-3	532,28			A3-3	388,62		
	A1-4	677,39			A2-4	533,33			A3-4	447,13		
	A1-5	673,85			A2-5	519,82			A3-5	417,87		
	A1-6	587,65			A2-6	531,49			A3-6	424,30		
12,5	B1-1	670,57	664,30	3,94	B2-1	515,57	531,59	12,23	B3-1	439,91	431,05	11,67
	B1-2	663,18			B2-2	535,47			B3-2	410,35		
	B1-3	664,61			B2-3	533,53			B3-3	440,58		
	B1-4	665,70			B2-4	550,50			B3-4	430,51		
	B1-5	663,27			B2-5	533,45			B3-5	438,73		
	B1-6	658,48			B2-6	521,02			B3-6	426,22		
16	C1-1	649,80	644,92	6,30	C2-1	537,31	531,86	12,84	C3-1	389,35	406,02	14,31
	C1-2	645,09			C2-2	514,50			C3-2	422,40		
	C1-3	650,01			C2-3	552,17			C3-3	418,15		
	C1-4	636,63			C2-4	530,18			C3-4	388,37		
	C1-5	640,99			C2-5	533,77			C3-5	409,90		
	C1-6	651,90			C2-6	523,21			C3-6	407,95		

Observações:

* O aparelho de tração não mediu esta propriedade

Erro no Ensaio de tração

Dados que atenderam aos parâmetros de norma

Dados que não atenderam aos parâmetros de norma

Fonte: Autor (2018)

A barra com o diâmetro de 10 mm, quando perdeu 1D/3 de sua seção transversal teve sua tensão de máxima reduzida em 21,27 %, enquanto a barra de 12,5 mm 19,98 % e a barra de 16 mm 17,53%. Quando a redução da seção passou para 2D/3, a barra de diâmetro 10 mm, reduziu sua tensão máxima quando comparada à amostra sem corrosão em 37,36 %, enquanto a amostra de 12,5 mm apresentou uma redução de 35,11% e a de 16 mm uma redução de 37,04 %, como pode-se observar na Tabela 11.

Tabela 11 - Redução da tensão última

D (mm)	Redução (%)	
	Amostras com corrosão 1D/3	Amostras com corrosão 2D/3
10	21,27	37,36
12,5	19,98	35,11
16	17,53	37,04

Fonte: Autor (2018)

Com a Tabela 11 é possível concluir que, diferente da tensão de escoamento, os diâmetros apresentaram reduções percentuais próximas na tensão última para uma mesma profundidade do pite.

4.2.3 Alongamento Final (*A*)

O taxa do alongamento final, como esperado, também foi reduzindo a medida que o pite se aprofundava. Igualmente a tensão máxima, o alongamento só obteve resultados de acordo com a norma nas amostras que não apresentaram corrosão, como pode ser observado na Tabela 12.

Tabela 12 - Alongamento Final

(continua)

D (mm)	Amostras sem corrosão				Amostras com corrosão 1D/3				Amostras com corrosão 2D/3			
	CP	A (%)	\bar{x} (Mpa)	S	Amostra	A (%)	\bar{x} (Mpa)	S	CP	A (%)	\bar{x} (Mpa)	S
10	A1-1	8,84	9,03	0,22	A2-1	1,06	0,60	0,33	A3-1	0,15	0,30	0,11
	A1-2	9,34			A2-2	0,45			A3-2	0,30		
	A1-3	8,87			A2-3	0,60			A3-3	0,46		
	A1-4	9,09			A2-4	0,60			A3-4	0,30		
	A1-5	8,81			A2-5	0,15			A3-5	0,30		
	A1-6	0,60			A2-6	0,75			A3-6	0,15		
12,5	B1-1	9,70	9,40	0,62	B2-1	0,91	0,92	0,30	B3-1	0,76	0,41	0,23
	B1-2	8,73			B2-2	0,45			B3-2	0,15		
	B1-3	9,24			B2-3	0,85			B3-3	0,30		
	B1-4	10,49			B2-4	1,06			B3-4	0,61		
	B1-5	9,12			B2-5	1,37			B3-5	0,30		
	B1-6	9,12			B2-6	0,91			B3-6	0,30		
16	C1-1	7,27	12,88	0,63	C2-1	2,13	2,02	0,42	C3-1	0,30	0,66	0,28
	C1-2	12,50			C2-2	1,96			C3-2	0,30		
	C1-3	12,42			C2-3	2,27			C3-3	0,92		
	C1-4	13,51			C2-4	2,12			C3-4	0,76		
	C1-5	13,64			C2-5	2,42			C3-5	0,76		
	C1-6	12,35			C2-6	1,21			C3-6	0,91		

Tabela 13 - Alongamento Final**(conclusão)**

Observações:	
*	O aparelho de tração não mediu esta propriedade
	Erro no Equipamento de tração
	Dados que atingiram o padrão de qualidade
	Dados que não atingiram o padrão de qualidade

Fonte: Autor (2018)

As barras com corrosão de 1D/3 reduziram seu alongamento em 93,32% , 90,17% e 84,33% , enquanto para as barras com 2D/3 de corrosão as porcentagens foram de 96,92%, 95,69% e 94,88, todas, respectivamente para as barras de 10 mm, 12,5 mm e 16 mm, como demonstrado na Tabela 13.

Tabela 14 - Redução do Alongamento

D (mm)	Redução (%)	
	Amostras com corrosão 1D/3	Amostras com corrosão 2D/3
10	93,32	96,92
12,5	90,17	95,69
16	84,33	94,88

Fonte: Autor (2018)

Neste caso é possível perceber que quanto menor o diâmetro maior é a redução do alongamento, principalmente quando a corrosão é de 1D/3. Ademais pode-se concluir que os efeitos da corrosão simulada levam a uma significativa redução das propriedades mecânicas das armaduras, principalmente quanto ao alongamento final.

4.3 ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS VS GRAU DE CORROSÃO

4.3.1 Tensão de escoamento (f_y)

O APÊNDICE B1 – Grau de corrosão e tensão de escoamento, apresenta os valores da tensão de escoamento de acordo com o grau de corrosão de cada corpo de prova, é possível observar que independente do diâmetro, a tensão de escoamento permaneceu dentro dos parâmetros da norma até o grau de corrosão

de 0,275 %, enquanto valores superiores a 0,295 % não atenderam o parâmetro mínimo da norma.

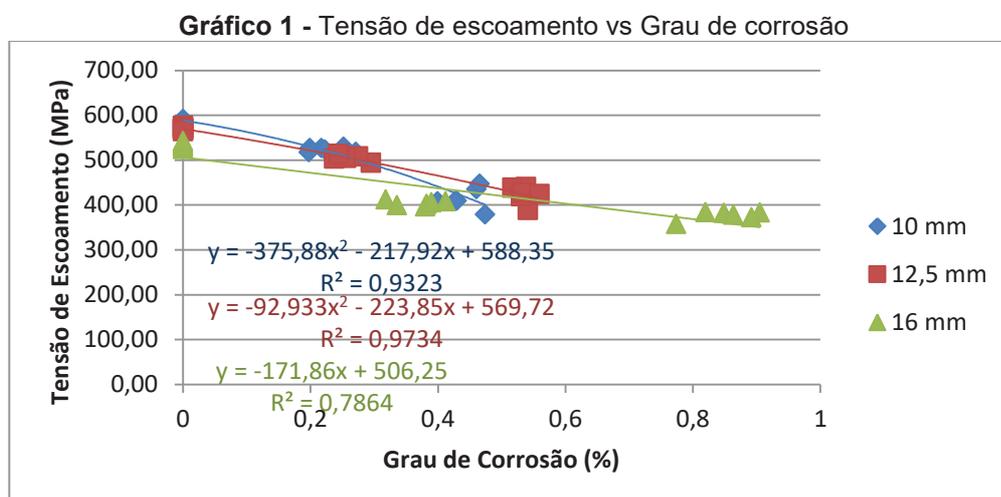
Para melhor visualização, a Tabela 14 mostra a redução média da tensão de escoamento de acordo com a média do grau de corrosão. Como abordado no capítulo anterior, é visível que as barras de diâmetro de 16 mm, são mais sensíveis à redução desta propriedade, desta maneira, apresenta pouca variação na redução quando comparado com diferença do grau de corrosão dos outros diâmetros com pites de profundidade 1D/3 e 2D/3.

Tabela 15 - Redução da tensão de escoamento

D (mm)	PP	CP	\bar{G}	S (mm)	\bar{f}_y (MPa)	S (MPa)	Redução média (%)
10	0	A1-X	-	-	-	-	-
	1D/3	A2-X	0,2267	0,0295	523,403	5,190	10,96
	2D/3	A3-X	0,4427	0,0288	414,228	24,154	29,54
12,5	0	B1-X	-	-	-	-	-
	1D/3	B2-X	0,2603	0,0213	505,013	6,529	11,37
	2D/3	B3-X	0,5367	0,0141	422,828	18,550	25,79
16	0	C1-X	-	-	-	-	-
	1D/3	C2-X	0,3697	0,0353	403,782	5,743	24,34
	2D/3	C3-X	0,8507	0,0484	376,097	10,111	29,53

Fonte: Autor (2018)

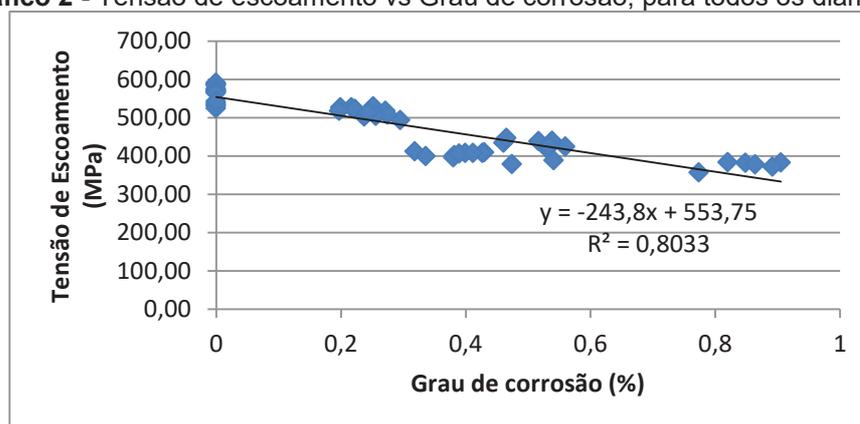
O gráfico 1, apresenta a equação e o coeficiente de determinação (R^2). A partir deste gráfico pode-se observar que o coeficiente de determinação é maior quando analisa-se as amostras de 12,5 mm.



Fonte: Autor (2018)

Ao tentar correlacionar a tensão de escoamento com o grau de corrosão das amostras de todos os diâmetros, o coeficiente de correlação da equação gerada, que mais se alinhou a realidade física, apresentou o valor de 0,8033, como mostra o Gráfico 2.

Gráfico 2 - Tensão de escoamento vs Grau de corrosão, para todos os diâmetros



Fonte: Autor (2018)

4.3.2 Tensão última (f_{st})

De maneira análoga a tensão de escoamento, a tensão última decaiu a medida que o grau de corrosão aumentava, como pode ser visto no APÊNDICE B2 – Grau de corrosão e tensão última.

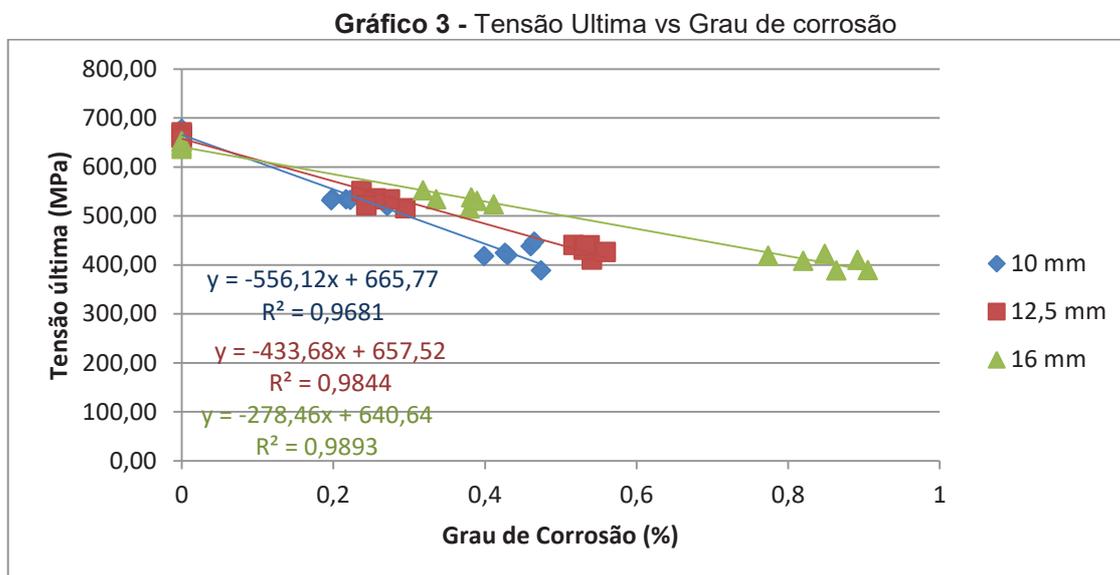
Percebe-se que quanto maior o diâmetro maior o grau de corrosão, porém, as taxas de redução quando comparadas com a profundidade do pite, permaneceram próximas umas as outras. Como pode ser visto na Tabela 15

Tabela 16 - Redução média da tensão última

D (mm)	PP	CP	G (%)	S (%)	fst	S (MPa)	Redução média (%)
10	0	A1-X	-	-	674,470	2,472	-
	1D/3	A2-X	0,227	0,030	530,990	5,625	21,27
	2D/3	A3-X	0,443	0,029	422,487	20,098	37,36
12,5	0	B1-X	-	-	664,30	3,94	-
	1D/3	B2-X	0,260	0,021	531,590	12,233	19,98
	2D/3	B3-X	0,537	0,014	431,050	11,665	35,11
16	0	C1-X	-	-	644,92	5,64	-
	1D/3	C2-X	0,370	0,035	531,857	12,844	17,53
	2D/3	C3-X	0,851	0,048	406,020	14,308	37,04

Fonte: Autor (2018)

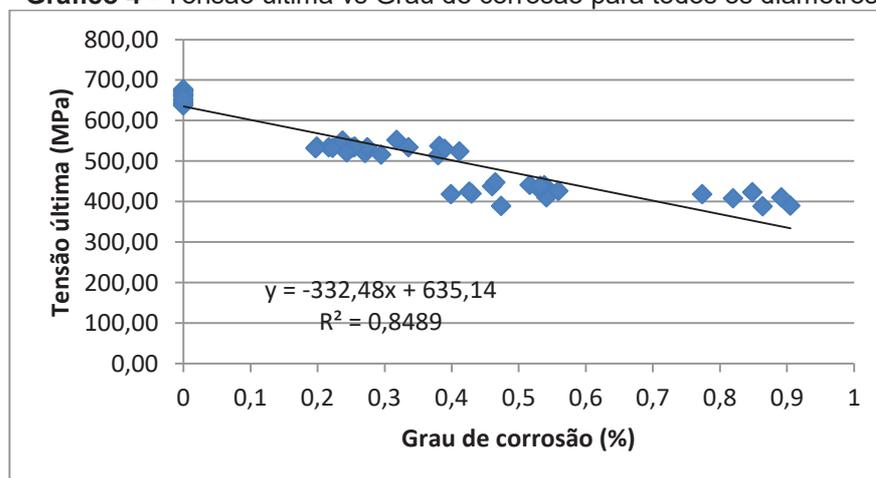
No Gráfico 3, pode-se perceber pelo coeficiente de determinação que as amostras de diâmetro de 16 mm, apresentaram melhor correlação.



Fonte: Autor (2018)

Ao tentarmos plotar um gráfico para todos os diâmetros o coeficiente de correlação cai bastante, indo para 0,8489.

Gráfico 4 - Tensão última vs Grau de corrosão para todos os diâmetros



Fonte: Autor (2018)

4.3.3 Alongamento (A)

Como explanado anteriormente, o alongamento foi a propriedade que teve a mais severa mudança. No APÊNDICE B3 – Grau de corrosão e Alongamento,

pode-se perceber que os menores diâmetros apresentam com o menor valor de grau de corrosão uma taxa elevada de redução do alongamento, enquanto o maior diâmetro apresenta uma redução parecida para taxas mais elevadas de grau de corrosão. Na tabela 16, fica mais explícito o que fora citado acima.

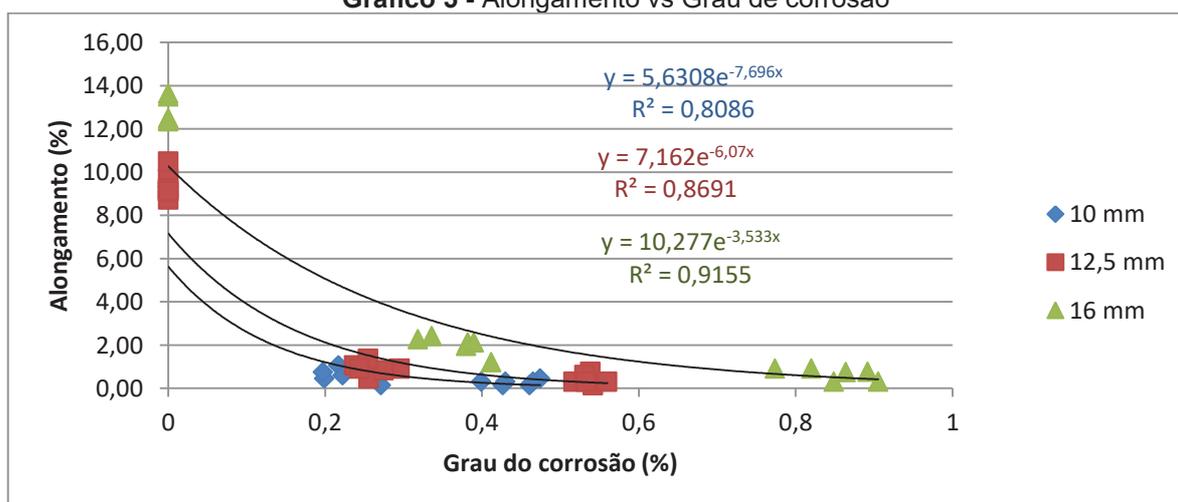
Tabela 17 - Redução do Alongamento

D (mm)	PP	CP	G (%)	S (%)	A (%)	S (MPa)	Redução média(%)
10	0	A1-X	-	-	9,029	0,238	-
	1D/3	A2-X	0,227	0,030	0,603	0,301	93,32
	2D/3	A3-X	0,443	0,029	0,278	0,115	96,92
12,5	0	B1-X	-	-	9,40	0,62	-
	1D/3	B2-X	0,260	0,021	0,924	0,299	90,17
	2D/3	B3-X	0,537	0,014	0,405	0,231	95,69
16	0	C1-X	-	-	12,88	0,57	-
	1D/3	C2-X	0,370	0,035	2,018	0,424	84,33
	2D/3	C3-X	0,851	0,048	0,659	0,283	94,88

Fonte: Autor (2018)

No gráfico a seguir pode-se perceber que o coeficiente de determinação foi maior para o diâmetro de 16 mm, mas mesmo assim, comparando com os R^2 das outras propriedades, o alongamento apresentou, em geral, os piores coeficientes.

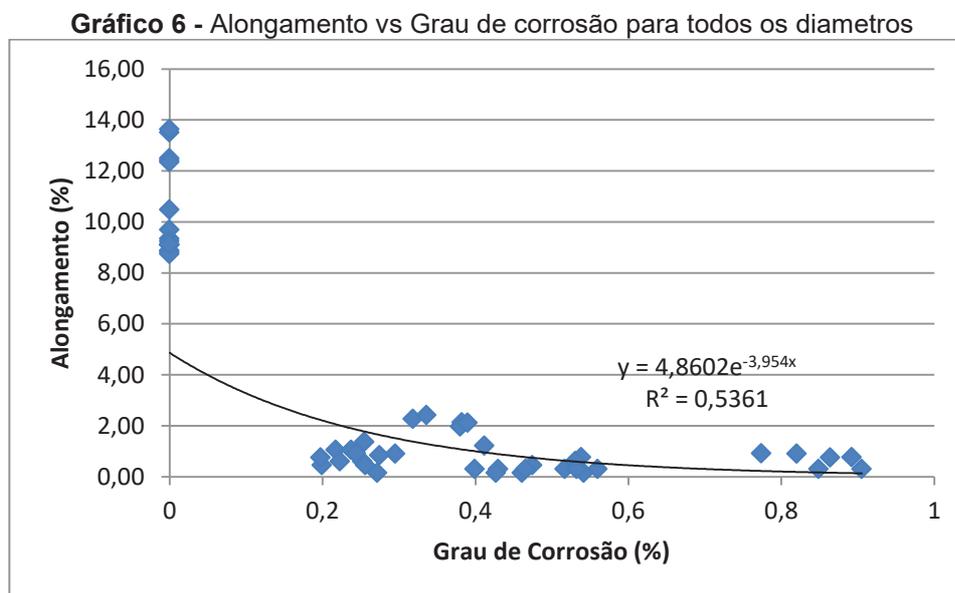
Gráfico 5 - Alongamento vs Grau de corrosão



Fonte: Autor (2018)

Procurando analisar se existe uma proporção para ao alongamento e o grau de corrosão para todos os diâmetros plotou-se todos os dados em um só gráfico. O

Gráfico 6 mostra que o coeficiente de correlação para o alongamento, sendo ele 0,5361.



4.4 ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS VS MUDANÇA DE EXCENTRICIDADE

4.4.1 Tensão de escoamento (f_y)

De modo análogo as barras de diâmetro de 10 mm, as barras de diâmetro de 12,5 mm e 16 mm, apresentaram o mesmo comportamento, observa-se no APÊNDICE C1 – Excentricidade e tensão de escoamento, que a medida que a excentricidade da seção transversal do corpo de prova aumenta em módulo, a sua tensão de escoamento cai, a variação da redução média da tensão de escoamento deu-se de 0 à 29,54 % para o diâmetro de 10 mm, 0 à 25,79 % para o diâmetro de 12,5 mm e de 0 à 29,53 % para o diâmetro de 16 mm

Comparando as a tabela abaixo, consegue-se identificar uma relação então a excentricidade média de cada situação e a redução percentual média das amostras, como podemos ver no tabela a seguir. Independentemente do diâmetro da barra, as excentricidades mostraram um certo padrão na redução da tensão de escoamento. As excentricidades médias das situações A2-X e B2-X, correspondentes à -0,6692 e -0,8472, apresentaram redução próximas, em torno de 11 %, enquanto as

excentricidades de A3-X, B3-X, C2-X e C3-X, apresentaram redução entre 24 e 29,53%.

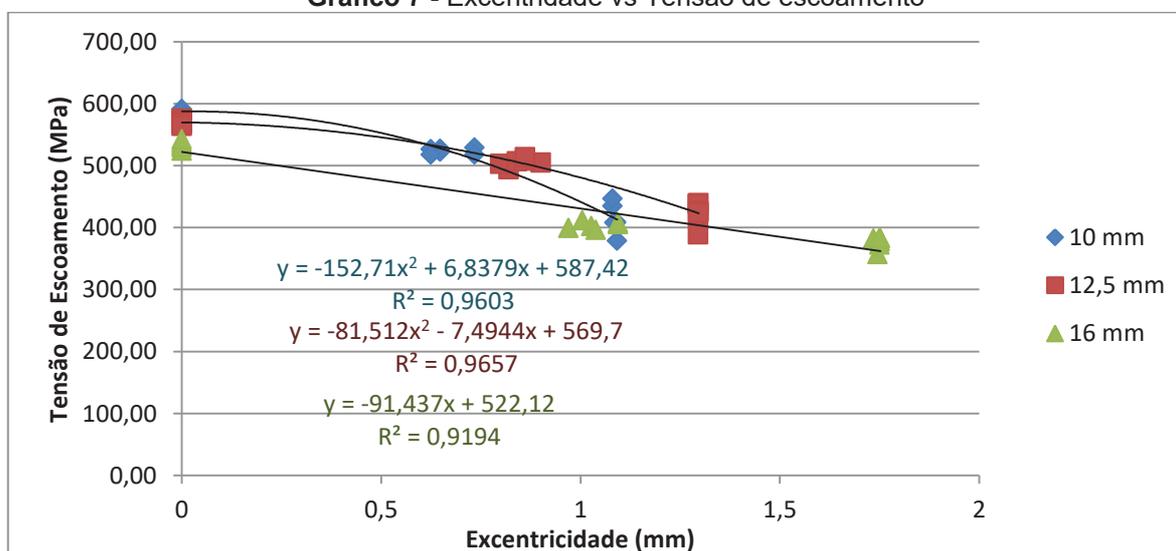
Tabela 18 - Redução média da tensão de escoamento

D (mm)	PP	CP	Excentricidade média (mm)	S (mm)	Redução f_y média (%)
10	0	A1-X	-	-	-
	1D/3	A2-X	-0,6692	0,0518	10,96
	2D/3	A3-X	-1,0862	0,0048	29,54
12,5	0	B1-X	-	-	-
	1D/3	B2-X	-0,8472	0,0355	11,37
	2D/3	B3-X	-1,2956	0,0009	25,79
16	0	C1-X	-	-	-
	1D/3	C2-X	-1,0383	0,0494	24,34
	2D/3	C3-X	-1,7474	0,0065	29,53

Fonte: Autor (2018)

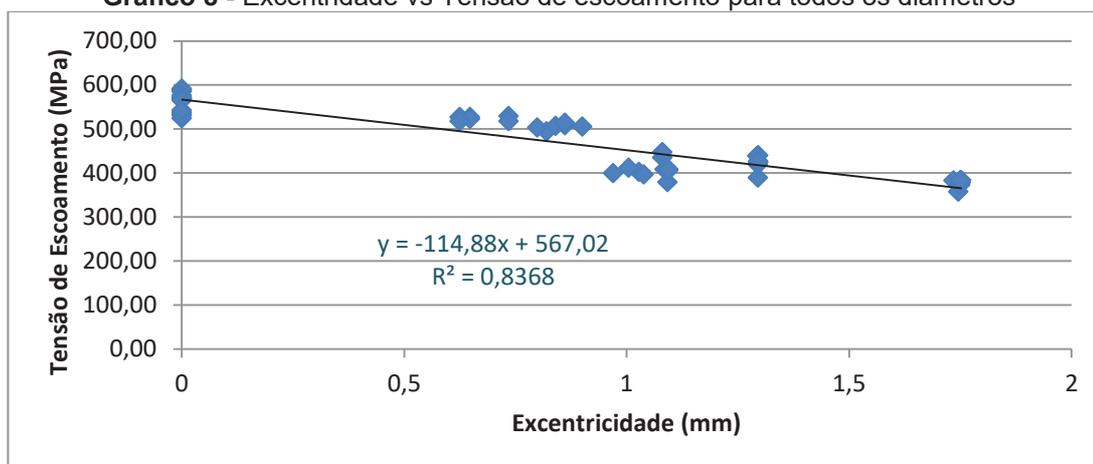
O Gráfico 7 evidencia a queda da tensão de escoamento a medida que a excentricidade gerada pelo pite aumenta em módulo.

Gráfico 7 - Excentricidade vs Tensão de escoamento



Fonte: Autor (2018)

. Plotando todas amostras no Gráfico 8, pode-se observar um coeficiente de determinação entre a redução da tensão de escoamento com a excentricidade ($R^2=0,8368$), maior que o coeficiente de correlação entre a tensão de escoamento com o grau de corrosão ($R^2=0,8033$).

Gráfico 8 - Excentricidade vs Tensão de escoamento para todos os diâmetros

Fonte: Autor (2018)

4.4.2 Tensão última (f_{st})

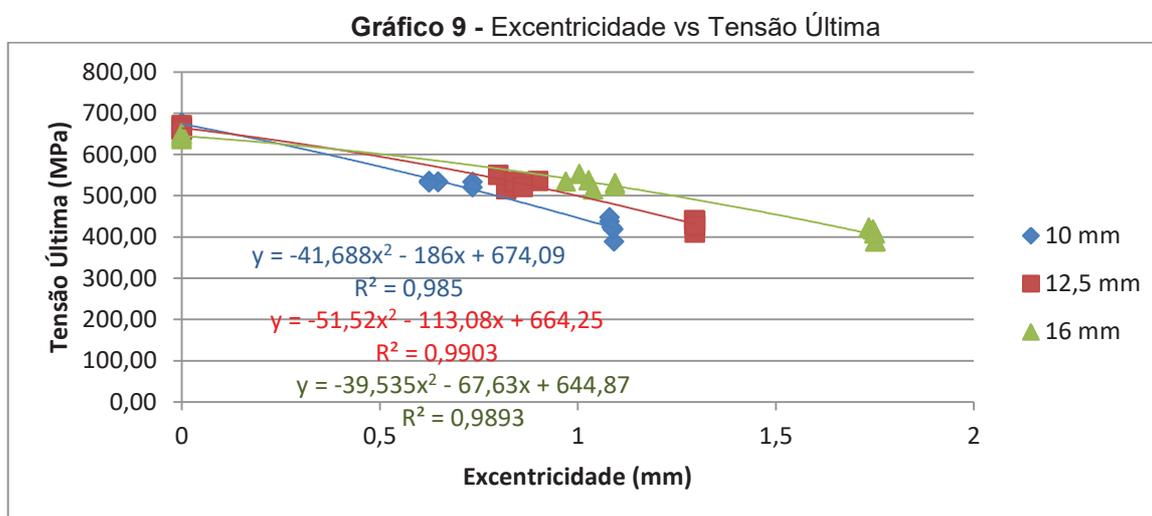
Os valores da excentricidade quando comparados a tensão última de escoamento apresentaram, como na tensão de escoamento, uma queda de acordo com o seu aumento em módulo, como pode ser visto no APÊNDICE C2 – Excentricidade e tensão última. A tabela 18 apresenta as médias da excentricidade para cada profundidade de pite e sua respectiva redução quando comparado com a amostra de referência, para o diâmetro de 10 mm a queda deu-se de 21,27% para 37,36% com o aumento da excentricidade. Os valores da excentricidade quando comparados a tensão última, para o diâmetros de 12,5 mm e 16 mm, também apresentaram uma queda de acordo com o seu aumento em módulo, a queda para o diâmetro de 12,5 mm deu-se de 19,98 % para 35,11 % e para o diâmetro de 16 mm , 17,53% e 37,04 % com o aumento da excentricidade

Tabela 19 - Redução média da tensão última

D (mm)	PP	CP	Excentricidade média (mm)	S (mm)	Redução média da f_{st} (%)
10	0	A1-X	-	-	-
	1D/3	A2-X	-0,6692	0,0518	21,27
	2D/3	A3-X	-1,0862	0,0048	37,36
12,5	0	B1-X	-	-	-
	1D/3	B2-X	-0,8472	0,0355	19,98
	2D/3	B3-X	-1,2956	0,0009	35,11
16	0	C1-X	-	-	-
	1D/3	C2-X	-1,0383	0,0494	17,53
	2D/3	C3-X	-1,7474	0,0065	37,04

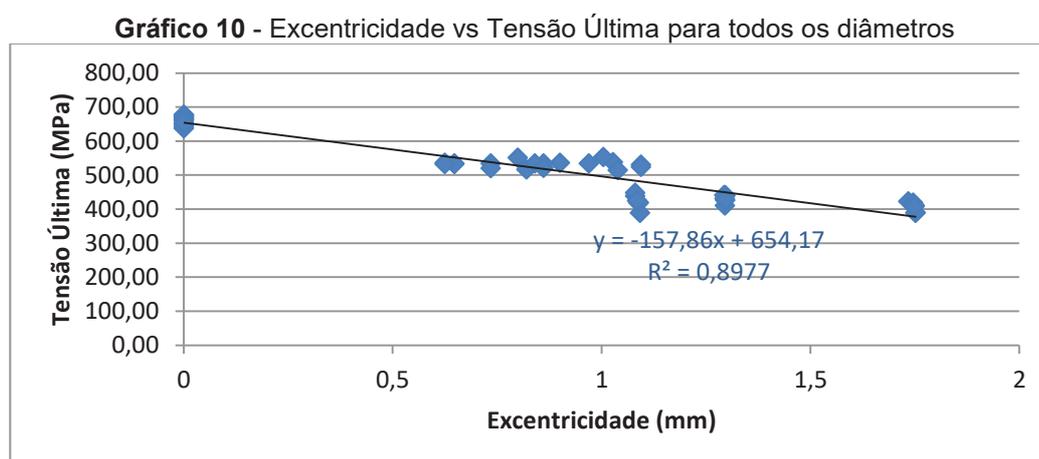
Fonte: Autor (2018)

O Gráfico 9, mostra que separadas pelos diâmetros, todas as correlações são ótima, e maiores quando comparada as correlações do grau de corrosão.



Fonte: Autor (2018)

O Gráfico 10, apresenta os valores obtidos de cada amostra ensaia, nele, é possível, ver a tendência de quanto maior a excentricidade em módulo, maior é a queda, e que esta queda respeita uma linha de tendência de coeficiente de correlação igual a 0,8977.



Fonte: Autor (2018)

4.4.3 Alongamento Final

Ao analisarmos o APÊNDICE C3 – Excentricidade e Alongamento, percebe-se que o menor diâmetro, 10 mm, é mais sensível a mudança de excentricidade,

enquanto os maiores diâmetros precisam de uma mudança maior em modulo para que chegue a uma redução de alongamento próxima ao diâmetro de 10 mm.

A Tabela 19, mostra a relação da excentricidade com a redução média do alongamento para cada diâmetro.

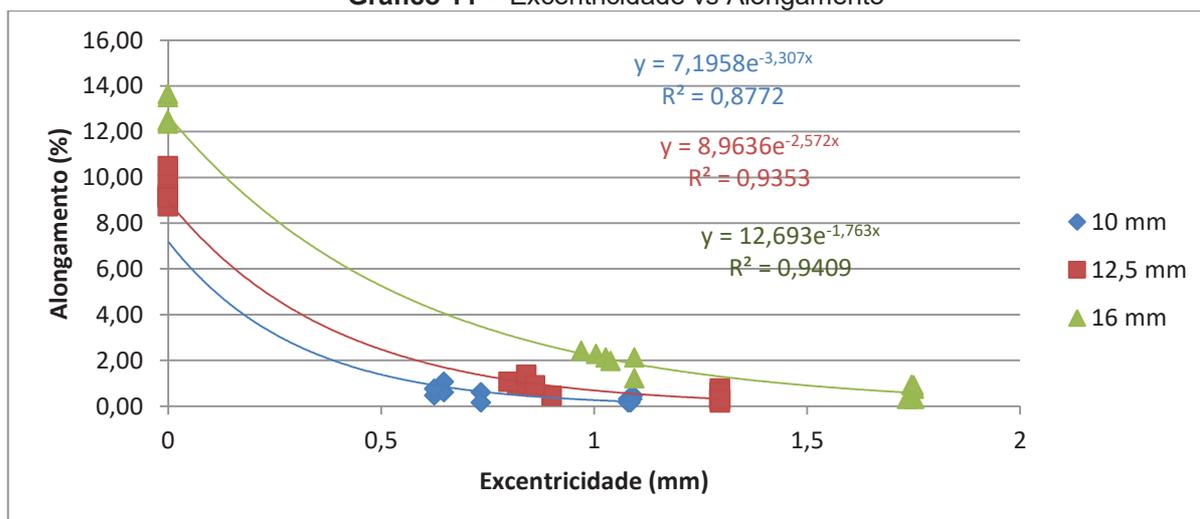
Tabela 20 - Redução média do alongamento

D (mm)	PP	CP	\bar{e} (mm)	S (mm)	Redução média de A (%)
10	0	A1-X	-	-	-
	1D/3	A2-X	-0,6692	0,0518	93,32
	2D/3	A3-X	-1,0862	0,0048	96,92
12,5	0	B1-X	-	-	-
	1D/3	B2-X	-0,8472	0,0355	90,17
	2D/3	B3-X	-1,2956	0,0009	95,69
16	0	C1-X	-	-	-
	1D/3	C2-X	-1,0383	0,0494	84,33
	2D/3	C3-X	-1,7474	0,0065	94,88

Fonte: Autor (2018)

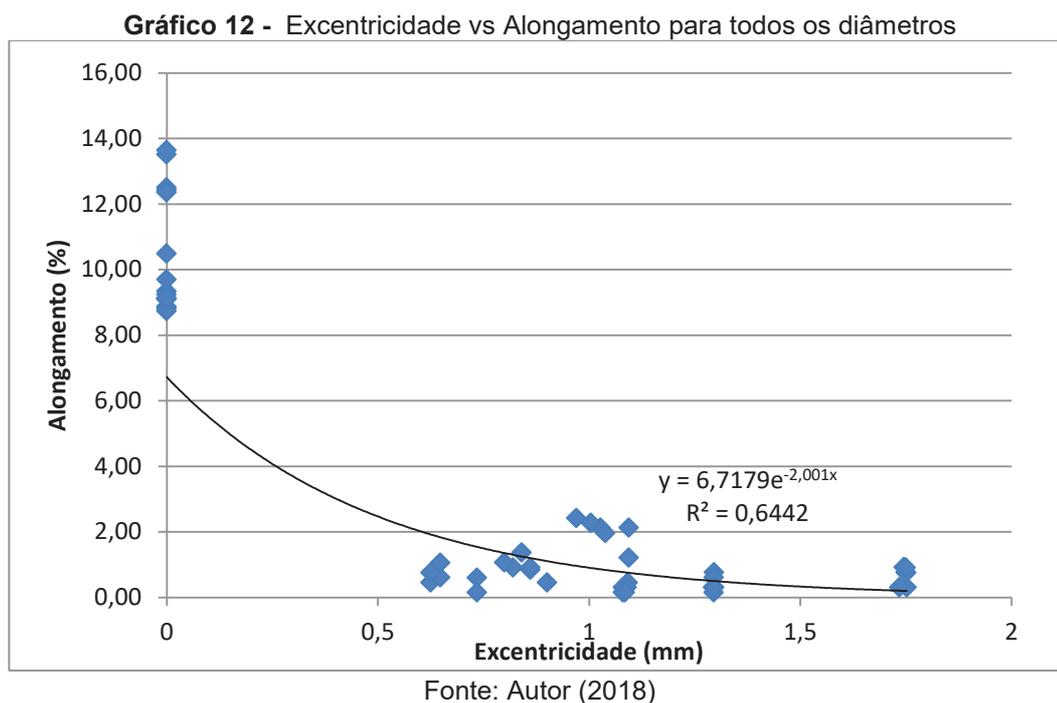
O gráfico 11, mostra a linha de tendência para cada diâmetro, pode-se observar que o diâmetro de 16 mm apresenta um melhor coeficiente de determinação quando comparado aos outros diâmetros.

Gráfico 11 - Excentricidade vs Alongamento



Fonte: Autor (2018)

O Gráfico 12 apresenta a linha de tendência para todas as amostras.



4.5 COMPARAÇÃO DOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO (R^2)

Comparando as análises dos capítulos 4.3 e 4.4, podemos afirmar que o grau de confiança é maior quando comparamos as propriedades (Tensão de escoamento, tensão última e alongamento) com a excentricidade gerada. A Tabela 20, apresenta o coeficiente de determinação (R^2) para cada situação.

Tabela 21 - Coeficiente de Determinação para as correlações

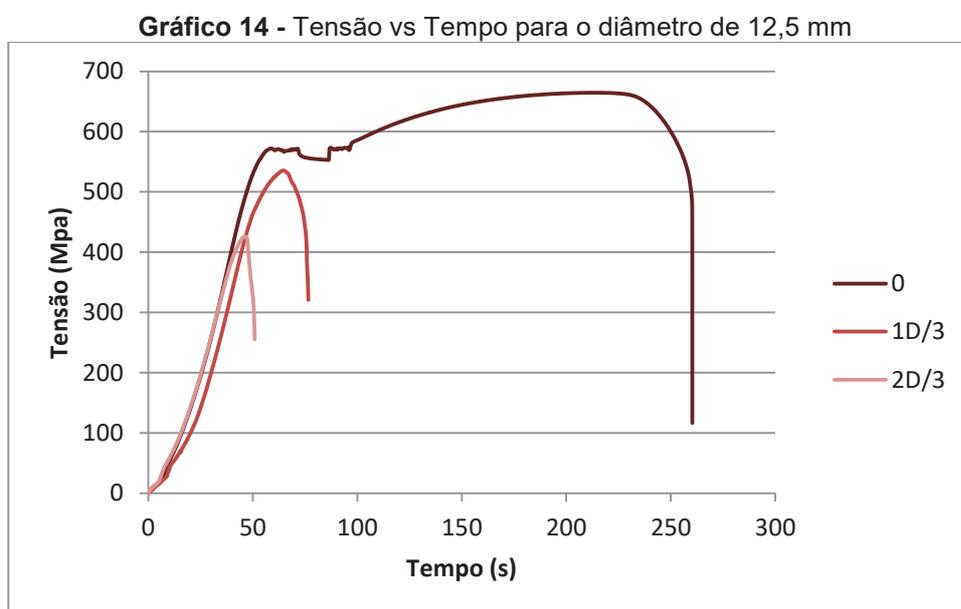
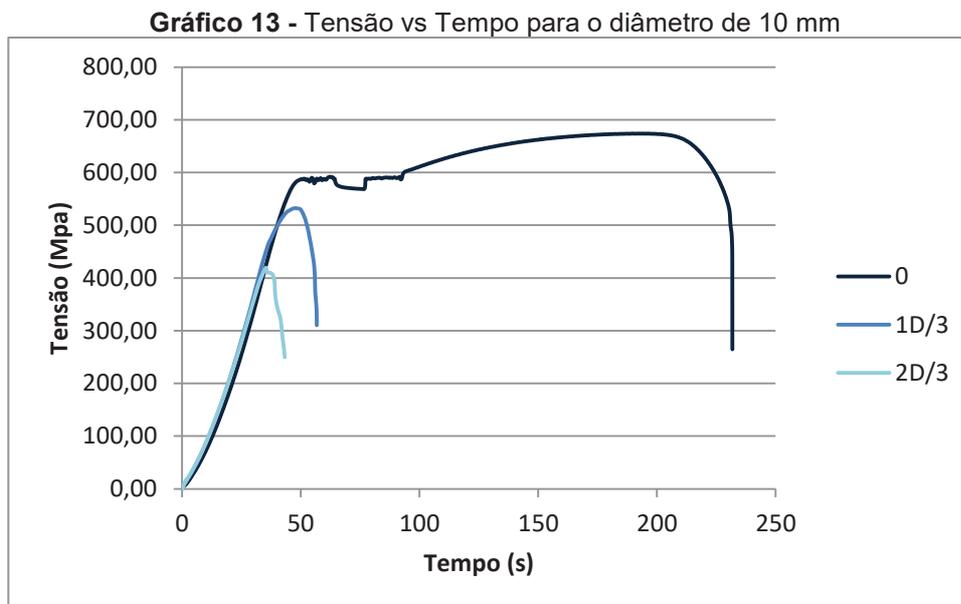
Diâmetros	Tensão de escoamento f_y		Tensão Última f_{st}		Alongamento A	
	G	E	G	e	G	E
	R^2		R^2		R^2	
10 mm	0,9323	0,9603	0,9681	0,9850	0,8086	0,8772
12,5 mm	0,9734	0,9657	0,9844	0,9903	0,8691	0,9353
16 mm	0,7804	0,9194	0,9893	0,9893	0,9155	0,9409
Todos	0,8033	0,8368	0,8498	0,8977	0,5361	0,6442

Fonte: Autor (2018).

4.6 COMPARAÇÃO DOS GRÁFICOS DE TENSÃO VS TEMPO

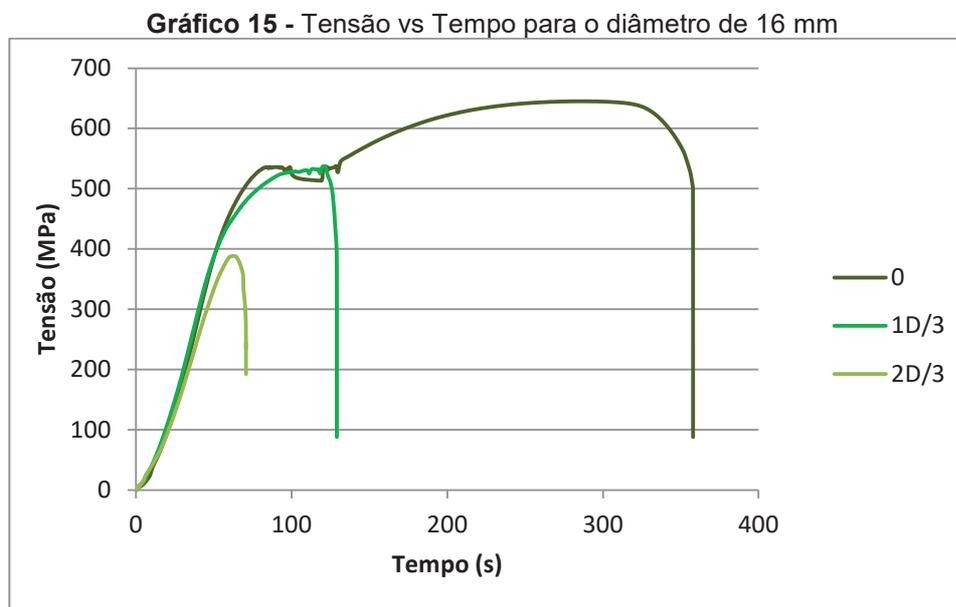
Os Gráficos 13, 14 e 15, apresentam o diagrama tensão vs tempo dos diâmetros de 10 mm, 12,5 mm e 16 mm, respectivamente, para todos as profundidades, dessa maneira, consegue-se perceber facilmente a queda da tensão.

No Gráfico 13, é possível notar que igualmente ao Gráfico 14, quando a profundidade atinge 1D/3, já não existe patamar de escoamento, isso mostra que ocorre a ruptura imediatamente após a fase elástica para os diâmetros de 10 e 12,5 mm.



Diferente dos menores diâmetros, o Gráfico 15, que apresenta o comportamento do diagrama tensão vs tempo para o diâmetro de 16 mm, apresenta um pequeno patamar de escoamento para o pite de profundidade de 1D/3, nesse caso, além do comportamento plástico, a barra de 16 mm que contém o pite de 1D/3

apresenta também, um pequeno comportamento elástico antes da ruptura. Já para a profundidade de $2D/3$, o comportamento é condizente com os outros diâmetros, passando somente pelo patamar plástico antes da ruptura.



Fonte: Autor (2018).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho trata dos efeitos da corrosão simulada nas propriedades mecânicas de armaduras corroídas através da simulação de pites. As principais conclusões deste trabalho são:

- Há um decréscimo significativo da tensão de escoamento quando as amostras de diâmetro de 10 mm e 12,5 mm, apresentaram profundidade do pite $2D/3$ e quando as amostras de 16 mm apresentaram profundidade $1D/3$.
- Decréscimo significativo na tensão máxima foram observados quando tomando a média da tensão máxima das amostras de cada diâmetro, os diâmetros que apresentavam pite não atingiram o padrão exigido em norma.
- O alongamento teve o maior decréscimo em relação a outras propriedades mecânicas para todas as barras analisadas a medida que o pite se aprofundava.
- Melhores correlações foram obtidas quando as propriedades mecânicas foram relacionadas com as excentricidades em comparação às relações das propriedades mecânicas para com o grau de corrosão, visto que o grau de corrosão não interpreta a redução pontual de seção transversal de uma barra.
- Nas barras corroídas houve a supressão do patamar de escoamento nos casos onde havia corrosão de $1D/3$ e $2D/3$ para as barras de 10 e 12,5 mm, e para a barra de 16 mm, o patamar de escoamento não apareceu somente para corrosão de $2D/3$.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI COMITE 201. **GUÍA PARA LA DURABILIDAD DEL HÓRMIGON.** American Concrete Institute, Farmington Hills, 2001. Disponível em: <https://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/publicom/ACI_201_2R_01.pdf>. Acesso em Mar. 2018.

ALMUSALLAN, A.A. **Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing.** Construction and Building Materials, v.15, p. 361–368, Jan. 2001.

ALONSO, C.A.; CASTELLOTE, M.; ANDRADE, C. **Chloride threshold dependence of pitting potential of reinforcements.** Electrochimica Acta, v. 47, n. 21, p. 3469–3481, Ago. 2002.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G46 - 94 – Standard Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion,** 2013.

ANGST, U. et al.,. **Critical chloride content in reinforced concrete — A review** Cement and Concrete Research, v 39 p.1122–1138, Ago. 2009

APOSTOLOPOULOS, C.A. **The Influence of Corrosion and Cross-Section Diameter on the Mechanical Properties of B500c Steel.** JMEPEG, v.18, n. 2, p. 190–195, Mar. 2009.

APOSTOLOPOULOS, C.A.; DEMIS, S.; PAPADAKIS, V.G. **Chloride-induced corrosion of steel reinforcement - Mechanical performance and pit depth analysis.** Construction and Building Material, v.38, p. 139-146, Jan. 2013.

APOSTOLOPOULOS, C.A.; MICHALOPOULOS, D.; KOUTSOUKOS, P. **The corrosion effects on the structural integrity of reinforcing steel.** Journal of Materials and Engineering and Performance, v.17, n. 4, p. 506–516, Ago. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 6892-1 – Materiais metálicos - Ensaio de tração a temperatura ambiente - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISSO 7480 – Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado - Especificações.** Rio de Janeiro, 2007.

BALESTRA, Carlos Eduardo Tino. **Influência do grau de corrosão na resistência à tração de armaduras – Estudo de caso das fundações da Nova Ala Zero do ITA. 2013. 162f.** Dissertação de mestrado em Engenharia de Infraestrutura Aeroportuária – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, 2013.

BALESTRA, Carlos Eduardo Tino, et al. **Corrosion degree effect on nominal and effective strengths of reinforcement naturally corroded.** Journal of Materials in Civil Engineering, v. 28, n. 10, p. 04016103-(1-9), 2016.

BARRIOS, D.F. **La vida útil del Amira ya fue superada.** Jornal El Heraldo, Colômbia. Jan. 2017. Disponível em: < <https://www.elheraldo.co/barranquilla/la-vida-util-del-amira-ya-fue-superada-323967>> Acesso em fev. 2018.

BASTOS P. S. S. **Apostila: Fundamentos do concreto armado.** Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2015. Disponível em: <<http://coral.ufsm.br/decc/ECC1006/Downloads/FUNDAMENTOS.pdf>> acesso em mar. de 2018.

BIEZMA M. V., M. V.; CRISTOBAL, J. R. S. Methodology to study cost of corrosion. **Corrosion Engineering, Science and Technology**, v.40, n.4, p. 344-352, 2005.

CAINES S., KHAN F., SHIROKOFF J. **Analysis of pitting corrosion on steel under insulation in marine Environments.** Journal of Loss Prevention in the Process Industries. V. 26 p. 1466-1483, set. 2013.

CAIRNS, J. et al. **Mechanical Properties of Corrosion-Damaged Reinforcement.** ACI Materials Journal, v. 102, n.04, p. 256- 264, Jul - Ago 2005.

CALLISTER, William D. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução.** 7. Ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2008.

CARVALHO, R.C.; FIGUEIREDO FILHO, J.R. **Cálculo e Detalhamento de Estruturas usuais de Concreto Armado: segundo a NBR 6118/2003.** São Carlos, EdUFSCar, 2012, 3º edição, 367p.

CASCUDO, Oswaldo. **Inspeção e Diagnóstico de Estrutura de Concreto com Problemas de Corrosão da Armadura.** In: Isaia G.C. (ed.) *Concreto, Pesquisa e Realizações* v2. São Paulo: Ibracon, 2005. p. 1072-1108.

CORSINI R. **Projetos de estruturas de concreto expostas a ambientes quimicamente agressivos exigem atenção especial para assegurar desempenho e vida útil à edificação.** Revista Techné. Ed 196. Jul. 2013. Disponível em: < <http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/196/ambientes-agressivos-projetos-de-estruturas-de-concreto-expostas-a-294033-1.aspx>>. Acesso em Fev. 2018.

DUCATTI, V. A. **Concreto de elevado desempenho: estudo da aderência com armadura.** 1993. 259f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.1993.

FORTES, L. R.; ANDRADE, J. C. **Corrosão na Armadura do Concreto Armado: Influência dos Agentes Cloretos e da Carbonatação.** Engenharia, Fortaleza, v. 13, p. 85-96, 1995.

HELENE, P. **Contribuição ao Estudo da Corrosão em armaduras de Concreto Armado.** Tese (Livre docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, 1993.

HIBBELER, R.C. **Resistência dos Materiais**, 3.º Ed., Editora Livros Técnicos e Científicos, 2000.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Áreas Especiais: Cadastro de Municípios da Zona Costeira.** Brasília, 2007

JIN, Z.; ZHAO, X.; ZHAO, T.; YANG L. **Interaction between compressive load and corrosiveion attack on reinforced concrete with accelerated potentiostatic corrosion.** Construction and Building Materials, v. 113, p.805-814, 2016.

KOCH, G.H. et al. **Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States.** Relatório no FHWARD-01-156. Federal Highway Administration, U.S. Departament of transportation, Washington D.C., 2002

MANCINI, G.; TONDOLO, F.; IULIANO, L.; MINETOLA, P. **Local reinforcing bar damage in r.c. members due to accelerated corrosion and loading.** Construction and Building Materials, v. 69, p. 116–123, 2014.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto – microestrutura, propriedades e Materiais.** São Paulo, Editora IBRACON, 2008, 1º edição em português traduzida da 3º edição em inglês, 674p.

NAKAMURA J. **Cuidados para resistir à maresia**. Revista Techné, ed. 88, jul. 2004. Disponível em: <<http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/88/artigo286302-1.aspx>> Acesso em mar. de 2018.

ORTEGA, N. F.; ROBLES, S. I. **Assessment of Residual Life of concrete structures affected by reinforcement corrosion**. Hbrc Journal, In press corrected proof, 2014.

PALSSOM, R.; MIRZA, M. S. **Mechanical Response of Corroded Steel Reinforcement of Abandoned Concrete Bridge**. ACI Structural Journal, v. 99, n. 2, pag. 157- 162, March- April 2002.

PEREIRA, E.; RESENDE, A.; MEDEIROS, M. H. F.; MENEGHETTI L.C. **Ensaio acelerado por cloretos: efeito da sílica ativa, relação água/aglomerante e espessura de cobertura do concreto**. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, v. 6, n. 4, p.561-581, 2013.

POLITO, Giulliano. **Corrosão em estruturas de concreto armado: causas, mecanismos, prevenção e recuperação**. 191f. Trabalho de Conclusão de Curso em Especialização em Avaliação e Perícia – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, 2006.

RAMEZANIANPOUR, A. A.; GHAHARI, S. A.; ESMAEILI, M. **Effect of combined carbonation and chloride ion ingress by an accelerated test method on microscopic and mechanical properties of concrete**. Construction and Building Materials, v. 58, p.138-146, 2014.

REYES, F. E. G. **Análise da aderência entre barras de aço e concretos (cc, caa e caafa), sob influência de ações monotônicas e cíclicas**. 2009. 215 f. Dissertação (Mestrado de Pós-Graduação e Área de concentração em Engenharia de Estruturas - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

ROBERGE, Pierre R. **Handbook of corrosion engineering**. Nova York, EUA: McGrAW-Hill, 1999.

SILVA, A. R. **Corrosão em Armaduras de Espera Enterradas com 60 anos – Estudo de Caso das Fundações da Ala Zero do ITA**. 2010, 352p., Tese de Mestrado em Infraestrutura Aeronáutica, Área de Infraestrutura Aeroportuária. Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, São José dos Campos, SP, 2010.

TECKNICAS ESPECIAIS DE ENGENHARIA LTDA. **Pier da Vila – Ilhabela – SF Recuperação Estrutural.** Mai. 2015. Disponível em: <http://www.tecknicas.com.br/2016/05/05/pier-da-vila-ilhabela-sp-recuperacao-estrutural/>>. Acesso em abril 2018.

TORRES, A. S.; GUIMARÃES, D.; SILVA FILHO, L. C. P. D. **Avaliação do método CAIM de corrosão acelerada em diferentes condições de ensaio.** In: II Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica, Rio Grande, 2006.

UEDA T., TAKEWAKA K. **Performance-based standard specification for maintenance and repair of concrete structures in Japan.** Structural Engineering International, v.4. p. 359-366, 2007.

ZHU, W., et al. **Influences of corrosion degree and corrosion morphology on the ductility of steel reinforcement.** Construction and Building Material, v.148, p. 297-306, Maio 2017.

APÊNDICE A1 – Propriedades para o diâmetro de 10 mm

D = 10 mm - Área 78,54 mm ²												
CP	PP	Tensão de escoamento f_y (MPa)	Tensão última f_{st} (MPa)	Lt_o (mm)	Lt_f (mm)	Alongamento A (%)	Peso inicial (g)	Peso após o pite (g)	Grau de Corrosão G (%)	Excentricidade e (mm)	Área retirada da seção (mm ²)	Seção transversal perdida (%)
A1-2	0	587,57	675,16	332	363	9,34	203,00	203,00	0	0	-	-
A1-3		584,60	671,48	332,5	362	8,87	202,80	202,80	0	0	-	-
A1-4		591,24	677,39	330	360	9,09	201,96	201,96	0	0	-	-
A1-5		588,02	673,85	329	358	8,81	200,63	200,63	0	0	-	-
A2-1	1D/3	526,86	533,72	331,5	335	1,06	202,63	202,19	0,2171	-0,6478	12,16	15,48
A2-2		526,61	535,30	330,5	332	0,45	200,72	200,32	0,1993	-0,6250	11,66	14,85
A2-3		522,62	532,28	331,5	333,5	0,60	202,08	201,63	0,2227	-0,6478	12,16	15,48
A2-4		529,09	533,33	332	334	0,60	202,34	201,83	0,2521	-0,7348	14,16	18,03
A2-5		517,70	519,82	328	328,5	0,15	198,96	198,42	0,2714	-0,7348	14,16	18,03
A2-6		517,54	531,49	332,5	335	0,75	202,55	202,15	0,1975	-0,6250	11,66	14,85
A3-1	2D/3	434,83	437,68	333	333,5	0,15	204,02	203,08	0,4607	-1,0807	26,66	33,94
A3-2		409,25	419,32	329	330	0,30	200,05	199,19	0,4299	-1,0892	27,66	35,22
A3-3		378,80	388,62	329	330,5	0,46	200,32	199,37	0,4742	-1,0921	28,16	35,85
A3-4		446,75	447,13	330	331	0,30	199,78	198,85	0,4655	-1,0807	26,66	33,94
A3-5		407,83	417,87	329	330	0,30	200,38	199,58	0,3992	-1,0892	27,66	35,22
A3-6		407,91	424,30	329,5	330	0,15	201,57	200,71	0,4267	-1,0854	27,16	34,58

Onde:

CP : Corpo de prova;

PP: Profundidade do Pite;

Lt_o : comprimento inicial da barra;

Lt_f : comprimento final da barra.

APÊNDICE A2 – Propriedades para o diâmetro de 12,5 mm

D = 12,5 mm - Área 122,72 mm ²												
CP	PP	Tensão de escoamento f_y (MPa)	Tensão última f_{st} (MPa)	Lt_o (mm)	Lt_f (mm)	Alongamento A (%)	Peso inicial (g)	Peso após o pite (g)	Grau de Corrosão G (%)	Excentricidade e (mm)	Área retirada da seção (mm ²)	Seção transversal perdida (%)
B1-1	0	576,13	670,57	330	362	9,70	308,86	308,86	0	0	-	-
B1-2		567,50	663,18	332	361	8,73	308,28	308,28	0	0	-	-
B1-3		570,89	664,61	330	360,5	9,24	309,13	309,13	0	0	-	-
B1-4		571,90	665,70	329	363,5	10,49	307,51	307,51	0	0	-	-
B1-5		568,24	663,27	329	359	9,12	307,80	307,80	0	0	-	-
B1-6		564,14	658,48	329	359	9,12	307,36	307,36	0	0	-	-
B2-1	1D/3	493,95	515,57	331	334	0,91	308,33	307,42	0,2951	-0,8202	19,50	15,89
B2-2		504,75	535,47	331,5	333	0,45	308,72	307,93	0,2559	-0,9005	21,90	17,84
B2-3		508,05	533,53	331,2	334	0,85	309,58	308,73	0,2746	-0,8611	20,70	16,87
B2-4		503,00	550,50	330	333,5	1,06	307,52	306,79	0,2374	-0,7993	18,90	15,40
B2-5		506,68	533,45	328,5	333	1,37	306,09	305,31	0,2548	-0,8408	20,10	16,38
B2-6		513,65	521,02	329	332	0,91	307,44	306,69	0,2440	-0,8611	20,70	16,87
B3-1	2D/3	439,63	439,91	327,5	330	0,76	304,57	302,93	0,5385	-1,296	44,40	36,18
B3-2		388,82	410,35	332	332,5	0,15	310,24	308,56	0,5415	-1,2955	44,70	36,42
B3-3		438,55	440,58	331	332	0,30	307,57	305,98	0,5170	-1,2941	42,30	34,47
B3-4		418,90	430,51	327	329	0,61	305,14	303,52	0,5309	-1,295	42,60	34,71
B3-5		427,02	438,73	330	331	0,30	307,96	306,32	0,5325	-1,2964	43,80	35,69
B3-6		424,05	426,22	331	332	0,30	309,09	307,36	0,5597	-1,2963	43,50	35,45

Onde:

CP : Corpo de prova;

PP: Profundidade do Pite;

Lt_o : comprimento inicial da barra;

Lt_f : comprimento final da barra.

APÊNDICE A3 – Propriedades para o diâmetro de 16 mm

D = 16 mm - Área 201,06 mm ²												
CP	PP	Tensão de escoamento f_y (MPa)	Tensão última f_{st} (MPa)	Lt_o (mm)	Lt_f (mm)	Alongamento A (%)	Peso inicial (g)	Peso após o pite (g)	Grau de Corrosão G (%)	Excentricidade e (mm)	Área retirada da seção (mm ²)	Seção transversal perdida (%)
C1-2	0	533,84	645,09	328	369	12,50	525,48	525,48	0	0	-	-
C1-3		537,97	650,01	330	371	12,42	528,79	528,79	0	0	-	-
C1-4		524,05	636,63	329,5	374	13,51	525,99	525,99	0	0	-	-
C1-5		530,34	640,99	330	375	13,64	528,68	528,68	0	0	-	-
C1-6		542,25	651,90	328	368,5	12,35	527,10	527,10	0	0	-	-
C2-1		1D/3	402,15	537,31	329	336	2,13	528,65	526,63	0,3821	-1,0275	30,81
C2-2	396,22		514,50	331	337,5	1,96	528,69	526,68	0,3802	-1,0388	31,21	15,52
C2-3	411,84		552,17	330,5	338	2,27	524,63	522,96	0,3183	-1,0046	30,01	14,93
C2-4	405,74		530,18	330	337	2,12	531,07	529	0,3898	-1,0944	33,21	16,52
C2-5	399,13		533,77	331	339	2,42	529,80	528,02	0,3360	-0,9699	28,81	14,33
C2-6	407,61		523,21	330	334	1,21	526,80	524,63	0,4119	-1,0944	33,21	16,52
C3-1	2D/3	383,16	389,35	328	329	0,30	524,64	519,89	0,9054	-1,7521	75,61	37,60
C3-2		382,26	422,40	330	331	0,30	526,62	522,15	0,8488	-1,7349	69,21	34,42
C3-3		357,32	418,15	327	330	0,92	521,96	517,92	0,7740	-1,7458	71,61	35,62
C3-4		378,07	388,37	330,5	333	0,76	527,82	523,26	0,8639	-1,7514	74,01	36,81
C3-5		372,39	409,90	327,5	330	0,76	523,49	518,82	0,8921	-1,7502	73,21	36,41
C3-6		383,38	407,95	330	333	0,91	527,97	523,64	0,8201	-1,7502	73,21	36,41

Onde:

CP : Corpo de prova;

PP: Profundidade do Pite;

Lt_o : comprimento inicial da barra;

Lt_f : comprimento final da barra.

APÊNDICE B1 – Tabela Grau de corrosão e Tensão de Escoamento

D (mm)	PP	CP	G (%)	\bar{G} (%)	S (%)	f_y (MPa)	\bar{f}_y (Mpa)	S(Mpa)	Redução (%)	
10	0	A1-2	0	0	0	587,57	587,86	2,72	0	
		A1-3	0			584,60				
		A1-4	0			591,24				
		A1-5	0			588,02				
	1D/3	A2-1	0,217	0,23	0,03	526,86	523,40	5,19	10,96	
		A2-2	0,199			526,61				
		A2-3	0,223			522,62				
		A2-4	0,252			529,09				
		A2-5	0,271			517,70				
		A2-6	0,197			517,54				
	2D/3	A3-1	0,461	0,44	0,03	434,83	414,23	24,15	29,54	
		A3-2	0,430			409,25				
		A3-3	0,474			378,80				
		A3-4	0,466			446,75				
		A3-5	0,399			407,83				
		A3-6	0,427			407,91				
	12,5	0	B1-1	0	0	0	576,13	569,80	4,13	0
			B1-2	0			567,50			
B1-3			0	570,89						
B1-4			0	571,90						
B1-5			0	568,24						
B1-6			0	564,14						
1D/3		B2-1	0,295	0,26	0,02	493,95	505,01	6,53	11,37	
		B2-2	0,256			504,75				
		B2-3	0,275			508,05				
		B2-4	0,237			503,00				
		B2-5	0,255			506,68				
		B2-6	0,244			513,65				
2D/3		B3-1	0,538	0,54	0,01	439,63	422,83	18,55	25,79	
		B3-2	0,542			388,82				
		B3-3	0,517			438,55				
		B3-4	0,531			418,90				
		B3-5	0,533			427,02				
		B3-6	0,560			424,05				
16	0	C1-2	0	0	0	533,84	533,69	6,26	0	
		C1-3	0			537,97				
		C1-4	0			524,05				
		C1-5	0			530,34				
		C1-6	0			542,25				
		1D/3	C2-1			0,382				0,37
	C2-2		0,380	396,22						
	C2-3		0,318	411,84						
	C2-4		0,390	405,74						
	C2-5		0,336	399,13						
	C2-6		0,412	407,61						
	2D/3	C3-1	0,905	0,85	0,05	383,16	376,10	10,11	29,53	
		C3-2	0,849			382,26				
		C3-3	0,774			357,32				
		C3-4	0,864			378,07				
		C3-5	0,892			372,39				
		C3-6	0,820			383,38				

APÊNDICE B2 – Tabela Grau de corrosão e Tensão Máxima

D (mm)	PP	CP	G (%)	\bar{G} (%)	S (%)	f_{st} (MPa)	\bar{f}_{st} (Mpa)	S (MPa)	Redução (%)	
10	0	A1-2	0	0	0	675,16	674,47	2,47	0	
		A1-3	0			671,48				
		A1-4	0			677,39				
		A1-5	0			673,85				
	1D/3	A2-1	0,217	0,227	0,030	533,72	530,99	5,62	21,27	
		A2-2	0,199			535,30				
		A2-3	0,223			532,28				
		A2-4	0,252			533,33				
		A2-5	0,271			519,82				
		A2-6	0,197			531,49				
	2D/3	A3-1	0,461	0,443	0,029	437,68	422,49	20,10	37,36	
		A3-2	0,430			419,32				
		A3-3	0,474			388,62				
		A3-4	0,466			447,13				
		A3-5	0,399			417,87				
		A3-6	0,427			424,30				
	12,5	0	B1-1	0	0	0	670,57	664,30	3,94	0
			B1-2	0			663,18			
B1-3			0	664,61						
B1-4			0	665,70						
B1-5			0	663,27						
B1-6			0	658,48						
1D/3		B2-1	0,295	0,260	0,021	515,57	531,59	12,23	19,98	
		B2-2	0,256			535,47				
		B2-3	0,275			533,53				
		B2-4	0,237			550,50				
		B2-5	0,255			533,45				
		B2-6	0,244			521,02				
2D/3		B3-1	0,538	0,537	0,014	439,91	431,05	11,67	35,11	
		B3-2	0,542			410,35				
		B3-3	0,517			440,58				
		B3-4	0,531			430,51				
		B3-5	0,533			438,73				
		B3-6	0,560			426,22				
16	0	C1-2	0	0	0	645,09	644,92	5,64	0	
		C1-3	0			650,01				
		C1-4	0			636,63				
		C1-5	0			640,99				
		C1-6	0			651,90				
		1D/3	C2-1			0,382				0,370
	C2-2		0,380	514,50						
	C2-3		0,318	552,17						
	C2-4		0,390	530,18						
	C2-5		0,336	533,77						
	C2-6		0,412	523,21						
	2D/3	C3-1	0,905	0,851	0,048	389,35	406,02	14,31	37,04	
		C3-2	0,849			422,40				
		C3-3	0,774			418,15				
		C3-4	0,864			388,37				
		C3-5	0,892			409,90				
		C3-6	0,820			407,95				

APÊNDICE B3 – Tabela Grau de corrosão e Alongamento

D (mm)	PP	CP	G (%)	\bar{G} (%)	S (%)	A (%)	(%)	S (%)	Redução de A (%)	
10	0	A1-2	0	0	0	9,34	9,03	0,24	0	
		A1-3	0			8,87				
		A1-4	0			9,09				
		A1-5	0			8,81				
	1D/3	A2-1	0,217	0,227	0,030	1,06	0,60	0,30	93,32	
		A2-2	0,199			0,45				
		A2-3	0,223			0,60				
		A2-4	0,252			0,60				
		A2-5	0,271			0,15				
		A2-6	0,197			0,75				
	2D/3	A3-1	0,461	0,443	0,029	0,15	0,28	0,11	96,92	
		A3-2	0,430			0,30				
		A3-3	0,474			0,46				
		A3-4	0,466			0,30				
		A3-5	0,399			0,30				
		A3-6	0,427			0,15				
	12,5	0	B1-1	0	0	0	9,70	9,40	0,62	0
			B1-2	0			8,73			
B1-3			0	9,24						
B1-4			0	10,49						
B1-5			0	9,12						
B1-6			0	9,12						
1D/3		B2-1	0,295	0,260	0,021	0,91	0,92	0,30	90,17	
		B2-2	0,256			0,45				
		B2-3	0,275			0,85				
		B2-4	0,237			1,06				
		B2-5	0,255			1,37				
		B2-6	0,244			0,91				
2D/3		B3-1	0,538	0,537	0,014	0,76	0,41	0,23	95,69	
		B3-2	0,542			0,15				
		B3-3	0,517			0,30				
		B3-4	0,531			0,61				
		B3-5	0,533			0,30				
		B3-6	0,560			0,30				
16	0	C1-2	0	0	0	12,50	12,88	0,57	0	
		C1-3	0			12,42				
		C1-4	0			13,51				
		C1-5	0			13,64				
		C1-6	0			12,35				
		1D/3	C2-1			0,382				0,370
	C2-2		0,380	1,96						
	C2-3		0,318	2,27						
	C2-4		0,390	2,12						
	C2-5		0,336	2,42						
	C2-6		0,412	1,21						
	2D/3	C3-1	0,905	0,851	0,048	0,30	0,66	0,28	94,88	
		C3-2	0,849			0,30				
		C3-3	0,774			0,92				
		C3-4	0,864			0,76				
		C3-5	0,892			0,76				
		C3-6	0,820			0,91				

APÊNDICE C1 – Excentricidade e Tensão de escoamento

D (mm)	PP	CP	e(mm)	\bar{e} (mm)	S(mm)	f_y (MPa)	\bar{f}_y (Mpa)	S(Mpa)	Redução (%)	
10	0	A1-2	0	0	0	587,57	587,86	2,72	0	
		A1-3	0			584,60				
		A1-4	0			591,24				
		A1-5	0			588,02				
	1D/3	A2-1	-0,6478	-0,6692	0,0518	526,86	523,40	5,19	10,96	
		A2-2	-0,625			526,61				
		A2-3	-0,6478			522,62				
		A2-4	-0,7348			529,09				
		A2-5	-0,7348			517,70				
		A2-6	-0,625			517,54				
	2D/3	A3-1	-1,0807	-1,0862	0,0048	434,83	414,23	24,15	29,54	
		A3-2	-1,0892			409,25				
		A3-3	-1,0921			378,80				
		A3-4	-1,0807			446,75				
		A3-5	-1,0892			407,83				
		A3-6	-1,0854			407,91				
	12,5	0	B1-1	0	0	0	576,13	569,80	4,13	0
			B1-2	0			567,50			
B1-3			0	570,89						
B1-4			0	571,90						
B1-5			0	568,24						
B1-6			0	564,14						
1D/3		B2-1	-0,8202	-0,8472	0,0355	493,95	505,01	6,53	11,37	
		B2-2	-0,9005			504,75				
		B2-3	-0,8611			508,05				
		B2-4	-0,7993			503,00				
		B2-5	-0,8408			506,68				
		B2-6	-0,8611			513,65				
2D/3		B3-1	-1,296	-1,2956	0,0009	439,63	422,83	18,55	25,79	
		B3-2	-1,2955			388,82				
		B3-3	-1,2941			438,55				
		B3-4	-1,295			418,90				
		B3-5	-1,2964			427,02				
		B3-6	-1,2963			424,05				
16	0	C1-2	0	0	0	533,84	533,69	6,26	0	
		C1-3	0			537,97				
		C1-4	0			524,05				
		C1-5	0			530,34				
		C1-6	0			542,25				
		1D/3	C2-1			-1,0275				-1,0383
	C2-2		-1,0388	396,22						
	C2-3		-1,0046	411,84						
	C2-4		-1,0944	405,74						
	C2-5		-0,9699	399,13						
	C2-6		-1,0944	407,61						
	2D/3	C3-1	-1,7521	-1,7474	0,0065	383,16	376,10	10,11	29,53	
		C3-2	-1,7349			382,26				
		C3-3	-1,7458			357,32				
		C3-4	-1,7514			378,07				
		C3-5	-1,7502			372,39				
		C3-6	-1,7502			383,38				

APÊNDICE C2 – Excentricidade e Tensão Última

D (mm)	PP	CP	e(mm)	\bar{e} (mm)	S(mm)	f_{st} (MPa)	\bar{f}_{st} (Mpa)	S(Mpa)	Redução (%)	
10	0	A1-2	0	0	0	675,16	674,47	2,47	0	
		A1-3	0			671,48				
		A1-4	0			677,39				
		A1-5	0			673,85				
	1D/3	A2-1	-0,6478	-0,6692	0,0518	533,72	530,99	5,62	21,27	
		A2-2	-0,6250			535,30				
		A2-3	-0,6478			532,28				
		A2-4	-0,7348			533,33				
		A2-5	-0,7348			519,82				
		A2-6	-0,6250			531,49				
	2D/3	A3-1	-1,0807	-1,0862	0,0048	437,68	422,49	20,10	37,36	
		A3-2	-1,0892			419,32				
		A3-3	-1,0921			388,62				
		A3-4	-1,0807			447,13				
		A3-5	-1,0892			417,87				
		A3-6	-1,0854			424,30				
	12,5	0	B1-1	0	0	0	670,57	664,30	3,94	0
			B1-2	0			663,18			
B1-3			0	664,61						
B1-4			0	665,70						
B1-5			0	663,27						
B1-6			0	658,48						
1D/3		B2-1	-0,8202	-0,8472	0,0355	515,57	531,59	12,23	19,98	
		B2-2	-0,9005			535,47				
		B2-3	-0,8611			533,53				
		B2-4	-0,7993			550,50				
		B2-5	-0,8408			533,45				
		B2-6	-0,8611			521,02				
2D/3		B3-1	-1,2960	-1,2956	0,0009	439,91	431,05	11,67	35,11	
		B3-2	-1,2955			410,35				
		B3-3	-1,2941			440,58				
		B3-4	-1,2950			430,51				
		B3-5	-1,2964			438,73				
		B3-6	-1,2963			426,22				
16	0	C1-2	0	0	0	645,09	644,92	5,64	0	
		C1-3	0			650,01				
		C1-4	0			636,63				
		C1-5	0			640,99				
		C1-6	0			651,90				
		1D/3	C2-1			-1,0275				-1,0383
	C2-2		-1,0388	514,50						
	C2-3		-1,0046	552,17						
	C2-4		-1,0944	530,18						
	C2-5		-0,9699	533,77						
	C2-6		-1,0944	523,21						
	2D/3	C3-1	-1,7521	-1,7474	0,0065	389,35	406,02	14,31	37,04	
		C3-2	-1,7349			422,40				
		C3-3	-1,7458			418,15				
		C3-4	-1,7514			388,37				
		C3-5	-1,7502			409,90				
		C3-6	-1,7502			407,95				

APÊNDICE C3 – Excentricidade e Alongamento

D (mm)	PP	CP	e(mm)	\bar{e} (mm)	S(mm)	A(%)	\bar{A} (%)	S (%)	Redução(%)	
10	0	A1-2	0	0	0	9,34	9,03	0,24	0	
		A1-3	0			8,87				
		A1-4	0			9,09				
		A1-5	0			8,81				
	1D/3	A2-1	-0,648	-0,6692	0,051826	1,06	0,60	0,30	93,32	
		A2-2	-0,625			0,45				
		A2-3	-0,648			0,60				
		A2-4	-0,735			0,60				
		A2-5	-0,735			0,15				
		A2-6	-0,625			0,75				
	2D/3	A3-1	-1,081	-1,0862	0,004774	0,15	0,28	0,11	96,92	
		A3-2	-1,089			0,30				
		A3-3	-1,092			0,46				
		A3-4	-1,081			0,30				
		A3-5	-1,089			0,30				
		A3-6	-1,085			0,15				
	12,5	0	B1-1	0	0	0	9,70	9,40	0,62	0
			B1-2	0			8,73			
B1-3			0	9,24						
B1-4			0	10,49						
B1-5			0	9,12						
B1-6			0	9,12						
1D/3		B2-1	-0,820	-0,8472	0,0355	0,91	0,92	0,30	90,17	
		B2-2	-0,901			0,45				
		B2-3	-0,861			0,85				
		B2-4	-0,799			1,06				
		B2-5	-0,841			1,37				
		B2-6	-0,861			0,91				
2D/3		B3-1	-1,296	-1,2956	0,000883	0,76	0,41	0,23	95,69	
		B3-2	-1,296			0,15				
		B3-3	-1,294			0,30				
		B3-4	-1,295			0,61				
		B3-5	-1,296			0,30				
		B3-6	-1,296			0,30				
16	0	C1-2	0	0	0	12,50	12,88	0,57	0	
		C1-3	0			12,42				
		C1-4	0			13,51				
		C1-5	0			13,64				
		C1-6	0			12,35				
		1D/3	C2-1			-1,028				-1,0383
	C2-2		-1,039	1,96						
	C2-3		-1,005	2,27						
	C2-4		-1,094	2,12						
	C2-5		-0,970	2,42						
	C2-6		-1,094	1,21						
	2D/3	C3-1	-1,752	-1,7474	0,00652	0,30	0,66	0,28	94,88	
		C3-2	-1,735			0,30				
		C3-3	-1,746			0,92				
		C3-4	-1,751			0,76				
		C3-5	-1,750			0,76				
		C3-6	-1,750			0,91				