



Rui Miguel Livramento Pimenta
Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Avaliação da corrosão em estruturas de betão armado com recurso à Fotogrametria

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil Estruturas

Orientador: Professor Eduardo Soares Ribeiro Gomes Cavaco
Professor Auxiliar, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Doutor Rodrigo M. Gonçalves
Arguente: Doutor Jónatas Valença
Vogal: Doutor Eduardo Soares Ribeiro Gomes Cavaco

“Copyright” Rui Miguel Livramento Pimenta, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Gostaria de demonstrar o meu profundo agradecimento ao meu orientador, Professor Eduardo Cavaco, por todo o apoio que me deu até ao final deste trabalho, desde a partilha de conhecimentos, sugestões, disponibilidade, e, a cima de tudo, pela confiança e força que depositou em mim.

Gostaria de agradecer a todos os auxiliares de laboratório, por todo o apoio que me deram na execução dos trabalhos laboratoriais, desde ao fornecimento de equipamento necessário para a elaboração destes, como sugestões para os melhorar com vista a obter melhores resultados.

À minha família, um obrigado por todo o apoio, ajuda e oportunidade que me deram durante toda a minha formação pessoal e académica, mesmo estando longe.

Também gostaria de agradecer aos meus amigos, por me terem apoiado e acompanhado em todos os momentos ao longo destes anos longe da família, e aos colegas de curso por toda a ajuda e partilha de conhecimento.

Resumo

A corrosão das armaduras de estruturas de betão armado é a principal causa para a sua degradação e deterioração, reduzindo os seus níveis de segurança e o seu período de vida útil. Os principais mecanismos de deterioração resultantes da corrosão são: a perda de secção transversal das armaduras; a fendilhação do betão; a perda de aderência entre as armaduras e o betão; e a redução da resistência, mas sobretudo da ductilidade das armaduras. A influência destes mecanismos no desempenho dos elementos estruturais, e na segurança das estruturas, depende significativamente da distribuição espacial da corrosão, isto é, se a corrosão ocorre de forma homogénea nas armaduras e na estrutura ou se se localiza preferencialmente em determinadas zonas. Deste modo, para uma correcta avaliação da segurança de estruturas de betão armado existentes sujeitas a corrosão, é fundamental efectuar uma avaliação prévia dos níveis de corrosão existentes e da sua variabilidade e distribuição espacial. A metodologia mais recorrente para o efeito consiste na extracção de provetes e posterior pesagem para avaliação da massa de aço perdida e corrosão média. A avaliação da variabilidade espacial da corrosão é normalmente efectuada por inspecção visual e recurso a uma craveira para medição da profundidade de corrosão nas secções mais afectadas. Este método é reconhecidamente pouco preciso e pouco exacto bem como obriga à extracção de provetes da estrutura.

Face ao exposto, é objectivo desta tese propor e validar a técnica de fotogrametria como metodologia de avaliação da corrosão em estruturas de betão armado. Para o efeito efectuaram-se ensaios de corrosão acelerada em elementos de betão armado tendo sido extraídos provetes de varão de diferentes diâmetros, níveis de corrosão e comprimentos. A avaliação da corrosão média real foi efectuada por intermédio de avaliação volumétrica dos provetes com recurso a pesagem hidrostática. Foi efectuada um levantamento fotográfico dos provetes e reconstrução dos modelos digitais 3D com recurso ao software Agisoft. A comparação dos volumes dos provetes reais e dos modelos 3D resultou em erros inferiores a 0.2% o que demonstra a viabilidade da técnica para avaliação de diferentes níveis de corrosão em provetes de diferentes dimensões e diâmetros. A análise da secção transversal dos modelos 3D em comparação com modelos analíticos propostos na literatura permitiu também concluir acerca da superior precisão da fotogrametria para aferição da distribuição espacial da corrosão. Foi também avaliada a influência da qualidade e resolução do equipamento de aquisição, número de fotografias, nível de sobreposição entre elas, e escala do modelo 3D.

Palavras-chave

Corrosão, Modelação 3D, Fotogrametria, Precisão, Exatidão, Betão Armado, Corrosão localizada, Corrosão uniforme, Cloretos, Carbonatação

Abstract

Corrosion of the reinforcement of reinforced concrete structures is the main cause for its degradation and deterioration, reducing its safety levels and its useful life. The main deterioration mechanisms resulting from corrosion are: the loss of cross-section of the reinforcement; cracking of concrete; the loss of adhesion between the reinforcement and the concrete; and the reduction of the resistance, but especially of the ductility of the reinforcements. The influence of these mechanisms on the performance of the structural elements and on the safety of the structures depends significantly on the spatial distribution of corrosion, ie whether the corrosion occurs homogeneously in the reinforcements and in the structure or if it is preferentially located in certain areas. Thus, for an accurate evaluation of the safety of existing reinforced concrete structures subject to corrosion, it is essential to make a prior evaluation of the existing corrosion levels and their variability and spatial distribution. The most frequent methodology for this purpose consists of the extraction of test pieces and subsequent weighing to evaluate the lost steel mass and medium corrosion. The evaluation of the spatial variability of corrosion is usually carried out by visual inspection and use of a gauge to measure the depth of corrosion in the most affected sections. This method is admittedly exact and inaccurate as well as requiring the extraction of test pieces from the structure.

In view of the above, it is the purpose of this thesis to propose and validate the photogrammetry technique as a methodology for the evaluation of corrosion in reinforced concrete structures. For this purpose, accelerated corrosion tests were carried out on reinforced concrete elements and samples of rods of different diameters, corrosion levels and lengths were extracted. The evaluation of the real average corrosion was done by means of volumetric evaluation of the test pieces using hydrostatic weighing. A photographic survey of the test pieces and reconstruction of 3D digital models was carried out using Agisoft software. The comparison of the volumes of the real specimens and the 3D models resulted in errors lower than 0.2%, which demonstrates the viability of the technique for the evaluation of different levels of corrosion in specimens of different dimensions and diameters. The cross-sectional analysis of the 3D models in comparison to the analytical models proposed in the literature also allowed us to conclude about the superior accuracy of the photogrammetry for measuring the spatial distribution of corrosion. The influence of the quality and resolution of the acquisition equipment, number of photographs, level of overlap between them, and scale of the 3D model were also evaluated.

Key words

Corrosion, 3D Modeling, Photogrammetry, Precision, Accuracy, Armed Concrete, Localized Corrosion, Uniform Corrosion, Chlorides, Carbonation

Índice de Matérias

| | |
|--|-------------|
| Índice de Matérias | ix |
| Índice de Figuras | xi |
| Índice de Tabelas | xiii |
| Índice de Abreviaturas e Variáveis | xv |
| 1 Introdução | 1 |
| 1.1 Enquadramento | 1 |
| 1.2 Objectivos | 2 |
| 1.3 Estrutura da Dissertação | 2 |
| 2 Corrosão Em Estruturas de Betão Armado | 5 |
| 2.1 Processo Eletroquímico da Corrosão | 5 |
| 2.2 Fases da Corrosão | 7 |
| 2.3 Carbonatação do Betão | 8 |
| 2.4 Contaminação por Cloretos | 9 |
| 2.5 Corrosão Uniforme vs Corrosão Localizada | 12 |
| 2.6 Mecanismos de Deterioração do Betão Armado Devido à Corrosão | 13 |
| 2.6.1 Redução da Secção Transversal das Armaduras | 13 |
| 2.6.2 Fendilhação do Betão | 15 |
| 2.6.3 Aderência Aço-Betão | 16 |
| 2.6.4 Perda de Resistência/Ductilidade das Armaduras | 17 |
| 3 Fotogrametria | 19 |
| 3.1 Vantagens e Desvantagens da Fotogrametria | 20 |
| 3.2 Parâmetros de Controlo e Qualidade | 21 |
| 3.3 Comparação entre a Fotogrametria com outros Métodos de Levantamento 3D | 22 |
| 3.4 Casos de Estudo | 23 |
| 3.4.1 Capela de S. Jorge de Aljubarrota | 23 |
| 3.4.2 Ensaio de Vigas de Grande Vão | 25 |
| 4 Metodologia Experimental | 27 |
| 4.1 Ensaio de Corrosão Acelerada | 27 |
| 4.2 Pesagem Hidrostática | 30 |
| 4.3 Medição da Perda de Área com Craveira | 31 |

| | |
|---|-----------|
| 4.4 Levantamento Fotogramétrico..... | 33 |
| 4.4.1 Equipamento e Definições da Camara | 33 |
| 4.4.2 Requisitos dos Objectos/Cenas Necessárias para um Bom Levantamento | 34 |
| 4.5 Sistema de Aquisição de Fotografias | 36 |
| 4.6 Modelação 3D..... | 40 |
| 4.6.1 Adição, Organização e Tratamento das Fotografias | 40 |
| 4.6.2 Alinhamento das Fotografias | 41 |
| 4.6.3 Construção do Modelo de Nuvem de Pontos (“Dense Cloud”) | 43 |
| 4.6.4 Construção do Modelo de Malha (“Mesh”) | 45 |
| 4.6.5 Junção de Blocos..... | 46 |
| 4.6.6 Exportação de Resultados..... | 48 |
| 4.7 3DS Max | 48 |
| 5 Discussão e Resultados | 51 |
| 5.1 Provetes..... | 51 |
| 5.2 Pesagem Hidrostática..... | 52 |
| 5.3 Modelação 3D Fotogramétrica | 53 |
| 5.4 Influência da Escala..... | 55 |
| 5.5 Influência do Equipamento de Aquisição | 56 |
| 5.6 Análise do Número de Fotografias | 58 |
| 5.7 Análise da Secção Transversal | 61 |
| 5.7.1 Secção Transversal dos Provetes P1, P3 e P7 | 61 |
| 5.7.2 Comparação da secção transversal com as 3 camaras..... | 64 |
| 5.7.3 Comparação da Secção Transversal entre a Modelação e os Resultados Analíticos..... | 65 |
| 5.7.4 Comparação entre os Volumes Obtidos na Modelação 3D e os Volumes Estimados Através dos Resultados Analíticos..... | 68 |
| 6 Conclusões e Desenvolvimentos Futuros..... | 71 |
| 6.1 Conclusões | 71 |
| 6.2 Desenvolvimentos Futuros | 72 |
| Bibliografia | 73 |

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 2.1: Constituintes da camada protetora do ferro quando este é produzido a 700°C (adaptado de (Gentil 1996)) | 5 |
| Figura 2.2: Processo eletroquímico da corrosão (adaptado de (Cavaco 2013)) | 6 |
| Figura 2.3: Período de iniciação e propagação da corrosão nas estruturas de betão armado (adaptado de (Bertolini et al. 2004)) | 8 |
| Figura 2.4: Taxa de carbonatação do betão em função da humidade relativa do meio ambiente, (adaptado de (Bertolini et al. 2004)) | 9 |
| Figura 2.5: Representação esquemática da formação da corrosão localizada devido à penetração dos cloretos. (adaptado de (Silva 2013)) | 10 |
| Figura 2.6: Influência da Humidade relativa no coeficiente de difusão de gases e iões. (adaptado de (Silva 2013)) | 11 |
| Figura 2.7: Taxa de corrosão do aço relacionada com a taxa concentração molar de Cl ⁻ e OH ⁻ nos poros do betão. (adaptado de (Bertolini et al. 2004)) | 11 |
| Figura 2.8: Corrosão uniforme e reações de corrosão microcélulas, (adaptado de (Cavaco 2013)) | 12 |
| Figura 2.9: Representação esquemática da corrosão localizada nas armaduras dentro do betão. (adaptado de (Bertolini et al. 2004)) | 13 |
| Figura 2.10: Representação esquemática de uma reação macrocell. (adaptado de (Bertolini et al. 2004)) | 13 |
| Figura 2.11: Representação esquemática das taxas de corrosão para diferentes betões e condições de exposição. (adaptado de (Bertolini et al. 2004)) | 14 |
| Figura 2.12: Perda de secção das armaduras dependendo do diâmetro, (adaptado de (Rodriguez et al. (1996))) | 15 |
| Figura 2.13: Volume relativo dos óxidos de ferro. (adaptado de (Cavaco 2013)) | 15 |
| Figura 2.14: Abertura de fendas e delaminação do betão de recobrimento devido à corrosão das armaduras. (adaptado de (Cavaco 2013)) | 16 |
| Figura 2.15: Variação qualitativa na força de ligação aço betão com corrosão. (adaptado de (Fédération Internationale du Béton 2000)) | 17 |
| Figura 2.16: Perda de ductilidade devido ao fenómeno Hydrogen Embrittlement no aço TWIP. (adaptado de (Koyama et al. 2017)) | 17 |
| Figura 3.1: Representação de vários tipos de resultados precisos e exatos. (adaptado de (Marques 2016)) | 22 |
| Figura 3.2: Capela de São Jorge de Aljubarrota (a), e o seu modelo renderizado (b). (adaptado de (Marques 2016)) | 24 |
| Figura 3.3: Sobreposição de modelos gerados pela fotogrametria e pelo levantamento topográfico. (adaptado de (Valença 2006)) | 24 |
| Figura 3.4: Posição das miras fixas e móveis utilizadas para a realização do ensaio | 25 |
| Figura 3.5: Variação dos resultados experimentais obtidos entre a fotogrametria e os LVDT's. (adaptado de (Valença 2006)) | 26 |
| Figura 4.1: Representação esquemática do ensaio de corrosão acelerada (a), e respetiva aplicação em laboratório (b) | 27 |
| Figura 4.2: Perda de secção média das armaduras corroidas. (adaptado de (Zhang et al. 2014)) | 29 |
| Figura 4.3: a), e) e f) Provete L1; c) e d) Provete L3; b) Provete L2 | 30 |
| Figura 4.4: Balanças utilizadas para a execução das pesagens: a) Pesagem seca; b) Pesagem hidrostática | 31 |
| Figura 4.5: Configuração da área do "pit". (adaptado de (Stewart 2004)) | 31 |
| Figura 4.6: Craveira utilizada para medir as profundidades p ao longo do comprimento do varão | 32 |
| Figura 4.7: Diferença entre os diferentes ISO | 34 |
| Figura 4.8: Varias medidas em ter em conta na altura de aquisição das fotografias | 35 |
| Figura 4.9: Base utilizada para promover a rotação dos provetes nos graus desejados, com escala proposta por Samantha Thi Porter. | 36 |
| Figura 4.10: Escala utilizada para o levantamento fotogramétrico (adaptado de (Porter, Roussel, and Soressi 2016)) | 36 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.11: Marcadores para facilitar a junção e referenciação dos dois conjuntos de imagens. | 37 |
| Figura 4.12: Sistema de aquisição de fotografias para o levantamento fotogramétrico. | 37 |
| Figura 4.13: Rotação dos varões | 38 |
| Figura 4.14: Nível superior do levantamento fotogramétrico do provete P3 | 38 |
| Figura 4.15: Nível inferior do levantamento fotogramétrico do provete P3 | 39 |
| Figura 4.16: Nível intermédio do levantamento fotogramétrico do provete P3 | 39 |
| Figura 4.17: Perspectiva frontal dos 3 níveis em conjunto do provete P3 | 39 |
| Figura 4.18: Perspectiva superior dos 3 níveis em conjunto do provete P3 | 40 |
| Figura 4.19: Utilização de máscaras para reduzir o tempo de computação: a) Imagem; b) Máscara respetiva | 41 |
| Figura 4.20: Pontos comuns nas duas fotografias | 41 |
| Figura 4.21: a) modelo editado; b) modelo não editado. | 42 |
| Figura 4.22: Falha na criação do modelo de pontos dispersos. | 42 |
| Figura 4.23: a) Modelo de pontos dispersos; b) Modelo de nuvem de pontos. | 44 |
| Figura 4.24: Malha do modelo malha da bloco 1 do provete P3 | 45 |
| Figura 4.25: Junção de blocos. | 46 |
| Figura 4.26: Remoção das partes da escala que não são necessárias. | 47 |
| Figura 4.27: Junção dos dois blocos (apenas uma caixa de construção). | 47 |
| Figura 4.28: Representação de uma fatia | 48 |
| Figura 4.29: Representação do Provete P3 no programa 3DS max | 49 |
| Figura 5.1: Imagem dos provetes retirados do ensaio de corrosão acelerada e provetes não corroidos. | 52 |
| Figura 5.2: Modelo 3D do Provete P4 | 54 |
| Figura 5.3: Modelo 3D do Provete P6 | 54 |
| Figura 5.4: Modelo 3D do provete P7 | 54 |
| Figura 5.5: Erro associado à junção de blocos. | 55 |
| Figura 5.6: a) escala 1; b) escala 2; c) escala 3; d) escala 4. | 56 |
| Figura 5.7: Modelo 3D obtido através da Cannon G11 | 57 |
| Figura 5.8: Modelo 3D obtido através do Iphone 6 | 57 |
| Figura 5.9: Modelo 3D obtido através da Cannon 1200D, com levantamento fotogramétrico de 36 fotografias. | 60 |
| Figura 5.10: Modelo 3D obtido através da Cannon G11, com levantamento fotogramétrico de 36 fotografias. | 60 |
| Figura 5.11: Modelo 3D obtido através do Iphone 6, com levantamento fotogramétrico de 36 fotografias. | 61 |
| Figura 5.12: Área das secções do provete P1 | 62 |
| Figura 5.13: Área das secções do provete P3 | 62 |
| Figura 5.14: Área das secções do provete P7 | 63 |
| Figura 5.15: Comparação entre a perda de secção entre a Cannon 1200D e a G11, e respetivo erro | 64 |
| Figura 5.16: Comparação entre a perda de secção entre a Cannon 1200D e Iphone, e respetivo erro | 64 |
| Figura 5.17: Comparação entre os resultados analíticos e a modelação 3D, provete P1 | 66 |
| Figura 5.18: Comparação entre os resultados analíticos e a modelação 3D, provete P3 | 66 |
| Figura 5.19: Comparação entre os resultados analíticos e a modelação 3D do provete P7 | 67 |
| Figura 5.20: Comparação entre o método analítico e o método 3D para o calculo da área das secções corroidas | 68 |

Índice de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Redução da secção de corte para corrosão uniforme e localizada, para $t=50$ anos, $i_{corr}=1\mu A/cm^2$ e $L=800$ mm, (adaptado de (Stewart 2004)) | 14 |
| Tabela 2: Definições fixas das camaras | 34 |
| Tabela 3: Identificação dos Provetes | 51 |
| Tabela 4: Volumes obtidos através da pesagem hidrostática | 52 |
| Tabela 5: Percentagens de corrosão dos provetes corroídos | 53 |
| Tabela 6: Erro relativo entre o volume referente à pesagem hidrostática e o volume obtido através dos modelos 3D..... | 53 |
| Tabela 7: Resultados das escalas. | 56 |
| Tabela 8: Comparação entre os modelos obtidos com as 3 camaras..... | 57 |
| Tabela 9: Comparação entre os valores obtidos nos 3 níveis com 108 fotografias com as 3 camaras, e variando os níveis no Provete P3..... | 58 |
| Tabela 10: Comparação entre os valores obtidos nos 3 níveis com 54 e 36 fotografias com as 3 camaras, mantendo o nível 3 no Provete P3 | 59 |
| Tabela 11: Valores da secção teorica dos varões, A_0 | 61 |
| Tabela 12: Corrosão média e desvio padrão | 63 |
| Tabela 13: Áreas médias dos Provetes P1, P3 e P7 | 65 |
| Tabela 14: Comparação entre os volumes dos resultados analíticos e dos modelados em 3D | 68 |

Índice de abreviaturas e variáveis

| | |
|-------------|---|
| LVDT | Transformador Diferencial Variável Linear |
| pav | Penetração média da corrosão |
| ΔW | Perda de massa do varão corroído |
| ρ_{Fe} | Densidade do ferro |
| I_{corr} | Densidade de corrosão |
| t | Tempo desde o início da corrosão |
| η_s | Taxa de perda de secção média |
| a | Largura do entalhe |
| p | Profundidade do entalhe |
| A_{st} | Área efectiva do varão após corrosão |
| A_{stnom} | Área do varão não corroído |
| A_{pit} | Área do entalhe |
| \emptyset | Diâmetro do varão |
| S | Pesagem seca |
| I | Pesagem húmida |
| Δg | Variação de massa |
| ΔL | Comprimento infinitesimal das fatias |
| $L_{esc.}$ | Dimensão da escala |
| V_{PH} | Volume obtido na pesagem hidrostática |
| V_{3D} | Volume obtido na modelação 3D |
| V_{an} | Volume obtido nos resultados analíticos |
| A_0 | Área teórica do varão |
| A_{3D} | Área das secções calculadas através da modelação 3D |
| A_{an} | Área das secções calculadas através dos resultados analíticos |

1 Introdução

1.1 Enquadramento

Estima-se, que no mundo inteiro os custos provocados pela corrosão excedem anualmente \$1,8 trilhões (US), traduzindo-se em 3-4% do Produto Interno Bruto dos países industrializados (Bastidas-Arteaga and Stewart 2015). No Reino Unido, a título de exemplo, em 1989 foram estimados que seriam gastos mais de £600 milhões na recuperação e reabilitação de pontes rodoviárias (Almusallam 2001), enquanto no caso específico dos Estados Unidos da América foram estimados gastos de \$1.8 trilhões (US) para a manutenção de pontes e estradas, e outros \$627 bilhões (US) para melhorar o nível de serviço das mesmas durante 20 anos, sendo maior parte destes danos referentes à corrosão das armaduras (Michel et al. 2016).

Grande parte dos estudos e estimativas que são realizadas sobre os custos da corrosão só incluem basicamente custos diretos, que estão associados aos materiais corroídos, à sua substituição/reparação e aos custos que poderiam ter sido evitados caso fossem tidas certas medidas de proteção. Contudo, fossem os custos indiretos, de mais difícil contabilização por estarem associados aos custos dos utilizadores, também contabilizados os valores estimados aumentariam significativamente, senão mesmo para valores “astronómicos”. (Brown 1998).

Os custos da corrosão têm também grande impacto ambiental, já que a corrosão conduz também à destruição das reservas de minérios. Com efeito, estima-se que 30% do aço que é produzido mundialmente é utilizado para reposição de peças, equipamentos e instalações que foram deterioradas pela corrosão, o que obriga a uma produção adicional de aço (Gentil 1996; Merçon, Guimarães, and Mainier 2004).

No âmbito das estruturas de betão armado, a corrosão tem também grande impacto. De facto, a utilização de betão armado em estruturas de edifícios e pontes generalizou-se, na segunda metade do século XX, devido à sua versatilidade e resistência e ao facto de nessa altura se pensar que o material seria de durabilidade quase eterna (Carlos and Fernandes 2011). Contudo, a experiência tem demonstrado que estas estruturas apresentam muitas vezes graves problemas de durabilidade reduzida, sendo uma das principais causas da sua deterioração diferida no tempo, a corrosão das armaduras, agravada pela presença de cloretos no betão e/ou carbonatação do mesmo. Em casos de corrosão significativa, as estruturas de betão armado podem perder grande parte da sua resistência podendo dar-se o colapso das mesmas. Recorde-se, a título de exemplo, a queda da Ponte Silver Bridge que se encontrava sobre o rio Ohio (EUA) em 1967 levando à morte de 46 pessoas. Também na Suíça em 1987 deu-se a queda da cobertura de uma piscina térmica causando a morte a 13 pessoas (Gentil 1996).

Face ao exposto, percebe-se que a temática da corrosão, e em particular afectando estruturas de betão armado, tem sido motivo para a realização nos últimos anos de muitos estudos científicos (Ahmad 2003; Almusallam 2001; Carlos and Fernandes 2011; Fang et al. 2004; Montemor, Simões, and Ferreira 2003; Ortega and Robles 2016; Otieno, Beushausen, and Alexander 2016; Ranjith, Balaji Rao, and Manjunath 2016).

Uma das principais questões discutidas nestes estudos é a correcta avaliação do nível de corrosão dos varões de aço que constituem as armaduras. Se por um lado, a corrosão total é relativamente fácil de avaliar através de uma pesagem dos varões antes e após a ocorrência da reacção, uma definição exacta e espacial das zonas corroídas tem-se revelado uma tarefa difícil de levar a cabo, sobretudo quando não é desejável a realização de ensaios destrutivos. Dada a importância da correcta avaliação dos níveis de corrosão das estruturas de betão armado, incluindo a sua variabilidade espacial, na avaliação da segurança de estruturas existentes sujeitas a corrosão, esta tese pretende ser um contributo relevante nessa área, propondo, para o efeito, uma nova metodologia baseada na fotogrametria.

1.2 Objectivos

O principal objetivo desta tese é o de propor e validar a fotogrametria como metodologia para avaliação da corrosão em estruturas de betão armado. Mais em particular pretende-se analisar:

- as condições necessárias ao levantamento fotogramétrico, em particular de luz e exposição;
- a precisão e exatidão do método;
- a influência do número de fotogramas e taxa de sobreposição dos mesmos;
- a influência da resolução e qualidade do equipamento de aquisição;
- a importância da escala do modelo fotogramétrico tridimensional;
- e a qualidade dos resultados no que diz respeito à variabilidade espacial da corrosão;

1.3 Estrutura da Dissertação

Com vista a explicar e expor com clareza todo o estudo realizado nesta dissertação, esta encontra-se dividida em seis capítulos, incluindo o presente relativo a uma introdução às temáticas abordadas.

No capítulo 2, são abordados os fundamentos teóricos do processo eletroquímico da corrosão, os vários agentes agressivos que ingressam no betão e aceleram a reacção, os mecanismos de deterioração resultantes.

No capítulo 3 são descritas algumas noções básicas de fotogrametria, sendo igualmente enunciadas algumas vantagens e desvantagens relativamente à utilização deste método. São também apresentados casos de estudo em Portugal.

No capítulo 4 é descrita a campanha experimental e metodologia utilizada, começando nos ensaios de corrosão acelerada e acabando na modelação 3D.

No capítulo 5 apresentam-se e discutem-se todos os resultados obtidos, assim como se estabelecem comparações entre resultados baseados em modelos analíticos e os resultados do levantamento fotogramétrico.

No capítulo 6 são apresentadas as conclusões finais deste trabalho e serão apresentados possíveis desenvolvimentos futuros.

2 Corrosão Em Estruturas de Betão Armado

A corrosão ou a oxidação das armaduras das estruturas de betão armado pode ser considerado como um dos maiores e mais graves problemas de degradação das mesmas, pois afecta directamente o comportamento mecânico e reduz o seu tempo de vida útil.

Na medida em que as armaduras são feitas de aço, uma liga de ferro e carbono, que absorve grandes quantidades de energia no processo de fabricação, a corrosão é, assim, quase que inevitável. Com efeito, após a sua produção e postas em contacto com o meio ambiente, o material tende a voltar ao seu estado inicial (minério) perdendo parte da energia absorvida através de uma reação exotérmica denominada corrosão (S. Azher 2005; Brown 1998; Cavaco 2013; Gentil 1996). Os principais produtos formados nesta reação exotérmica são os óxidos de ferro, denominados de ferrugem ($\text{Fe}(\text{OH})_2$), porém, dependendo das características do meio ambiente, da temperatura a que foi produzido, e da potencial presença de água e oxigénio, também poderão ocorrer outros produtos, como os que abaixo designadamente se indicam:

- $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (óxido ferroso hidratado), é o principal componente da ferrugem e pode criar o mineral hematite.
- $\text{Fe}_3\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (magnetite hidratada), muitas vezes verde, mas na presença de componentes orgânicos pode ser azul
- Fe_3O_4 (magnetite), de cor preta.

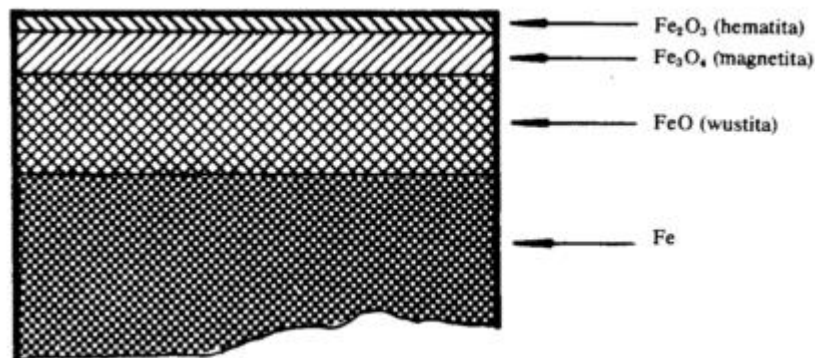


Figura 2.1: Constituintes da camada protetora do ferro quando este é produzido a 700°C (adaptado de (Gentil 1996))

2.1 Processo Eletroquímico da Corrosão

A corrosão é um processo eletroquímico pois envolve a transferência de elétrões, entre o ânodo e o cátodo, por intermédio de um eletrólito.

Na Figura 2.2, acha-se representado o processo da corrosão das armaduras do betão. É na região anódica que se dá a oxidação do ferro, ou seja, zona onde os eletrões se libertam como iões de ferro eletricamente positivos:



Nesta zona, quando os iões de ferro estão libertos, podem reagir com a água formando hidrogénio o que faz reduzir a alcalinidade do betão:



Através do eletrólito, que fornece oxigénio e água, os eletrões são transportados até a região catódica onde se dá a redução do oxigénio produzindo iões de hidróxido:



Atraídos pela carga positiva da região anódica, estes iões de hidróxido através do eletrólito deslocam-se até a região anódica devido à sua carga positiva e reagem com os iões de ferro produzindo hidróxidos de ferro:

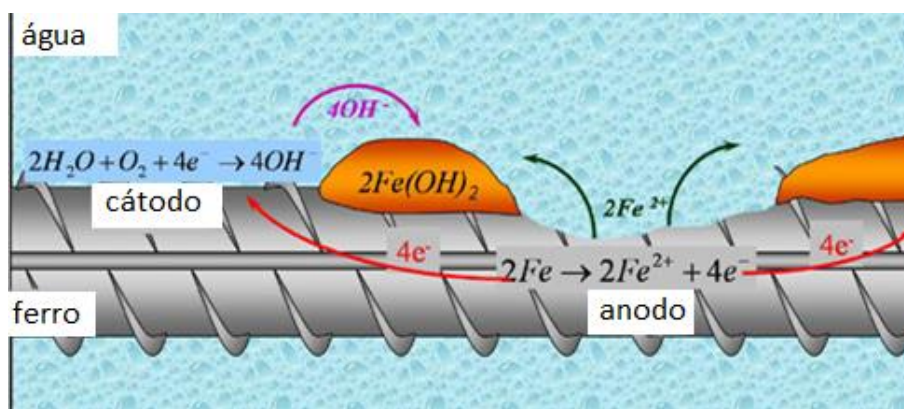


Figura 2.2: Processo eletroquímico da corrosão (adaptado de (Cavaco 2013))

Contudo, para haver corrosão é necessário que nos poros do betão estejam presentes simultaneamente água e o oxigénio para funcionar como eletrólito, sendo as taxas de corrosão insignificantes quando:

- existe uma camada de ferrugem que protege a superfície do aço diminuindo a velocidade do processo anódico e quando o betão ainda não se encontra carbonatado e não contém cloretos;

- a taxa de oxigénio que chega à superfície do ferro é baixa, no caso em que o betão se encontra saturado de água, diminuindo assim a velocidade do processo catódico;
- a resistividade elétrica do betão é elevada, por exemplo nas estruturas que se encontram em ambientes de humidade relativa baixa;

Os produtos produzidos no processo de corrosão normalmente provocam um aumento de volume em redor do varão e costumam ter entre 2 a 6 vezes mais o volume do ferro (Cavaco 2013; Papakonstantinou and Shinozuka 2013). Este aumento de volume provoca um aumento da tensão que pode levar à rotura do betão por tração, levando ao aparecimento de fendas e à delaminação do betão de recobrimento, deixando as armaduras mais expostas ao oxigénio e à água.

A corrosão acarretará ainda como consequências a perda de aderência entre o betão e as armaduras, devido às fendas e delaminação do betão, mas também devido aos óxidos de ferro por terem propriedades mecânicas muito inferiores às do ferro. A perda de secção devido à corrosão também leva a uma diminuição de resistência das armaduras, e, devido ao processo “Hydrogen Embrittlement” as armaduras também podem perder ductilidade. Este fenómeno dá-se quando o hidrogénio produzido na reação catódica migra para o interior das armaduras em vez de ser libertado para o eletrólito podendo ficar preso. Ficando o hidrogénio preso na matriz do aço este não permitirá que ocorra a deformação plástica, levando a que o aço rompa prematuramente. (Cavaco 2013; Kepler and Locke 2000; Lee, Noguchi, and Tomosawa 2002)

2.2 Fases da Corrosão

A corrosão pode ser dividida em duas fases, a fase de iniciação e a de propagação (Figura 2.3).

Na fase de iniciação as armaduras encontram-se protegidas por uma fina camada de óxidos de ferro (película passiva), impedindo o contacto com a humidade e oxigénio que se encontram nos poros do betão. Esta camada mantém-se estável devido à alcalinidade do betão, e, apesar de nunca deixar de haver corrosão, a sua velocidade é cerca de 1000 vezes inferior à velocidade da corrosão após a destruição desta película.

A fase de iniciação da corrosão é, assim, o período de tempo que medeia a construção e a destruição desta camada protetora. É, pois, neste iato temporal que os agentes agressivos existentes no meio ambiente, como o dióxido de carbono e os cloretos, ingressam no betão, provocando a diminuição do pH do mesmo:

- Carbonatação: à medida que o dióxido de carbono penetra no betão, o seu pH vai diminuindo, e, quando passa a valores inferiores a 9 a camada protetora deixa de estar estável começando a degradar-se;
- Os cloretos também ao penetrarem no betão e ao chegarem à superfície das armaduras, se em concentrações críticas, podem provocar a destruição local desta camada.

A segunda fase, a de propagação, começa quando o recobrimento se encontra carbonatado e a camada protetora está destruída. As taxas de corrosão nesta fase são muito maiores conduzindo à deterioração das armaduras e do betão em seu redor (Bertolini et al. 2004; Cavaco 2013).

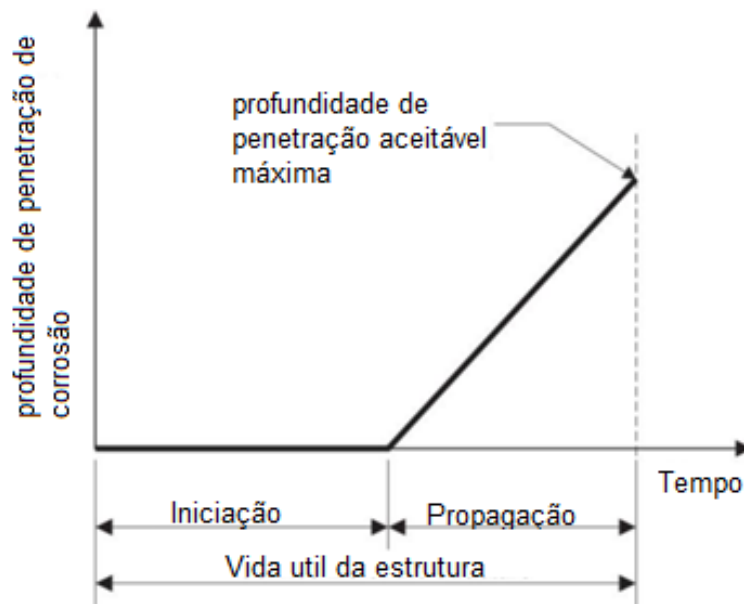


Figura 2.3: Período de iniciação e propagação da corrosão nas estruturas de betão armado (adaptado de (Bertolini et al. 2004))

2.3 Carbonatação do Betão

Como já anteriormente referido, o betão possui alcalinidade elevada. O seu pH, de aproximadamente 12, deve-se ao hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), ao hidróxido de sódio (NaOH) e ao hidróxido de potássio (KOH) que são produzidos durante a hidratação do cimento. Contudo, o dióxido de carbono (CO_2), presente na atmosfera e na presença de humidade, difunde-se pelos poros do betão e reage com o Ca(OH)_2 (equação 2.7), o NaOH (equação 2.8) e o KOH (equação 2.9) formando carbonato de cálcio (CaCO_3), carbonato de sódio (Na_2CO_3) e carbonato de potássio (K_2CO_3) respetivamente:





O pH diminui para 9-8 mercê da diminuição da concentração de iões de hidróxido, ocorrendo a despassivação das armaduras, e dando-se início à corrosão. A corrosão devido à carbonatação do betão é normalmente uniforme, ou seja, constante em toda a superfície do varão (Bertolini et al. 2004; Brown 1998; Cavaco 2013; Chang and Chen 2006; Gentil 1996).

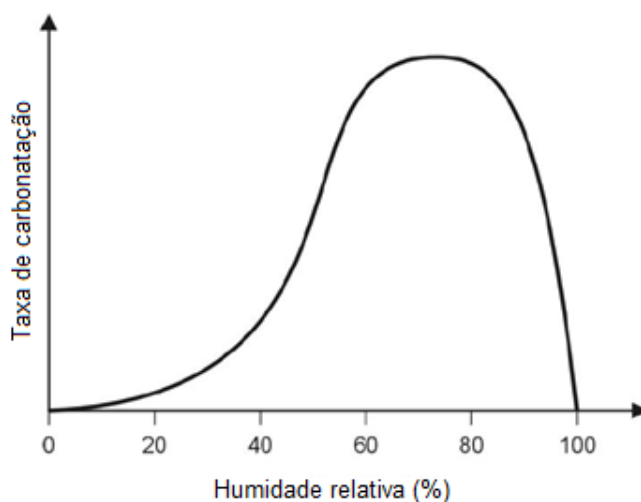


Figura 2.4: Taxa de carbonatação do betão em função da humidade relativa do meio ambiente, (adaptado de (Bertolini et al. 2004))

Conforme se pode observar a partir da Figura 2.4, a humidade relativa tem um papel fundamental no surgimento das reações da carbonatação, já que este processo requer a presença de água para dissolver o CO_2 em H_2CO_3 (ácido carbónico).

Podemos verificar nesta figura que em casos de humidades relativas entre os 0% a 40% a taxa de carbonatação é baixa, pois o CO_2 não se consegue dissolver devido à pouca quantidade de água, sendo este processo maior nos intervalos entre os 60 e 70%. No caso da humidade relativa estar entre os 90% e os 100%, que significa que os poros do betão se encontrem saturados de água, verifica-se uma diminuição da taxa de carbonatação já que o CO_2 não consegue entrar no betão (Bertolini et al. 2004; Cavaco 2013; Chang and Chen 2006).

2.4 Contaminação por Cloretos

A presença de cloretos é preocupante quando se fala de corrosão, já que destroem a camada protetora e aceleram o processo de corrosão. Os cloretos podem difundir-se pelo betão através

do meio ambiente devido ao nevoeiro salino, e água do mar. Contudo, também podem ser provenientes de agregados contaminados, água ou misturas (Cavaco 2013; Neville 1995).

A corrosão provocada pelos cloretos tem início quando a concentração de cloretos na superfície das armaduras atinge um valor crítico percentual. Quando este limite é ultrapassado os cloretos ativam a superfície das armaduras formando a zona anódica, funcionando a película passiva como cátodo, como se mostra na Figura 2.5.

As principais reações provocadas pelos cloretos são:

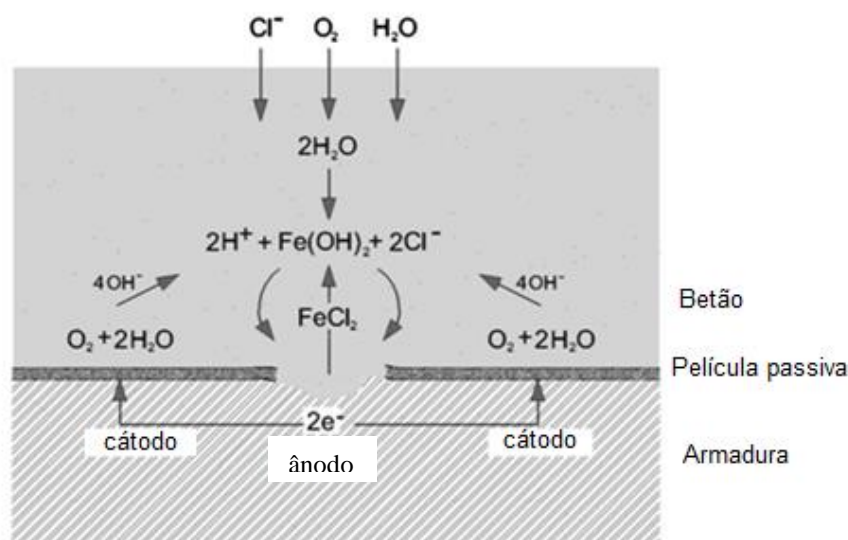


Figura 2.5: Representação esquemática da formação da corrosão localizada devido à penetração dos cloretos. (adaptado de (Silva 2013))

Como é possível constatar pela Figura 2.5 e Figura 2.6, as reações 2.10 e 2.11 precisam de oxigênio e água para se realizarem, contudo não são necessárias grandes quantidades de humidade para os iões de cloreto se difundirem. Note-se mais uma vez, que para que exista corrosão, os vazios do betão não podem estar saturados de água pois é necessária certa quantidade de oxigênio para alimentar as reações da corrosão (Figura 2.6). (Cavaco 2013; Silva 2013)

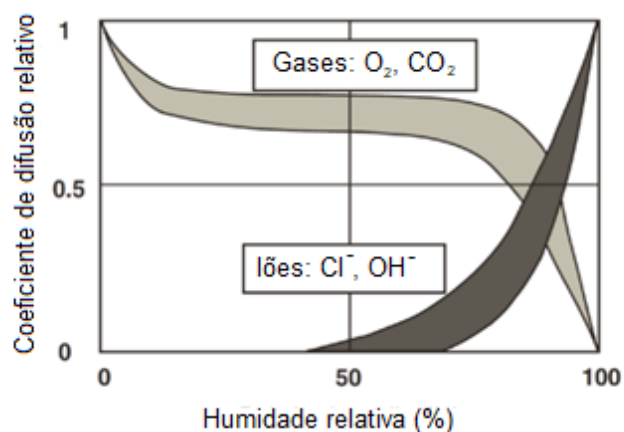


Figura 2.6: Influencia da Humidade relativa no coeficiente de difusão de gases e íons. (adaptado de (Silva 2013))

Neste processo de corrosão, o pH do betão tem também um papel importante, pois, quando o betão tem valores de pH altos a quantidade de cloretos necessária para atingir o valor limite de cloretos por percentagem de cimento é muito maior, pois as armaduras ainda se encontram protegidas pela película passiva e a concentração de íons de hidróxido é elevada. Quando o pH é reduzido para valores em que a película passiva começa a ser destruída e a concentração de íons OH diminui, a quantidade de cloretos para atingir este valor limite reduz drasticamente (Figura 2.7) Raupach 1997; Neville 1995).

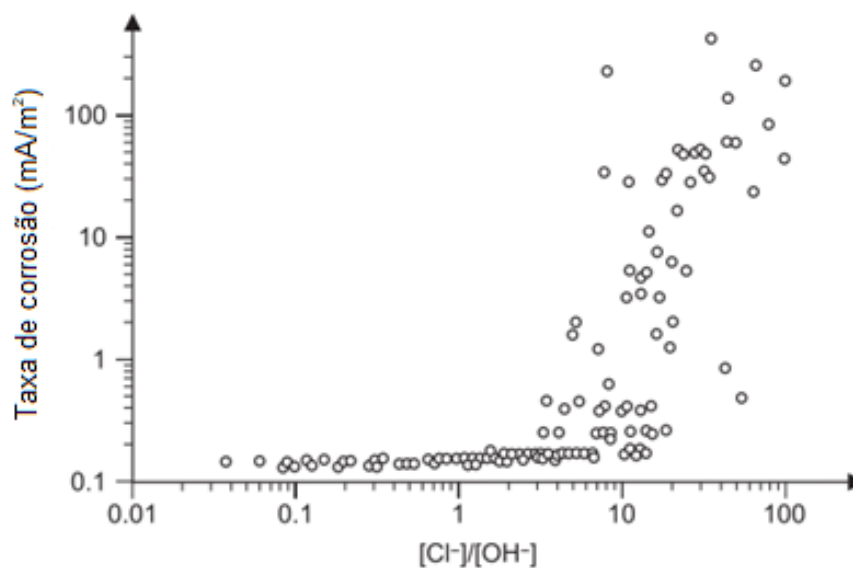


Figura 2.7: Taxa de corrosão do aço relacionada com a taxa concentração molar de Cl^- e OH^- nos poros do betão. (adaptado de (Bertolini et al. 2004))

2.5 Corrosão Uniforme vs Corrosão Localizada

A corrosão uniforme está associada à carbonatação do betão de recobrimento e à despassivação das armaduras ao longo de um comprimento considerável, e é mais provável de acontecer quando não existem irregularidades tanto no betão como na superfície das armaduras. A perda de secção das armaduras é uniforme ao longo de um certo comprimento quando se fala neste tipo de corrosão, e, as reações de redução e de oxidação são designadas de microcélulas, pois estão compreendidas numa distancia infinitesimal como mostra a Figura 2.8. Uma das consequências da corrosão uniforme é a perda de aderência entre o betão e as armaduras e a fendilhação do betão (Cavaco 2013).

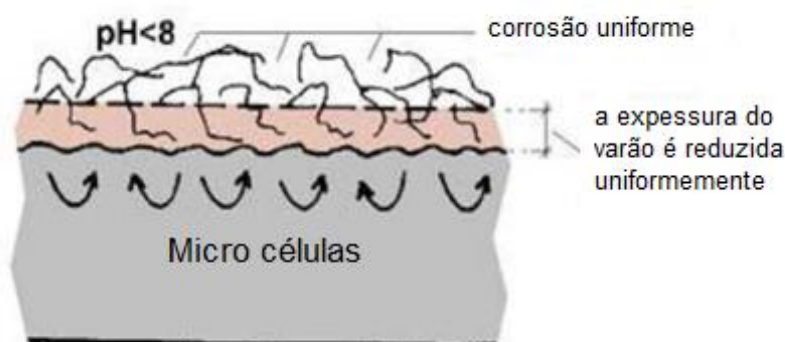


Figura 2.8: Corrosão uniforme e reações de corrosão microcélulas, (adaptado de (Cavaco 2013))

A corrosão localizada (em inglês denominada de “pitting corrosion”), representada na Figura 2.9, é muitas vezes pouco visível, já que não tem tanta tendência a provocar a fendilhação e delaminação ao betão de recobrimento. Uma das razões que potencia a corrosão localizada é a ocorrência de descontinuidades nos varões, como soldas e sobreposições de armaduras. A corrosão localizada está normalmente associada a elevadas concentrações de cloretos distribuídos não uniformemente ao longo das armaduras e diferenças espaciais das velocidades das reações de corrosão. Neste caso estamos na presença de macrocélulas de corrosão como exemplificado na Figura 2.10. A corrosão localizada tem como principais mecanismos de deterioração a perda de secção das armaduras diretamente ligada à perda de resistência/ductilidade.

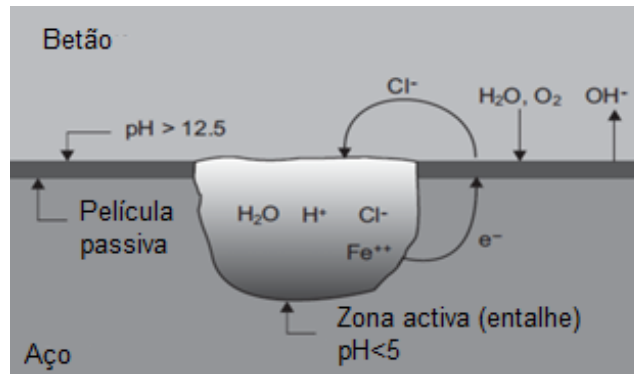


Figura 2.9: Representação esquemática da corrosão localizada nas armaduras dentro do betão. (adaptado de (Bertolini et al. 2004))

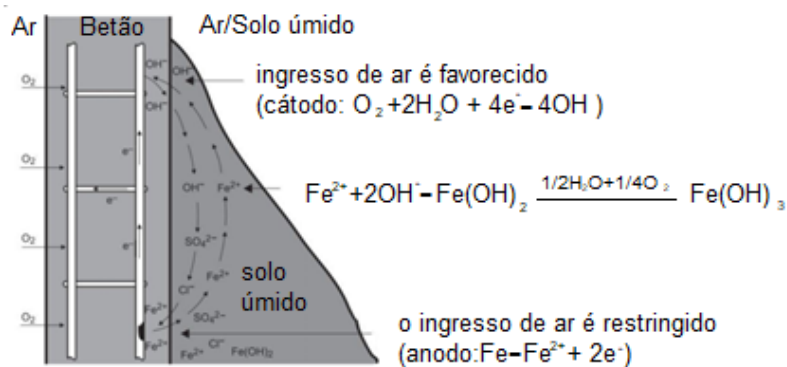


Figura 2.10: Representação esquemática de uma reação macrocell. (adaptado de (Bertolini et al. 2004))

2.6 Mecanismos de Deterioração do Betão Armado Devido à Corrosão

Os principais e mais preocupantes mecanismos de deterioração provocados pela corrosão são:

1. Redução da secção transversal das armaduras;
2. Fendilhação do betão;
3. Perda de aderência entre o betão e as armaduras;
4. Perda de resistência/ductilidade das armaduras.

Nas secções seguintes descrevem-se com mais detalhe os mecanismos referidos.

2.6.1 Redução da Secção Transversal das Armaduras

Conforme referido, no processo de corrosão, os íons de ferro (Fe^{2+}) são dissolvidos pela água levando a uma redução de secção do varão na zona anódica. Os óxidos de ferro que são produzidos no processo de corrosão não contribuem para a resistência das armaduras visto que as suas características mecânicas são muito pobres. A redução na secção transversal afeta diretamente a resistência à tração das armaduras e, em ultimo caso a sua ductilidade, caso a perda de secção não seja homogénea.

A corrosão depende muito das condições ambientais a que o betão está sujeito. No caso de ser um ambiente em que a humidade relativa é de 100% as taxas de corrosão são desprezáveis devido à falta de oxigénio, andando a volta de 0.1 a 1 $\mu\text{m}/\text{ano}$. No entanto, quando o betão se encontra carbonatado estas taxas aumentam chegando aos 50 $\mu\text{m}/\text{ano}$. Quando o betão está carbonatado e com pouca concentração de cloretos as taxas de corrosão passam a variar entre 50 a 100 $\mu\text{m}/\text{ano}$, podendo ser 10 vezes superiores quando o betão é de baixa qualidade (Figura 2.11).(Cavaco 2013; Tuutti 1982)

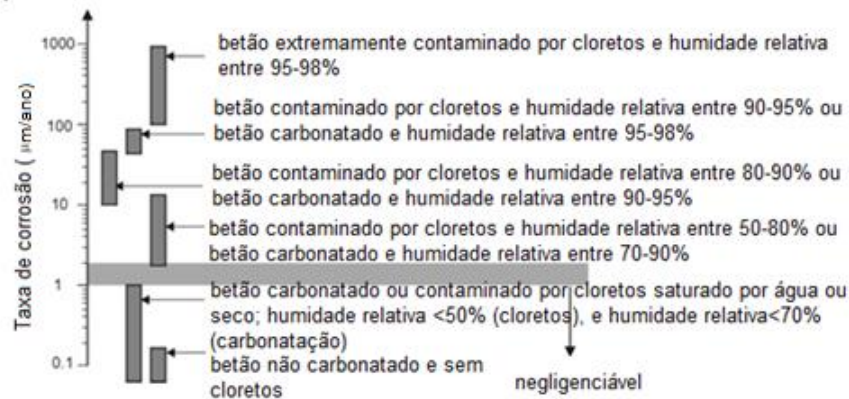


Figura 2.11: Representação esquemática das taxas de corrosão para diferentes betões e condições de exposição. (adaptado de (Bertolini et al. 2004))

Muitos estudos referentes ao efeito da perda de secção das armaduras têm sido realizados (Darmawan 2010; Stewart 2004; Vu and Stewart 2000). Nestes, analisam-se a geometria da secção corroída e o tipo de corrosão a que está sujeita (uniforme ou localizada) e alguns investigadores como (Stewart 2004) e (Rodriguez et al. (1996)) chegaram à conclusão de que quanto menor o diâmetro do varão maior será a perda de secção, como é possível observar na Tabela 1 e na Figura 2.12.

Tabela 1: Redução da secção de corte para corrosão uniforme e localizada, para $t=50$ anos, $i_{\text{corr}}=1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ e $L=800$ mm, (adaptado de (Stewart 2004))

| D_0 (mm) | Média (R) | Covariância (R) | Profundidade média do entalhe (mm) | Média (A_{entalhe}) (mm^2) | $A_{\text{entalhe}}/A_{\text{secção}}$ Corrosão localizada | $A_{\text{geral}}/A_{\text{secção}}$ Corrosão geral |
|---------------|--------------|--------------------|--|--|--|---|
| 8 | 7,00 | 0,18 | 4,1 | 23,0 | 0,457 | 0,269 |
| 16 | 7,68 | 0,16 | 4,5 | 41,4 | 0,206 | 0,140 |
| 24 | 8,08 | 0,16 | 4,7 | 57,0 | 0,126 | 0,094 |
| 28 | 8,23 | 0,15 | 4,8 | 64,0 | 0,104 | 0,081 |
| 32 | 8,36 | 0,15 | 4,8 | 71,6 | 0,089 | 0,071 |
| 36 | 8,48 | 0,15 | 4,9 | 78,4 | 0,077 | 0,063 |

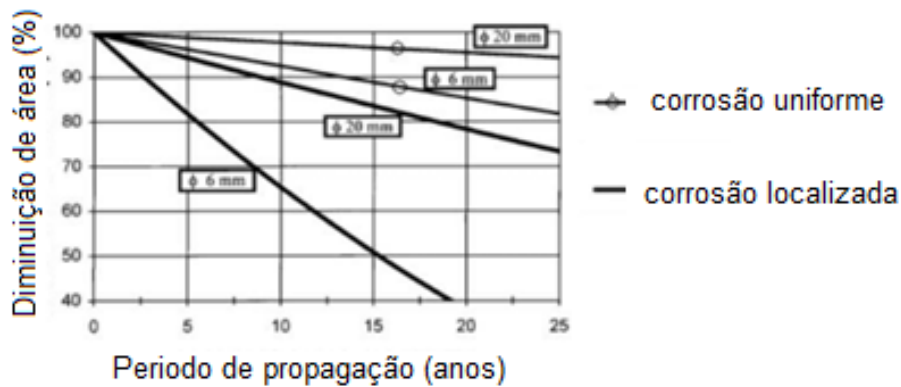


Figura 2.12: Perda de secção das armaduras dependendo do diâmetro, (adaptado de (Rodriguez et al. (1996)))

2.6.2 Fendilhação do Betão

A corrosão das armaduras é uma das principais causas da fendilhação. Os óxidos de ferro que se depositam na região anódica devido à corrosão têm volumes superiores ao volume do ferro que lhes deu origem (ver Figura 2.13), exercendo assim pressões radiais em torno das armaduras. Quando estas pressões excedem a resistência à tração do betão, este fendilha, deixando assim as armaduras ainda mais suscetíveis à corrosão. Contudo, numa fase inicial de corrosão, valores até um máximo de 2 a 2,5% de perda de secção, os óxidos de ferro preenchem os vazios do betão em volta da armadura melhorando o confinamento e aderência aço-betão.

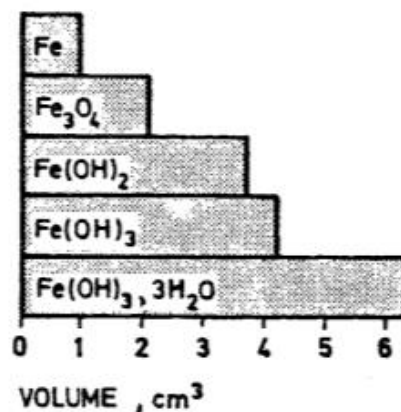


Figura 2.13: Volume relativo dos óxidos de ferro. (adaptado de (Cavaco 2013))

À medida que a corrosão vai aumentando, as pressões radiais aumentam levando ao aparecimento de microfissuras em redor das armaduras, sendo possível o aparecimento de fissuras longitudinais e transversais (Figura 2.14). Uma vez que as fissuras se espalham radialmente e transversalmente ao longo dos varões, pode levar à delaminação do betão deixando assim as armaduras em contacto direto com o meio ambiente e os agentes agressivos. Ressalva-se que este tipo de fissuras é principalmente consequência da corrosão uniforme (Cavaco 2013).

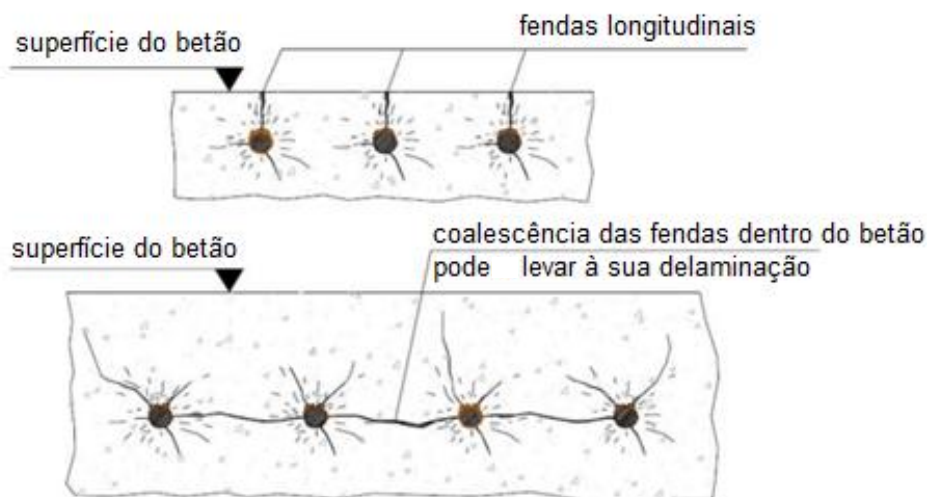


Figura 2.14: Abertura de fendas e delaminação do betão de recobrimento devido à corrosão das armaduras. (adaptado de (Cavaco 2013))

Nos casos de corrosão localizada a fendilhação e/ou delaminação do betão é menos provável quando comparada com os casos de corrosão uniforme, mesmo para maiores percentagens de perda de secção transversal. A razão para tal prende-se com o facto dos óxidos gerados na presença dos cloretos serem menos expansivos e pelo facto de zonas não corroídas aumentarem o confinamento das zonas mais corroídas.

Muitos investigadores estudaram o fenómeno da fendilhação do betão devido à corrosão, mas, devido à variação de vários parâmetros como o diâmetro dos varões e o recobrimento, os resultados são dispersos, sendo difícil dizer quando é que começa a fendilhação, já que varia entre 0.3% a 5% da perda de secção das armaduras.(Cavaco 2013)

2.6.3 Aderência Aço-Betão

A ligação entre as armaduras e o betão é de grande importância para as estruturas de betão armado pois é esta que assegura o comportamento compósito dos dois materiais aço-betão. Esta ligação é feita através da tensão de corte exercida entre as armaduras e o betão, sendo assegurada pela adesão química entre os dois materiais e pelo atrito resultante do confinamento.

Alguns investigadores como (Almusallam 2001) e (Fang et al. 2004), constataram que para níveis iniciais de corrosão a força de ligação entre o betão e as armaduras aumenta, devido ao preenchimento dos vazios em redor das armaduras aumentando assim o seu confinamento e a rugosidade das armaduras. Contudo, dá-se uma perda drástica da aderência quando começam a aparecer fendas longitudinais devido à redução do confinamento das armaduras e à reduzida resistência dos óxidos de ferro.

Diversos estudos experimentais ((Cairns and Ayop 2012; Fang et al. 2004; G. J. Al-Sulaimani I. A. Basunbul, and Rasheeduzzafar 1990; Kyle Stanish and S. J. Pantazopoulou 1999; Lee et al. 2002)), com resultados dispersos, demonstram que é difícil estabelecer uma relação quantitativa entre a percentagem de corrosão e a degradação da aderência aço-betão. A Figura 2.15 adaptada de (Fédération Internationale du Béton 2000) demonstra uma relação qualitativa entre a corrosão e a perda de aderência.

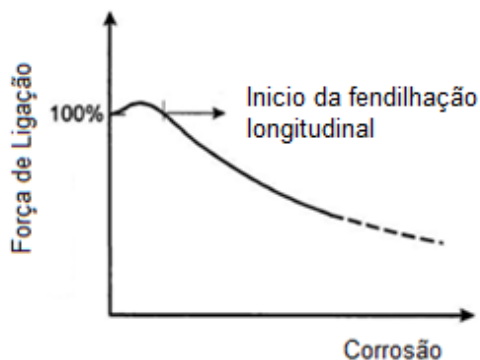


Figura 2.15: Variação qualitativa na força de ligação aço betão com corrosão. (adaptado de (Fédération Internationale du Béton 2000))

2.6.4 Perda de Resistência/Ductilidade das Armaduras

A corrosão faz com que as armaduras percam parte da sua secção transversal, reduzindo a resistência à tração dos varões e, conseqüentemente a capacidade dos elementos estruturais.

Contudo, normalmente em zonas em que a corrosão é localizada, a perda de ductilidade pode ser motivo de grande preocupação. Com efeito, e conforme referido, o fenómeno denominado de hydrogen embrittlement é um mecanismo de deterioração provocado pelo hidrogénio que leva à degradação das propriedades dos materiais metálicos, diminuindo assim a sua resistência e ductilidade. Quando o hidrogénio libertado nas reações da corrosão fica preso na matriz do ferro, este deixa de conseguir exibir um comportamento dúctil. Koyama et al. (2017), elaboraram ensaios de tração ao aço TWIP steel, e constataram que o aço rompeu antes da fase plástica, indicando uma rotura frágil (ver Figura 2.16).

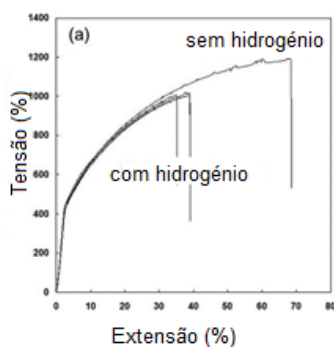


Figura 2.16: Perda de ductilidade devido ao fenómeno Hydrogen Embrittlement no aço TWIP. (adaptado de (Koyama et al. 2017))

3 Fotogrametria

A fotogrametria é “a ciência que permite a medida precisa das feições representadas numa fotografia, propondo-se estudar e definir com precisão a forma, natureza, dimensões e posição no espaço de um objecto qualquer, utilizando essencialmente medidas e observações feitas sobre uma ou várias fotografias” (Valença 2006).

A fotogrametria tem vindo a ser utilizada a partir século XIX, e, desde então tem sido sujeita a alterações e melhorias, tornando-se uma técnica de grande importância, utilizada em diversas áreas como engenharia, arquitetura, arqueologia, passando por vários marcos importantes na sua história (Marques 2016; Valença 2006):

- Mesmo antes de existir a fotografia, Lambert desenvolveu os fundamentos para resolver o problema da reconstituição de perspectiva, em 1759;
- Em 1858, dá-se o início da fotogrametria (*fotogrametria ordinária*) devido à obtenção de planos exatos de edifícios e pequenas extensões de terreno a partir de fotografias por Laussedat (pai da fotogrametria);
- Entre 1901-1902, separadamente, Pulfrich e Foucade aplicaram o princípio da visão em relevo com o objetivo de efectuar medidas estereoscópicas por meio de invenções suas, os estereocomparadores (estereofotogrametria analítica). Estes aparelhos permitiram deduzir as coordenadas ponto a ponto.
- Em 1909, Von Orel, contruiu o estereoautógrafo, utilizado para a obtenção e construção automática de planos, consagrando assim a fotogrametria terrestre;
- Na I guerra Mundial (1914-1918), a necessidade das duas partes intervenientes em obter informações do terreno inimigo e com a evolução da aviação, assistiu-se à tentativa de melhorar estes processos e aparelhos (estereofotogrametria automática).

A fotogrametria pode ser dividida em duas vertentes, a terrestre e a aérea, que são distintas uma da outra. Na sua vertente aérea, também designada de fotogrametria horizontal, o ponto de vista é fixo e determinam-se as suas coordenadas e a orientação da câmara, enquanto na sua vertente terrestre, também conhecida por fotogrametria vertical ou oblíqua, o ponto de vista está em movimento e não se sabe quais as suas coordenadas nem a orientação da câmara. É na sua vertente terrestre que, para que a reconstituição possa ser efectuada, urge conhecer um ponto exato que é impresso na fotografia (pontos fiduciais), questão e necessidade esta que foi resolvida através do teorema de Terreno – Hauck, o qual permite a orientação relativa das fotografias consecutivas por métodos óticos e mecânicos (Valença 2006).

Sendo a base da fotogrametria a fotografia importa, como ponto de partida, ter alguma noção dos seus constituintes. A fotografia, ou imagem digital, é uma representação discreta derivada

de uma imagem analógica dividida por N linhas e M colunas, em que os pontos de interseção entre estas são designados por pixels. Estes pontos caracterizam a imagem digital como também a intensidade luminosa das áreas discretas de uma cena, sendo que a esta intensidade luminosa é atribuída um escalar que designa o nível de cinza ou intensidade. (Valença 2006)

A imagem digital pode ser definida no plano 2D como uma função contínua $f(x,y)$ sendo que cada pixel é representado pelas suas coordenadas (x,y) , que em seu redor possuem pixels vizinhos. As relações entre pixels vizinhos é, assim, de grande importância pois é através destas que é possível estabelecer fronteiras dos objectos devido à sua conectividade e, através da distância entre pixels e com auxílio de uma escala real, consegue-se analisar as suas medidas como comprimentos e volumes (Valença 2006).

Este processo não é de utilização fácil ou linear, pois envolve várias etapas e cálculos matemáticos como a suavização e melhoramento de imagem, transformações da imagem como a translação, escala, rotação e perspectiva dos pixels, contudo esta análise está para além do objetivo desta tese, pelo que aqui fica apenas esta breve nota.

3.1 Vantagens e Desvantagens da Fotogrametria

Já muitos levantamentos foram efectuados através do recurso à fotogrametria quer por grupos de investigação, quer por empresas especializadas, sendo que muitos deles incidem na reconstrução tridimensional de monumentos históricos e construções bidimensionais das suas fachadas e na elaboração de cartas topográficas. Também na engenharia civil esta técnica tem sido utilizada principalmente para a monitorização das estruturas e para a análise do seu comportamento.

Como em todos os processos existentes, o uso desta metodologia apresenta vantagens e desvantagens inerentes.

Podem avançar-se como algumas vantagens (Valença 2006):

- Aquisição rápida de grandes volumes de dados;
- Técnica não destrutiva;
- As fotografias podem ser utilizadas, quer para monitorização, quer para geração de amostras, tendo a possibilidade de serem reavaliadas e complementadas a qualquer momento;
- Custo efetivo baixo;
- É conseguido um grande nível de exatidão e detalhe;
- Podem ser medidos movimentos e deformações (avaliação temporal).

Contudo, existem certos fatores que podem levar a falhas e interferir nos resultados finais, designadamente (Valença 2006):

- O número de estações fotográficas e a resolução da câmara pois vão influenciar a qualidade da imagem e afetar a deteção de pontos;
- O número de pontos a marcar depende das características do objecto e do nível de detalhe e precisão pretendidos;
- Levantamento das características do contorno do objecto a fotografar e sombras originadas pelos seus diferentes elementos e estudo da influência do horário solar na tomada fotográfica, e planeamento das estações em sua função.

3.2 Parâmetros de Controlo e Qualidade

Às grandezas medidas num ensaio experimental está sempre associada incerteza, isto é exatidão e precisão, que definem a qualidade das medidas efectuadas.

A precisão pode ser definida como a reprodutibilidade ou repetibilidade dos resultados, isto é, o grau de variabilidade do resultado de diferentes medições ou cálculos de uma mesma grandeza. No caso dos valores estarem próximos uns dos outros significa que o grau de precisão é elevado, caso contrário, se os valores dispersarem uns dos outros para medir a mesma grandeza estaremos perante valores pouco precisos. Contudo, importa notar que estar-se perante de um conjunto de valores precisos não significa que estes sejam exatos. A repetibilidade está associada à variação de resultados em que as condições se mantêm constantes e as medições são feitas sempre com o mesmo equipamento, num curto período de tempo. No que toca à reprodutibilidade, esta é a variação de resultados quando se utiliza o mesmo processo de medição, variando equipamentos e os técnicos, em longos períodos de tempo (Marques 2016).

A exatidão é a proximidade entre o resultado medido e o seu valor exato ou assumido como tal. Maior é a exatidão quando o valor medido está muito próximo do exato. Este valor exato é muitas vezes difícil de se obter sendo necessário recorrer a comparações entre outros ensaios ou métodos e calcular uma exatidão média.(Marques 2016). A Figura 3.1 explica com clareza a diferença entre valores exatos e precisos e a combinação entre estas duas definições.

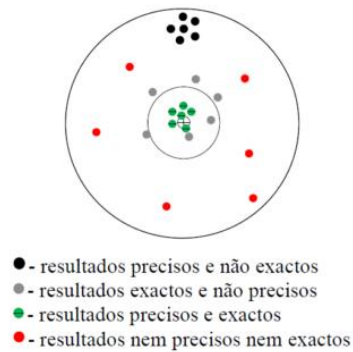


Figura 3.1: Representação de vários tipos de resultados precisos e exatos. (adaptado de (Marques 2016))

Quando se fala de precisão e exatidão, o erro, diferença entre o valor calculado e o valor real de uma grandeza, está diretamente associado e pode ser classificado em quatro tipos diferentes (Marques 2016):

- Erros grosseiros: estão associados ao descuido e à distração humana. São de fácil percepção pois normalmente divergem muito dos outros valores obtidos. Este tipo de erros, pode derivar ainda de erros de cálculo e má leitura da escala;
- Erros constantes: têm sempre o mesmo sinal e magnitude e são provenientes frequentemente dos próprios aparelhos de medição. Estes erros podem ser corrigidos com a devida calibração dos equipamentos;
- Erros sistemáticos: são provenientes de fontes identificáveis e ocorrem segundo um padrão conhecido ou não. A maneira de os atenuar quando o padrão é conhecido é através da modelação de um polinómio;
- Erros aleatórios: provocados por diversas causas, como causas temporais que são imprevisíveis e variam durante as sucessivas observações, sendo disto um exemplo a variação de temperatura.

3.3 Comparação entre a Fotogrametria com outros Métodos de Levantamento 3D

Existem várias maneiras de fazer levantamentos 3D sendo uma delas a fotogrametria com a utilização de camaras fotográficas e outra o scanning 3D que utiliza o varrimento laser para fazer as reconstruções tridimensionais. Quando se pretende realizar um levantamento tridimensional a escolha de um destes métodos por vezes é difícil, uma vez que estes levantamentos envolvem muitos factores como o tipo de objectos e o ambiente em que estão inseridos. Outros factores de grande relevância são os custos, portabilidade e adaptabilidade e o tempo investido na

realização destes levantamentos, sendo nestes 3 factores onde a fotogrametria consegue superar os outros métodos e apresentar resultados com níveis de precisão muito idênticos aos outros métodos (Porter, Roussel, and Soressi 2016).

Quando se fala de custos a fotogrametria consegue ser muito mais económica que o levantamento através de scanners 3D uma vez que os preços destes são elevadíssimos e com eles estão associados outros equipamentos para seu suporte. Hoje em dias as camaras fotográficas e os tripés são encontrados no mercado a preços muito acessíveis e como se poderá ver nas secções que se seguem não são necessários equipamentos muito sofisticados para os resultados adequados.

Os lasers/scanners para o levantamento 3D são equipamentos muito sensíveis e com dimensões consideráveis sendo necessário ter cuidados acrescidos no que toca ao seu transporte para o local onde se quer fazer o levantamento. Para tal é necessário a utilização de acessórios de transporte para garantir a segurança dos mesmos, e, devido às suas dimensões a sua adaptabilidade pode ser posta em causa, sendo outra questão importante a necessidade de fornecimento de energia que em certos locais pode não ser possível. A Fotogrametria não tem estes problemas uma vez que os equipamentos são de pequenas dimensões e de fácil transporte e adaptam-se a qualquer ambiente em que o objecto a ser reconstruído tridimensionalmente esteja inserido.

A fotogrametria é basicamente composta por duas fases: uma referente ao levantamento fotogramétrico onde são retiradas as fotografias; a outra consiste no tratamento destas fotografias e sua modelação 3D. Sendo difícil estimar exactamente quanto tempo leva um modelo 3D a ser executado. Contudo, depois de estudos e comparações entre vários investigadores (Porter et al. 2016), foi possível constatar que a fotogrametria no que toca à aquisição de dados brutos é em geral mais célere que os scanners.

3.4 Casos de Estudo

3.4.1 Capela de S. Jorge de Aljubarrota

Em Portugal, um dos levantamentos realizados através de fotogrametria foi a capela de S. Jorge de Aljubarrota, com o desiderato de determinar a geometria da estrutura e obter um modelo 3D renderizado desta (Figura 3.2). O equipamento utilizado foi uma câmara Nikon D70 com uma resolução de 3008x2000 pixels e uma lente de 50mm de distancia focal. A capela foi marcada com 24 miras devido às grandes extensões de parede branca sem pontos de referência; foram colocadas estações em todo o seu redor de modo a capturar toda a sua envolvente e os vértices e contornos da capela foram utilizados como pontos notáveis. Posteriormente foram medidas as

distâncias entre miras e alguns dos contornos dos quatro alçados, com vista à atribuição de escala ao modelo (Marques 2016; Valença 2006).

Este levantamento foi composto por 3 projetos, a saber, o projeto geral, que consistiu na realização de um modelo 3D da estrutura; o projeto de pormenor, onde alguns aspetos da fachada foram modelados com maior detalhe; e o projeto total, que consiste na inclusão do projeto de pormenor e geral.

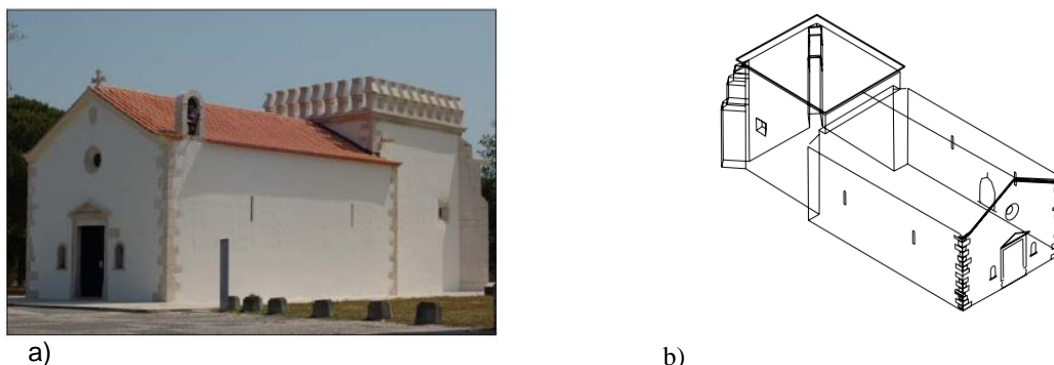


Figura 3.2: Capela de São Jorge de Aljubarrota (a), e o seu modelo renderizado (b). (adaptado de (Marques 2016))

Anteriormente ao levantamento fotogramétrico, havia sido efectuado um levantamento topográfico e realizadas algumas medições através de fita métrica com a finalidade de comparar resultados dos diferentes métodos e verificar a precisão e exatidão dos resultados. Constatou-se que com um fator de escala, a variação máxima entre o levantamento topográfico e o fotogramétrico era correspondente a 0.56%, o que corresponde a 4,5 cm num comprimento de 7.91m, e em relação à fita métrica esse valor foi de 0,61 % o que corresponde 0.5 cm num comprimento de 85,5 cm. Na Figura 3.3 é possível observar a diferença entre o levantamento topográfico e o fotogramétrico (Marques 2016; Valença 2006).

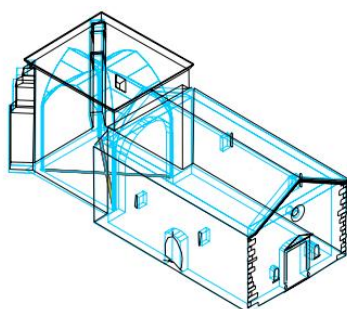


Figura 3.3: Sobreposição de modelos gerados pela fotogrametria e pelo levantamento topográfico. (adaptado de (Valença 2006))

3.4.2 Ensaio de Vigas de Grande Vão

Estes ensaios foram realizados com o intuito de analisar a viabilidade da fotogrametria no que toca à monitorização de ensaios laboratoriais. Estes ensaios foram realizados em vigas de grande porte pré-esforçadas com vão de 20 metros e secção transversal em I. Estas vigas foram sujeitas a dois tipos de ensaios: o de fluência e o de rotura.

Para a elaboração destes dois ensaios as vigas foram apoiadas nas extremidades e carregadas com duas forças concentradas, estando estas forças 7 m afastadas dos apoios. As vigas foram instrumentadas em varias secções com LVDTs no seu eixo longitudinal, sendo estas secções também utilizadas como pontos de controlo para os projetos de fotogrametria, sendo no total 9 pontos de controlo. As miras para o levantamento fotogramétrico foram de dois tipos, miras fixas, que se encontram na parede do laboratório, e miras móveis, que se encontram na viga, como mostra a Figura 3.4. (Valença 2006)

Estes ensaios tinham como objectivos: determinar a configuração inicial das vigas (contra flecha), e como através dos LVDTs não é possível obter esta informação a fotogrametria desempenha um papel fundamental na obtenção desta deformada, como também a deformada em várias secções da viga em várias fases dos ensaios; a validação da técnica da fotogrametria através da comparação dos resultados obtidos com os LVDTs e pelos obtidos na modelação através do método de elementos finitos.(Valença 2006)



Figura 3.4: Posição das miras fixas e móveis utilizadas para a realização do ensaio

Para a comparação de resultados entre os LVDTs e a fotogrametria foram utilizadas as miras fixas colocadas no banzo inferior da viga alinhadas com os LVDTs, sendo que os resultados dos LVDTs foram considerados os resultados exatos. No ensaio de fluência a variação média entre os valores dos LVDTs e o levantamento fotogramétrico foi de 0.83%, havendo só 3 valores superiores a 1%, o que significa que 70% dos valores foram inferiores a 1%. No ensaio de rotura a variação média foi de 0,96% e com um máximo de 5,19% (ver figura 3.5).(Valença 2006)

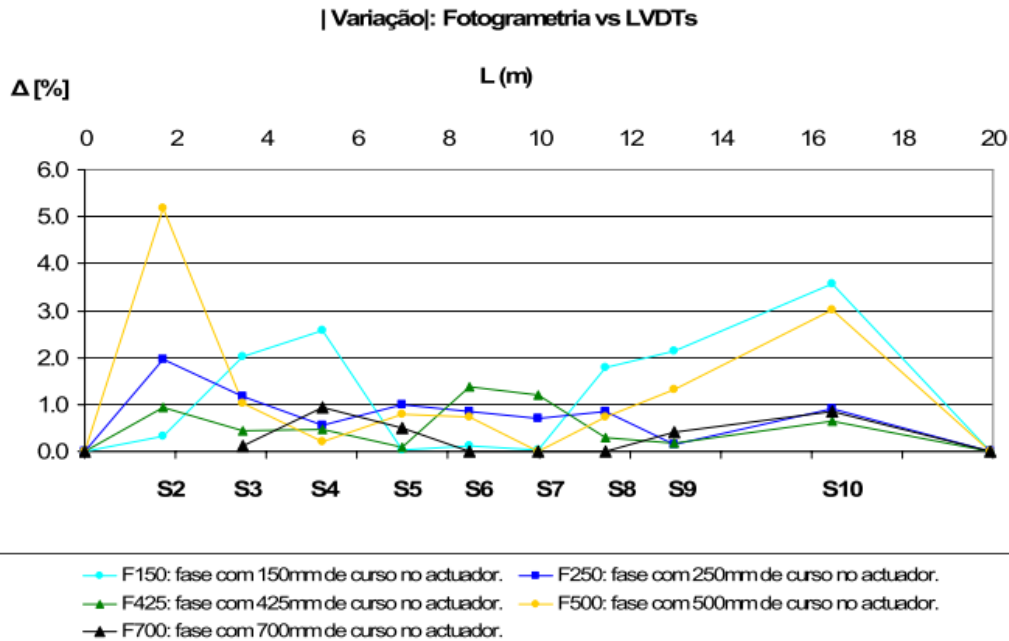


Figura 3.5: Variação dos resultados experimentais obtidos entre a fotogrametria e os LVDT's. (adaptado de (Valença 2006))

Com os resultados obtidos em ambos os casos de estudo é possível constatar que a fotogrametria é um método muito viável para a monitorização de estruturas, quer seja através de ensaios laboratoriais, quer de estruturas de grande porte, permitindo o conhecimento de deformadas em todo o comprimento dos elementos ao contrário de muitas técnicas tradicionais (como os LVDTs), que só fornecem esta informação em determinadas secções, e dá também informações tridimensionais ao contrário dos outros equipamentos que só fornecem informação unidimensional. Neste contexto, a fotogrametria pode ser considerada uma técnica mais rápida e com custos baixos, de fácil aplicação e com poucas limitações, em que a quantidade de informação registada e precisa é maior.

Através dos levantamentos topográficos também é possível fazer uma análise estrutural, pois estes conseguem gerar uma malha no método de elementos discretos. (Valença 2006)

4 Metodologia Experimental

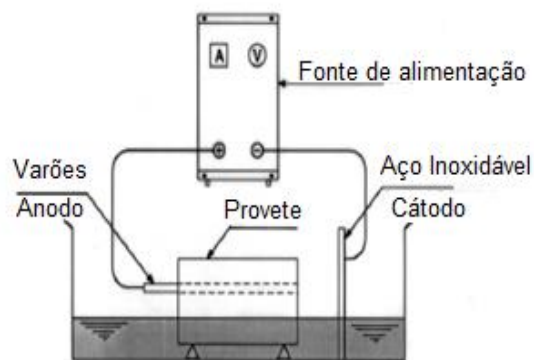
Este capítulo abordará todo o processo experimental realizado no âmbito desta tese. Serão descritos todos os ensaios realizados, entre eles, o ensaio de corrosão acelerada, a pesagem hidrostática, a medição da perda de área das secções ao longo dos varões, levantamento fotogramétrico e por fim a modelação 3D.

Estes ensaios têm como objetivo validar a fotogrametria como um método fiável para a análise da corrosão em estruturas de betão armado. Para tal, os valores obtidos da modelação 3D do levantamento fotogramétrico serão comparados com os ensaios laboratoriais com vista a avaliar a precisão e exatidão do método.

4.1 Ensaio de Corrosão Acelerada

Os ensaios de corrosão acelerada tiveram como finalidade acelerar o processo de corrosão das armaduras realizado em 3 provetes. Este ensaio permite reduzir drasticamente o período de iniciação para a despassivação das armaduras de anos para dias sem comprometer a realidade dos produtos de corrosão formados (Ahmad 2009). As dimensões dos provetes L1, L2 e L3 são 40*40*12 cm, e, cada um deles tem 6 varões: o provete L1, com 6 varões com diâmetro de 12, o provete L2 com 6 varões com diâmetro de 16 e o provete L3 com 6 varões com diâmetro de 20, sendo que o comprimento inicial dos varões é de 45 cm. Nenhum dos provetes continha estribos.

Os ensaios foram realizados dentro de um recipiente com 78*56*18 cm. Os provetes foram apoiados em duas vigas de madeira com 45*1*1 cm, e, por baixo destas vigas foi colocada uma chapa de aço inoxidável A316 para fechar o circuito elétrico. A corrente elétrica foi introduzida no sistema através de uma fonte de corrente direta. Conforme referido no capítulo 2, para que exista corrosão é necessário a presença de um eletrólito, neste caso uma solução de 5% de



a)



b)

Figura 4.1: Representação esquemática do ensaio de corrosão acelerada (a), e respetiva aplicação em laboratório (b)

NaCl. O betão de recobrimento dos provetes, com 2,5 cm, foi imerso nesta solução deixando apenas alguns milímetros entre as armaduras e a solução, com vista a esta chegar às armaduras por capilaridade e permitir a entrada do oxigénio nos poros do betão. A Figura 4.1 mostra o esquema utilizado para este ensaio.

Aos varões foram ligados cabos de cobre de 2,5 mm² através de abraçadeiras de aço inoxidável, e, por forma a isolar a ligação, foi utilizado silicone. Visto que a corrosão é uma reação exotérmica foi necessário arrefecer a laje durante o tempo de ensaio. Como mostra a figura 4.1, o terminal positivo da fonte de alimentação foi ligado às armaduras (elétrodo) de modo a estas funcionarem como ânodo, e, o terminal negativo foi ligado à chapa de aço inoxidável (contra elétrodo) funcionando esta como cátodo, sendo que a transferência de eletrões é feita através do eletrólito. A corrente entra no sistema do contra elétrodo para as armaduras por intermédio do betão e do eletrólito. Este processo de introduzir uma corrente constante para acelerar o processo de corrosão em pouco período de tempo também é conhecido pelo método galvanostático.

Depois de aplicar a corrente durante um período, o grau de corrosão pode ser determinado teoricamente através da lei de Faraday, ou através da perda de massa medida através de pesagem gravimétrica depois das armaduras terem sido retiradas dos provetes.

O objetivo do ensaio passou por fazer com que os 6 varões que se encontravam dentro do provete tivessem percentagens de corrosão diferentes: o primeiro 5% de corrosão e os restantes 10%,20%,30%,40% e 50% respetivamente. Para tal foi calculado o tempo a que cada varão atingiria a respetiva percentagem e seria desligado, continuando os outros a corroer. Para tal foram utilizadas as seguintes expressões (Zhang et al. 2014):

$$\Delta w = \frac{1}{4} \pi D_{so}^2 L p_{Fe} \eta_s \quad (4.1)$$

$$p_{av} \approx \frac{\Delta w}{\pi D_{so} L p_{Fe}} = \frac{1}{4} D_{so} \eta_s \quad (4.2)$$

$$p_{av} = 0,0116 i_{corr} t \quad (4.3)$$

em que: p_{av} é a penetração média da corrosão; Δw a perda de massa do varão corroído em gramas; D_{so} o diâmetro do varão em milímetros; P_{Fe} a densidade do ferro, $7,86 \cdot 10^{-3}(\text{g/mm}^3)$; I_{corr} a densidade de corrosão ($\mu\text{A/cm}^2$); t o tempo desde o início da corrosão em anos; L o comprimento do varão em milímetros; η_s a taxa de perda de secção média. A Figura 4.2 é uma representação esquemática da perda de secção média das armaduras corroídas.

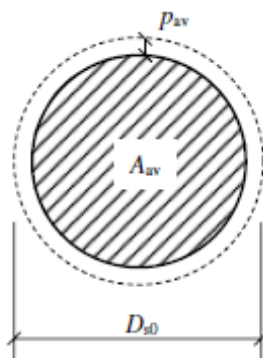


Figura 4.2: Perda de secção média das armaduras corroídas. (adaptado de (Zhang et al. 2014))

Dado estas equações, o período de tempo estimado para corroer os varões do provete L1 até às percentagens pretendidas, com uma corrente constante de 2A foi de 23 dias, para o provete L2 foi de 40 dias e para o provete L3 foi de 62 dias.

Contudo, a dificuldade em manter as condições do ensaio constantes durante o tempo estipulado e sendo a corrosão uma reacção complexa e sensível que depende de inúmeras variáveis, não foi possível obter as percentagens de corrosão desejadas. Ainda assim, foi possível observar o desenvolvimento dos mecanismos de deterioração do betão como a fendilhação, tanto longitudinal como transversal, provocando a delaminação do betão de recobrimento, sendo também possível observar a completa degradação do betão em redor das armaduras e também a produção dos diversos tipos de óxidos de ferro através das suas cores diferentes. Os mecanismos desenvolvidos e os óxidos produzidos na reacção da corrosão são mostrados na Figura 4.3. O provete L1 foi o único que se conseguiu manter intacto até ao final do ensaio, enquanto que o betão dos provetes L2 e L3 ficou totalmente deteriorado.



a)

b)

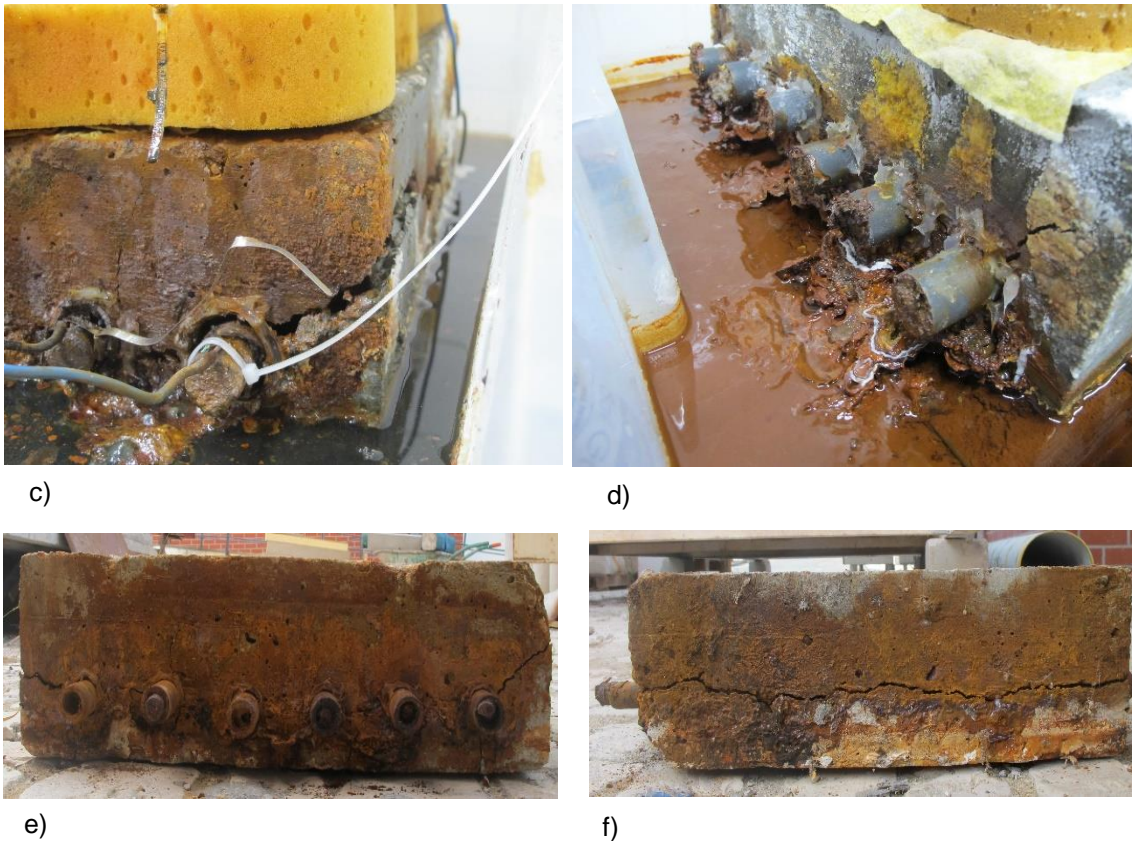


Figura 4.3: a), e) e f) Provete L1; c) e d) Provete L3; b) Provete L2

4.2 Pesagem Hidrostática

A pesagem hidrostática baseia-se no princípio de Arquimedes, e serve para medir a densidade e volume de sólidos através da impulsão que estes sofrem quando imersos num líquido. Esta pesagem é composta pela pesagem a seco (S), isto é, o objecto é pesado em condições ambientais, e pesagem húmida (I), que consiste na imersão do objecto num líquido, em geral a água. A pesagem húmida resultará inferior à pesagem a seco devido às forças de impulsão que são contrárias às forças de gravidade. A diferença entre as duas pesagens dividida pela densidade do líquido (ρ) permite-nos obter o volume do objecto:

$$V = \frac{S-I}{\rho} \quad (4.4)$$

Para executar a pesagem hidrostática foi utilizada uma balança hidrostática com capacidade até dois quilos e o líquido utilizado foi água, sendo a sua densidade 1 g/cm^3 . As balanças utilizadas são mostradas na Figura 4.4. A precisão da balança para a pesagem seca é de $\pm 0,1\text{g}$ e da balança para a pesagem hidrostática é de $\pm 0,01\text{g}$. De maneira a segurar o varão foi utilizada uma rede, e as medições foram realizadas quando o conjunto se encontrava estacionário.

Como já foi mencionado no capítulo 3, muitas vezes os valores reais são difíceis de estabelecer sendo necessário adotar, através de ensaios laboratoriais, um valor considerado como exato. É neste contexto que a pesagem hidrostática tem um papel fundamental no âmbito desta tese pois é através do recurso a este método que se vão estabelecer os valores exatos dos volumes dos varões corroídos, e a partir deles efectuar comparações com outros métodos para avaliar a precisão e exatidão dos mesmos. Para tal foram elaboradas 3 pesagens para cada varão utilizado e cada uma delas em dias diferentes.

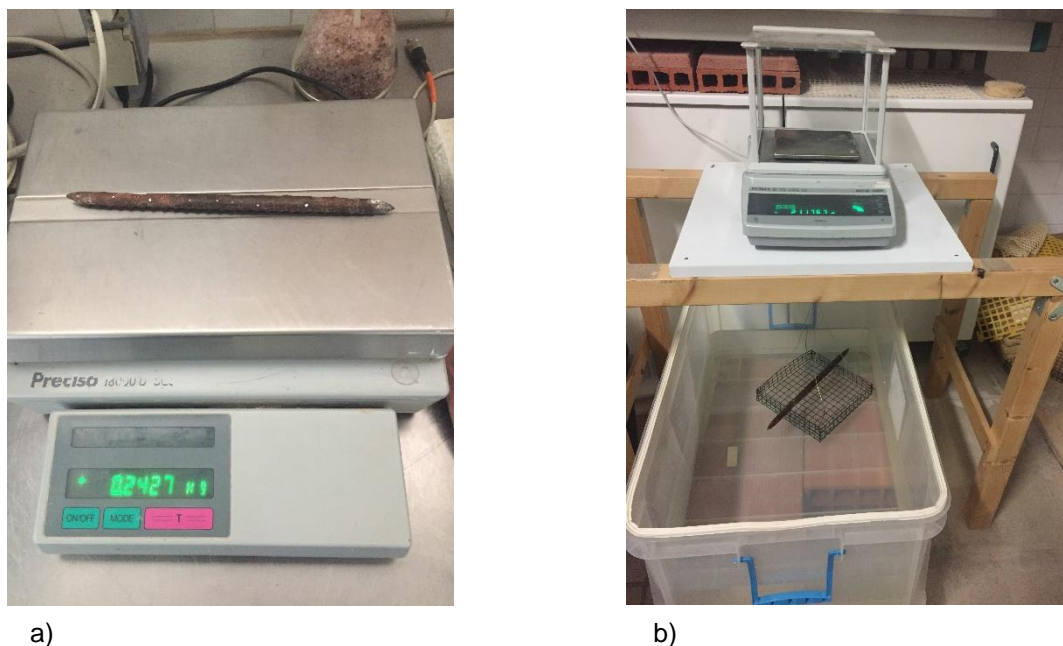


Figura 4.4: Balanças utilizadas para a execução das pesagens: a) Pesagem seca; b) Pesagem hidrostática.

4.3 Medição da Perda de Área com Craveira

Val e Melchers, propuseram um modelo para avaliar a perda de secção das armaduras com corrosão localizada com base na profundidade de penetração, p da mesma (em inglês “pit depth”) e assumindo uma geometria teórica para a secção transversal do varão corroído. A geometria proposta apresenta-se na Figura 4.5, em que a é a largura do entalhe (em inglês “pit”) provocado pela corrosão no varão e D_0 é o seu diâmetro inicial.

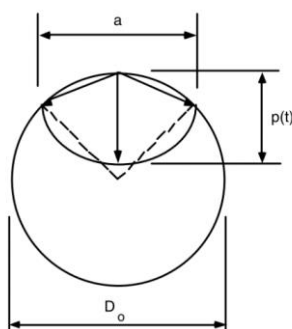


Figura 4.5: Configuração da área do “pit”. (adaptado de (Stewart 2004))

Através de relações geométricas é possível obter a área do “pit”:

$$a = 2p\sqrt{1 - \left(\frac{p}{D_0}\right)^2} \quad (4.5)$$

$$A_{pit}(t) = \begin{cases} A_1 + A_2, & p \leq \frac{p_0}{\sqrt{2}} \\ \frac{\pi D_0^2}{4} - A_1 + A_2, & \frac{D_0}{\sqrt{2}} < p \leq D_0 \\ \frac{\pi D_0^2}{4}, & p \geq D_0 \end{cases} \quad (4.6)$$

$$A_1 = 0,5 \left[\theta_1 \left(\frac{D_0}{2}\right)^2 - a \left(\frac{D_0}{2} - \frac{p^2}{D_0}\right) \right], \quad A_2 = 0,5 \left[\theta_2 p^2 - a \frac{p^2}{D_0} \right] \quad (4.7)$$

onde:

$$\theta_1 = 2\arcsin\left(\frac{a}{D_0}\right), \quad \theta_2 = 2\arcsin\left(\frac{a}{2p}\right) \quad (4.8)$$

Das equações anteriores resulta que a área efectiva do varão após corrosão, A_{st} é dada pela seguinte equação (4.9):

$$A_{st} = A_{stnom} - A_{pit} \quad (4.9)$$

Posto as equações que descrevem o modelo de Val e Melchers, apenas basta medir a profundidade do “pit” para calcular a perda de área de uma dada secção.

Para tal, os varões utilizados foram divididos ao longo do seu comprimento em diversas secções com vista a obter a perda de secção ao longo de todo o seu comprimento. As medições das profundidades de cada secção foram executadas com a ajuda uma craveira digital, com a precisão de 0,01mm (Figura 4.6).



Figura 4.6: Craveira utilizada para medir as profundidades p ao longo do comprimento do varão.

4.4 Levantamento Fotogramétrico

O levantamento fotogramétrico é, no contexto desta tese, a fase essencial, pois foi através deste que os varões foram modelados em 3D e foram tiradas conclusões a nível das suas medidas e perda de secção. Este levantamento pode ser elaborado com qualquer câmara digital, seja ela métrica ou não métrica, desde que sejam seguidas certas regras de captura de fotografias.

4.4.1 Equipamento e Definições da Camara

Recomenda-se que as câmaras a utilizar para este processo tenham uma resolução razoavelmente alta na ordem dos 5 MPixels ou superior, sendo também necessário ter em conta o tipo de lente que é usado, não sendo conveniente a utilização de lentes muito largas, isto é, lentes com distância focal curta, nem de lentes olho de peixe. Contudo, caso sejam utilizados estes tipos de lentes é necessário previamente indicar no programa qual o tipo de sensor da câmara. A melhor escolha para as lentes são as lentes focais de 50 mm, sendo recomendado utilizar a distancia focal entre 20 a 80 milímetros, sendo as fixas as preferíveis, e, caso sejam utilizadas lentes com zoom, a distancia focal deve ser a mesma durante todo o levantamento para que se obtenham resultados aceitáveis.

Para um bom levantamento é necessário também ter em conta algumas definições da câmara no que toca a formatos das fotografias e à sua resolução. A resolução da imagem engloba 3 campos: o ISO (sensibilidade do sensor de luz); a abertura da câmara; e a velocidade de disparo.

No que toca aos formatos das fotográficas, é preferível usar o formato RAW (estes formatos de arquivos de imagem contêm a totalidade dos dados da imagem capturados pelo sensor da camara, não havendo perda de dados), e convertido posteriormente para ficheiros TIFF, pois os ficheiros comprimidos JPG induzem ruído desnecessário nas imagens.

O parâmetro ISO é de grande importância quando se pretende que as fotografias capturadas tenham o máximo de qualidade possível. Quanto maior for o ISO, maior será a sensibilidade do sensor de luz, ficando assim a fotografia mais clara. Contudo, valores de ISO altos colocam em causa a qualidade da foto pois provocam ruído. Assim, em boas condições de iluminação convém que este parâmetro seja o mais baixo possível para minimizar este ruído. Na Figura 4.7 são apresentados 3 valores de ISO e as suas diferenças.

A abertura é um parâmetro mais complicado de se definir à priori pois este vai variar muito consoante a sua envolvente, por exemplo se a luz não for constante durante todo o levantamento é necessário proceder ao seu ajustamento. Neste contexto, este valor deverá ser o suficientemente alto para garantir profundidade focal de modo a que as fotos fiquem nítidas em toda a profundidade de campo.



Figura 4.7:Diferença entre os diferentes ISO

A velocidade do obturador não deverá ser muito lenta, caso contrário a imagem pode ficar desfocada devido a movimentos ligeiros do equipamento. Para evitar este problema muitas vezes recorre-se à utilização de tripés e também aos temporizadores das máquinas para as manter estáveis no instante em que a imagem é capturada.

Uma vez que a iluminação foi mantida constante em todos os levantamentos fotogramétricos, foi possível manter as definições das camaras fixas e iguais para todos estes levantamentos. Estas definições são apresentadas na tabela 2:

Tabela 2: Definições fixas das camaras

| Camara | MPixels | ISO | Abertura (f) | Velocidade do obturador (s) | Distância focal (mm) |
|-----------------|---------|-----|-----------------|-----------------------------------|----------------------------|
| Cannon 1200D | 18 | 100 | 5,6 | 1/200 | 27 |
| Cannon G11 | 10 | 80 | 4 | 1/20 | 6,1 |
| IPhone 6 | 8 | 32 | 2,2 | 1/200 | 4,15 |

4.4.2 Requisitos dos Objectos/Cenas Necessárias para um Bom Levantamento

É necessário ter em conta alguns requisitos no que toca às características do objecto. Se possível, são de evitar fazer o levantamento de objectos sem textura, brilhantes, espelhos ou transparentes. No entanto, caso seja inevitável, as condições luminosas têm de ser muito bem estudadas e em caso do objecto se encontrar a céu aberto as fotografias deverão ser tiradas

quando o céu estiver nublado. Também são de evitar objectos planos e devem ser evitados quaisquer movimentos dentro da cena para não dificultar a modelação 3D.

O numero de fotografias para um levantamento fotogramétrico não está pré-estabelecido, isto é, dependerá de objecto para objecto a quantidade de fotos para reconstruir o modelo tridimensional e poderá ser maior ou menor dependendo das suas dimensões e complexidade. Nas fotografias deverão ser evitadas zonas cegas pois os programas de modelação 3D apenas conseguem reconstruir geometrias visíveis a partir de duas câmaras, e cada fotografia deve usar o tamanho do sensor, devendo, o objecto ocupar o máximo deste. Em casos de levantamentos de objectos de grandes dimensões, não representará um problema a sua impossibilidade de captura numa só fotografia, contanto que as partes que não foram apanhadas estejam presentes no conjunto de fotografias (Agisoft LLC 2016).

Uma melhor qualidade de resultados também está ligada à iluminação, não devendo os flash das câmaras ser usados e a iluminação do objecto/cena, se possível, deve ser mantido constante.

A orientação e posição das câmaras também tem grande influência no resultado final do levantamento. Na Figura 4.8 ilustra-se algumas situações de captura correcta e incorrecta.

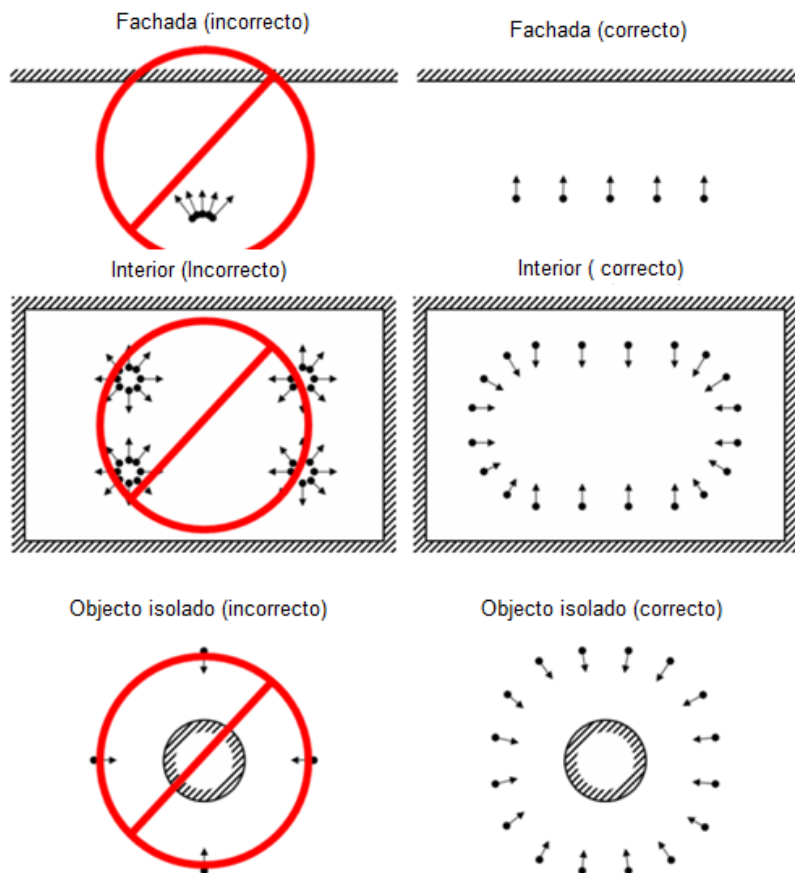


Figura 4.8: Varias medidas em ter em conta na altura de aquisição das fotografias

4.5 Sistema de Aquisição de Fotografias

Postas estas considerações e requisitos, foi construído um sistema de captura de fotografias por forma a facilitar a modelação 3D e com vista a obter resultados fiáveis. Este sistema implementado compreendeu um tripé, uma caixa de luz homogénea, uma base giratória, uma escala dimensional, dois holofotes com potencia de 1000W. Foram utilizadas 3 câmaras para fazer o levantamento fotogramétrico: uma cannon 1200D, uma cannon G11 e a camara de um iphone 6. O conjunto do sistema está ilustrado na Figura 4.12.

A base giratória foi executada com um recipiente de forma cilíndrica, e o seu interior foi enchido com gesso de modo a obter uma base estável para a colocação dos varões (Figura 4.9). Sobre este gesso foi colada a escala proposta por Samantha Thi Porter, para a modelação 3D de artefactos arqueológicos (ver Figura 4.10). Esta escala é composta por uma malha quadrangular milimétrica com 10*10 cm, sendo a distância entre os alvos A -C e B-D é de 12 cm. Em redor da escala estão marcados os ângulos em graus, com diferenças entre eles de 10°.

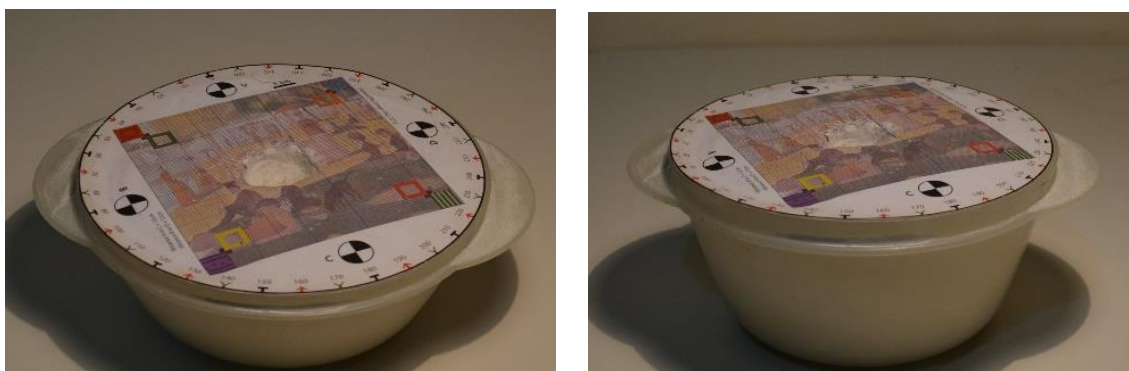


Figura 4.9: Base utilizada para promover a rotação dos provetes nos graus desejados, com escala proposta por Samantha Thi Porter.

Esta escala, para além de permitir escalar o modelo 3D com exatidão e precisão, facilita a reconstrução do modelo 3D devido à existência de múltiplos pontos de referência entre as diversas imagens capturadas.

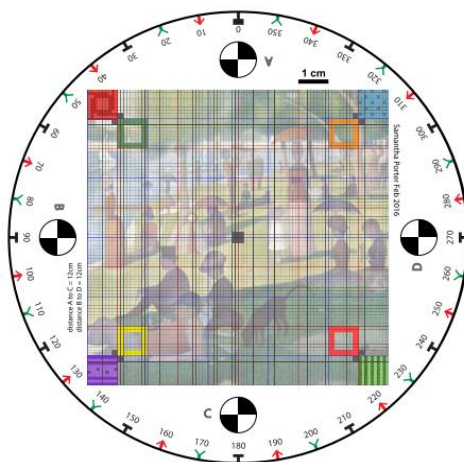


Figura 4.10: Escala utilizada para o levantamento fotogramétrico (adaptado de (Porter, Roussel, and Soressi 2016))

O tripé foi utilizado com dois objectivos essenciais: o de manter as câmaras estáveis e na mesma posição durante as várias capturas de imagem, e o de garantir 3 níveis de altura iguais em todos os levantamentos. A caixa de luz foi utilizada com o propósito de eliminar quaisquer sombras mantendo a iluminação constante em todos os levantamentos com o auxílio dos holofotes.

Uma vez que os varões utilizados apresentavam zonas mais brilhantes e que poderiam dificultar a reconstrução do modelo, foi utilizado pó de giz vermelho para que a superfície do varão estivesse ausente de reflexos de luz.

Como uma das pontas do varão ficou embutida no gesso por forma a este se manter na vertical, houve a necessidade de tirar dois conjuntos de fotografias a cada varão de forma a apanhar as duas extremidades do mesmo. Foram marcados com corretor vários pontos brancos na superfície do varão como o mostra a Figura 4.11 com vista a facilitar a junção destes dois conjuntos de fotos num só modelo.



Figura 4.11: Marcadores para facilitar a junção e referenciação dos dois conjuntos de imagens.



Figura 4.12: Sistema de aquisição de fotografias para o levantamento fotogramétrico.

Os 3 níveis de fotografias para cada varão estão apresentados no conjunto de figuras que se segue, e as fotografias estão representadas nos quadrados azuis. Os provetes mais pequenos apenas utilizaram dois níveis. As Figuras 4.14 à 4.18 são referentes a uma extremidade do varão, e é possível ver o nível superior, o intermédio e o inferior como também o conjunto destes 3 níveis em duas perspetivas, uma superior e outra frontal. Para a extremidade que está embutida no gesso o processo a executar é exatamente o mesmo dando os mesmos níveis de altura e as mesmas posições. Adiante na secção 6 do capítulo 4 desta tese será dada uma explicação mais acurada sobre a junção destes dois conjuntos de fotos para formar um só modelo tridimensional.

Considerando a difícil rotação da câmara em redor do varão optou-se por rodar o varão, sempre com a mesma amplitude (*in caso* 20 graus) ficando assim a câmara fixa.

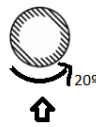


Figura 4.13: Rotação dos varões

Para análises posteriores também foi efectuado o levantamento fotogramétrico de partes de varões com comprimento de 5 cm. Para tal não houve a necessidade de tirar 3 níveis de fotos sendo só necessários apenas dois níveis uma vez que as dimensões destas porções de varões são muito inferiores às dos outros varões.

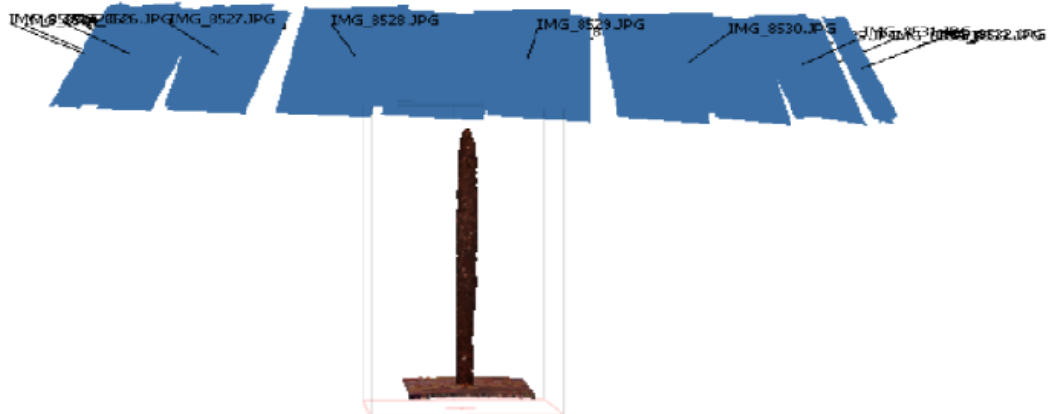


Figura 4.14: Nível superior do levantamento fotogramétrico do provete P3

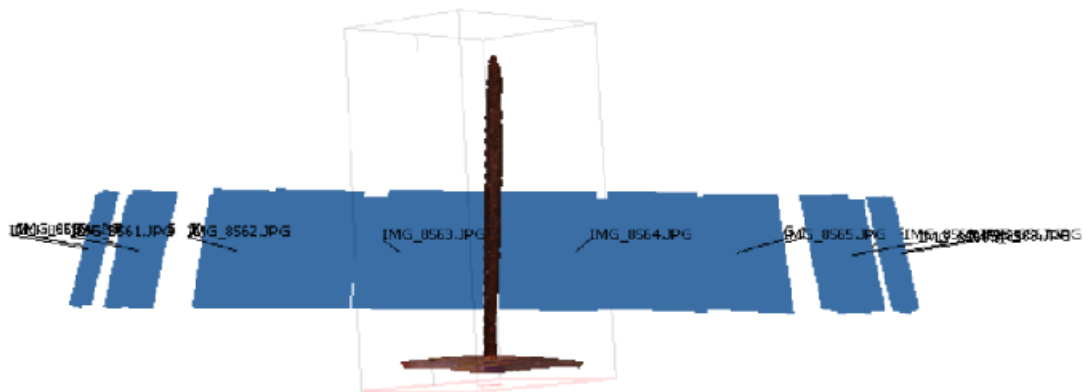


Figura 4.15: Nível inferior do levantamento fotogramétrico do provete P3

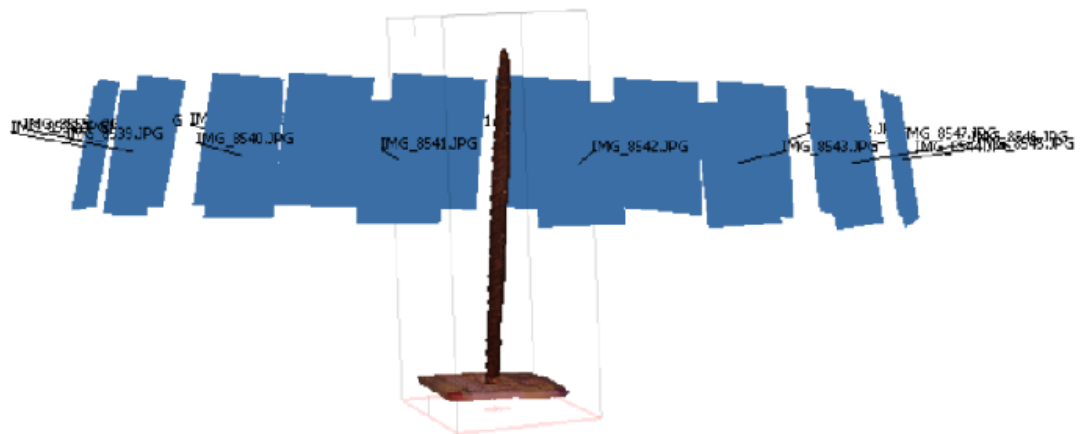


Figura 4.16: Nível intermédio do levantamento fotogramétrico do provete P3

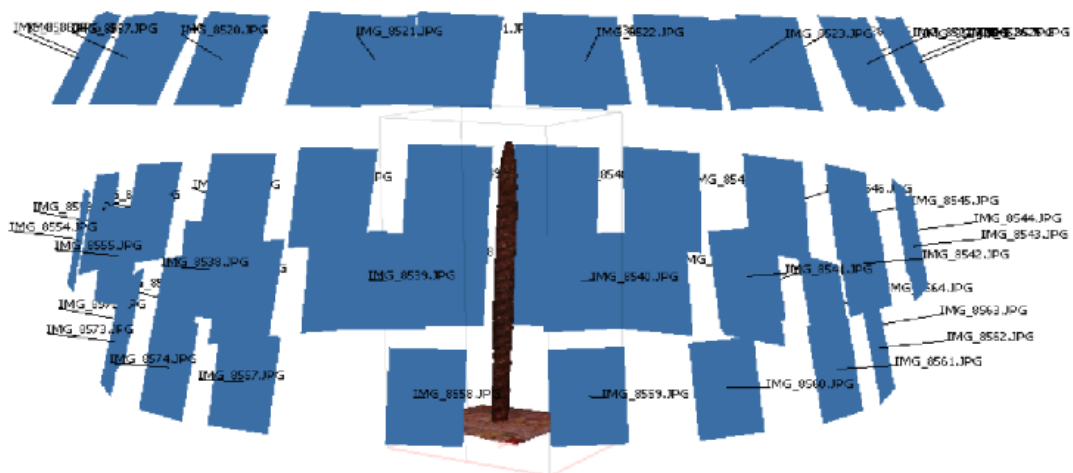


Figura 4.17: Perspectiva frontal dos 3 níveis em conjunto do provete P3

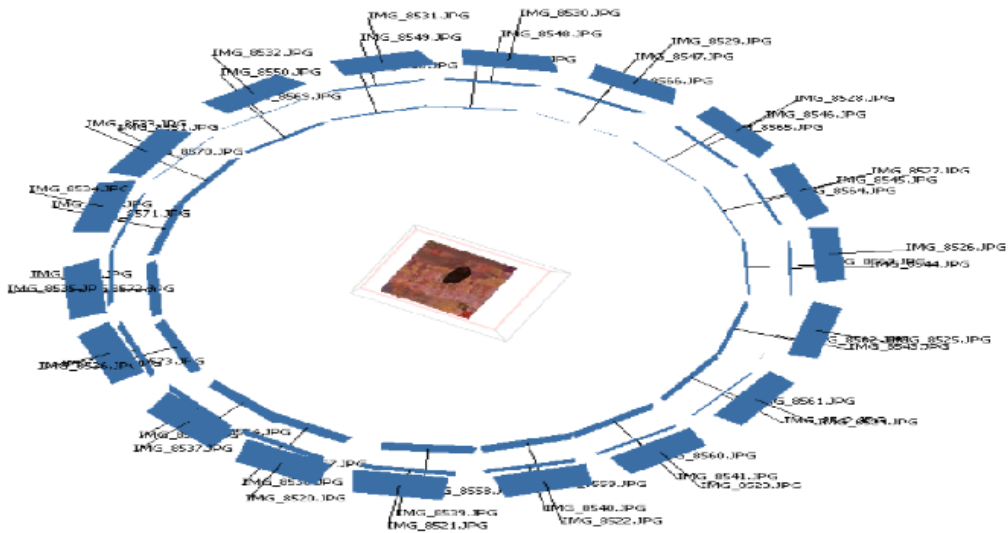


Figura 4.18 Perspectiva superior dos 3 níveis em conjunto do provete P3

4.6 Modelação 3D

Nesta secção serão descritos todos os passos e processos que foram utilizados na modelação 3D, no programa Agisoft Photoscan Professional Edition versão de teste 1.3.4, para uma melhor perceção do mesmo.

4.6.1 Adição, Organização e Tratamento das Fotografias

Uma vez que para a modelação completa dos varões foi necessário o levantamento de dois conjuntos de fotografias, também no programa será necessário fornecer esta informação através da criação de dois grupos (“blocos”) de fotografias, um para cada extremidade do varão.

Foram utilizadas máscaras, em todas as fotografias, para facilitar e reduzir o tempo de modelação dos varões. Estas máscaras têm como principais funções especificar as áreas da fotografia que não têm relevância para objecto e ignora-las nas fases de modelação. Assim, evitam-se resultados de reconstrução incorretos e com ruído e faz com que a modelação seja mais rápida uma vez que a área de reconstrução é menor, obrigando a uma menor interpolação de pontos.

A Figura 4.19 é um exemplo de aplicação da máscara numa fotografia. A zona mascarada é aquela que se encontra a preto, e é esta zona que vai ser ignorada nas fases de alinhamento de fotografias e construção da nuvem de pontos.

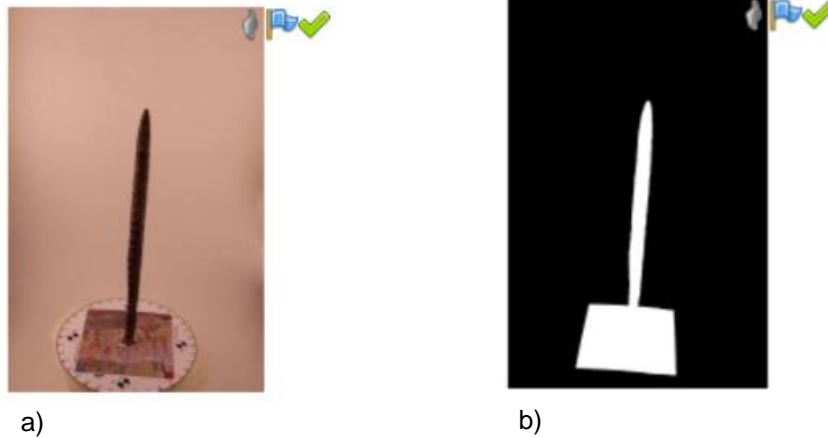


Figura 4.19: Utilização de máscaras para reduzir o tempo de computação: a) Imagem; b) Máscara respectiva

4.6.2 Alinhamento das Fotografias

Depois da aplicação das máscaras em todas as fotografias, é necessário proceder ao seu alinhamento. É nesta fase que o programa encontra a posição e a orientação das fotografias, construindo um modelo de pontos dispersos referenciados (“Tie Points”). É nesta fase que o algoritmo de referenciação do programa procura, usa e referencia pontos comuns nas várias fotografias. A Figura 4.20 mostra os pontos comuns encontrados pelo algoritmo entre duas fotografias, a azul são os pontos comuns válidos e a vermelho os inválidos (são aqueles que o programa vai tentar analisar na combinação de outras fotos). O mecanismo de funcionamento deste algoritmo está no entanto fora do âmbito desta tese. Uma vez concluído este processo, o programa exibirá este modelo de ponto e permitirá ver a posição das câmaras. Contudo, este modelo pode conter pontos que se encontrem dispersos à volta do objecto, sendo necessário o proceder à sua eliminação, sendo a Figura 4.21 um exemplo do modelo logo após a sua criação e posteriormente editado já sem os pontos indesejáveis.

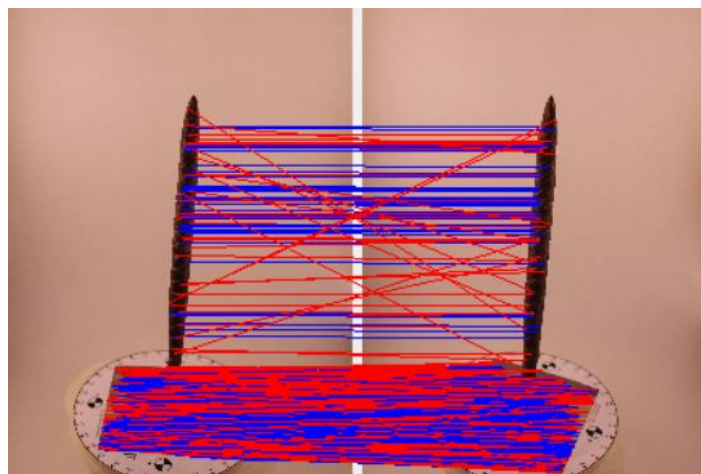


Figura 4.20: Pontos comuns nas duas fotografias.

Este processo é de grande importância na modelação, pois é a partir deste modelo de pontos dispersos que se vai continuar a modelar. Neste contexto, se através deste conjunto de pontos não for possível ter uma ideia do objecto que se quer modelar, algo estará errado, podendo-se desde logo equacionar como causas a insuficiência numérica de fotografias, ou a sua má qualidade, e acarretará como consequência um potencial novo levantamento fotográfico, sendo do aqui agora exposto a Figura 4.22 um exemplo.

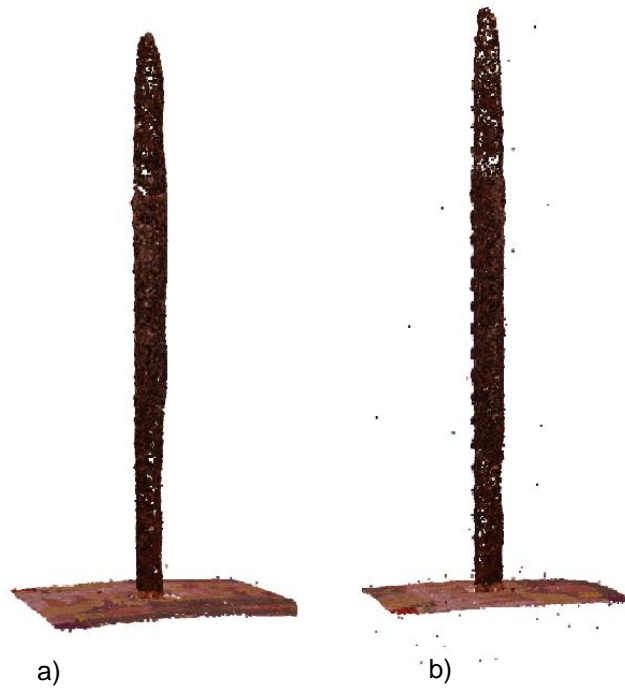


Figura 4.21: a) modelo editado; b) modelo não editado.



Figura 4.22: Falha na criação do modelo de pontos dispersos.

Vão ser explicados alguns parâmetros utilizados no alinhamento de fotografias para uma melhor percepção do mesmo. No menu de alinhamento é possível mudar alguns parâmetros para melhorar a qualidade e velocidade de obtenção dos resultados, sendo estes a precisão, pré-seleção de pares, limite de pontos-chave, o limite “Key Points”, o limite “Tie point” e a restrição pelas máscaras.

No que toca à precisão do programa, este dispõe de 5 níveis, desde o baixo ao muito alto, sendo que o alto é o aconselhado pois fornece resultados mais precisos no que toca a estimar a posição das câmaras, pese embora, se torne um processo mais moroso quando comparado a um processo que use níveis de baixa precisão. Com efeito, no nível alto, o programa trabalha com a máxima qualidade e tamanho original das imagens, sendo que nos outros níveis assiste-se a uma redução de escala.

A pré-seleção de pares é uma ferramenta que ajuda a que o processo não seja tão moroso, pois o processo de alinhamento de grandes conjuntos de fotos pode demorar muito tempo. Através deste parâmetro é possível seleccionar subconjuntos de pares de imagens a serem correspondidos, sendo que no modo utilizado, modo genérico, os pares de fotos sobrepostas são seleccionados ao combinar fotografias usando primeiro o nível mais baixo de precisão.

O limite “Key Point”, é o valor máximo de pontos a serem considerados em cada imagem durante o processo de alinhamento, salientando-se que, perante um uso do valor 0, o programa procura o máximo de pontos possíveis que podem ser encontrados nas fotos. Contudo, é sempre conveniente estabelecer um limite para que não existam demasiados pontos indesejáveis. O limite “Tie point” é o número máximo de pontos que o modelo de pontos dispersos vai ter, o qual, associado à opção de restrição pelas máscaras seleccionada, significará que o programa vai ignorar tudo o que se encontrar por detrás destas máscaras.

4.6.3 Construção do Modelo de Nuvem de Pontos (“Dense Cloud”)

Esta nuvem de pontos é baseada na estimativa da posição das câmaras e no cálculo da profundidade de cada câmara, e para uma boa construção desta o alinhamento das fotografias tem de estar com boa qualidade, pois será através do alinhamento que esta “Dense Cloud” será construída. Na Figura 4.23 é de fácil percepção que o modelo de nuvem é muito mais denso que o modelo de pontos disperso. Para a construção desta nuvem é necessário ajustar a caixa de construção do modelo na secção do alinhamento, devendo todo o objecto estar contido nesta caixa para a sua completa modelação. Esta caixa pode ser visualizada na Figura 4.26.



Figura 4.23: a) Modelo de pontos dispersos; b) Modelo de nuvem de pontos.

Esta nuvem de pontos utiliza dois parâmetros: a qualidade da reconstrução e o modo de filtragem de profundidade. A qualidade da reconstrução tem, igualmente, os mesmos 5 níveis que o alinhamento, sendo que no nível mais alto se consegue obter maior precisão na geometria do objecto, pese embora o tempo de modelação seja muito superior podendo demorar várias horas.

Nesta fase da nuvem de pontos o programa calcula os mapas de profundidade de cada imagem e neste contexto, o ruído ou a má focagem de fotografias pode fornecer pontos isolados ao conjunto de pontos, os quais poderão ser eliminados através do programa que contém, para este efeito, vários algoritmos de filtragem que dão resposta aos diferentes tipos de projetos.

Existem 3 modos de filtragem de profundidade: Suave, Moderado e Agressivo. Sendo o usado em todos os projetos no âmbito desta tese o modo Agressivo.

- Suave: quando é importante modelar pequenos detalhes que se encontrem espacialmente distanciados na cena. Este modo serve para não considerar estes detalhes como pontos isolados, não os eliminando.
- Agressivo: quando a área a ser reconstruída não tem pequenos detalhes isolados. Serve para eliminar todos os pontos que não se encontrem em redor do objecto.
- Moderado: é um modo de filtragem que se encontra entre os dois modos anteriores.

4.6.4 Construção do Modelo de Malha (“Mesh”)

O modelo de malha corresponde ao modelo digital 3D do provete podendo ser exportado para outros programas, estando representada uma malha na Figura 4.24. Os parâmetros relevantes na sua construção são o tipo de superfície, dados de origem, contagem de polígonos, e interpolação.

No que diz respeito ao tipo de superfície, este parâmetro pode ser dividido em duas opções: arbitrário e campo de altura. Enquanto a opção arbitrário pode ser usada para modelar qualquer tipo de objecto, e normalmente é seleccionada para a modelação de objectos fechados, a opção campo de altura, é a mais utilizada para modelar superfícies com dupla curvatura, como terrenos, devendo ser seleccionada quando são utilizadas fotografias aéreas. Importa salientar que a opção arbitrário, não faz qualquer suposição sobre o objecto a ser modelado o que pode levar a uma maior utilização de memória.

A origem dos dados pode ser proveniente ou da nuvem de pontos ou do modelo de pontos dispersos. Contudo, para obter uma melhor qualidade e detalhe de resultados deve-se utilizar a nuvem de pontos, embora seja um processo de modelação menos célere.

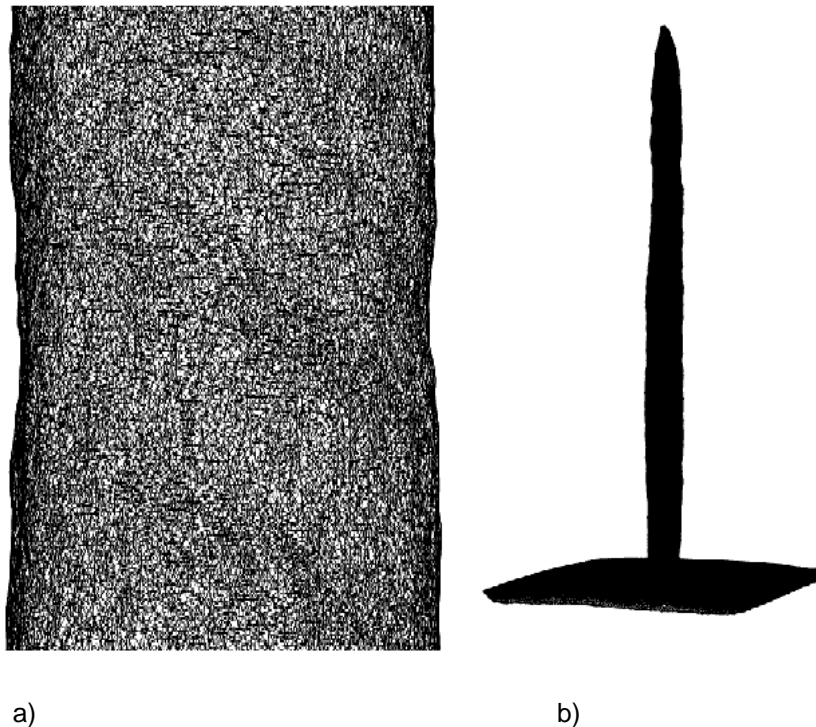


Figura 4.24: Malha do modelo malha da bloco 1 do provete P3

A contagem de polígonos consiste no numero de polígonos que o modelo malha terá quando acabada a modelação, havendo 3 valores a escolher, a saber: o alto, médio e o baixo. Este valor também pode ser assumido manualmente pelo modelador, não devendo, porém, exagerar no

numero de polígonos, já que o seu uso em demasia poderá, pois, causar problemas na visualização do modelo noutros softwares.

No que se refere à interpolação, esta apresenta 3 opções: a desativar, sendo os resultados da reconstrução alcançados com esta opção os mais precisos na medida em que esta só utiliza os pontos da nuvem de pontos; a opção ativar, que interpola algumas áreas de superfície dentro de um círculo com um certo raio à volta de todos os pontos da nuvem de pontos; e, por fim, a extrapolação, em que o programa gera um modelo sem buracos com a geometria extrapolada. Para a criação dos modelos de malha dos provetes a opção utilizada foi a desativar.

4.6.5 Junção de Blocos

Todo o processo descrito na modelação como o alinhamento de fotografias, a construção da nuvem de pontos e a execução do modelo de malha foram executados nos dois conjuntos de fotografias, sendo necessário, nesta fase, juntá-los. Esta junção foi efectuada com o auxílio dos pontos marcados a corretor nos varões, tendo-se, a cada um destes pontos, associado no programa um marcador que corresponderá ao mesmo ponto nos dois blocos, sendo estes marcadores postos no modelo de malha. Veja-se, por exemplo, que o ponto marcado com o marcador 1 do bloco 1 terá de corresponder ao mesmo ponto marcado com o marcador 1 no bloco 2, como mostra a figura 4.25, para que depois da rotação dos blocos o varão consiga ficar



Figura 4.25: Junção de blocos.

bem alinhado. Estes marcadores têm de ser no mínimo 7, mas quantos mais forem possíveis colocar melhor para reduzir ao máximo o desvio dos blocos.

Estando os blocos alinhados é necessário proceder à eliminação das partes sobrepostas do varão para que não seja assumido o dobro do volume, sendo o produto final representado na Figura 4.27. Conforme se poderá observar, foi deixada uma parte da escala, para que posteriormente se possa escalar o modelo. Uma vez que o modelo já não tem sobreposições de blocos é preciso fundi-los, utilizando-se as ferramentas de junção de blocos. Conforme melhor se pode observar nas Figuras 4.26 e 4.27, as caixas de edição deixam de ser duas passando a se unir e formando apenas uma com o modelo inteiro.



Figura 4.26: Remoção das partes da escala que não são necessárias.

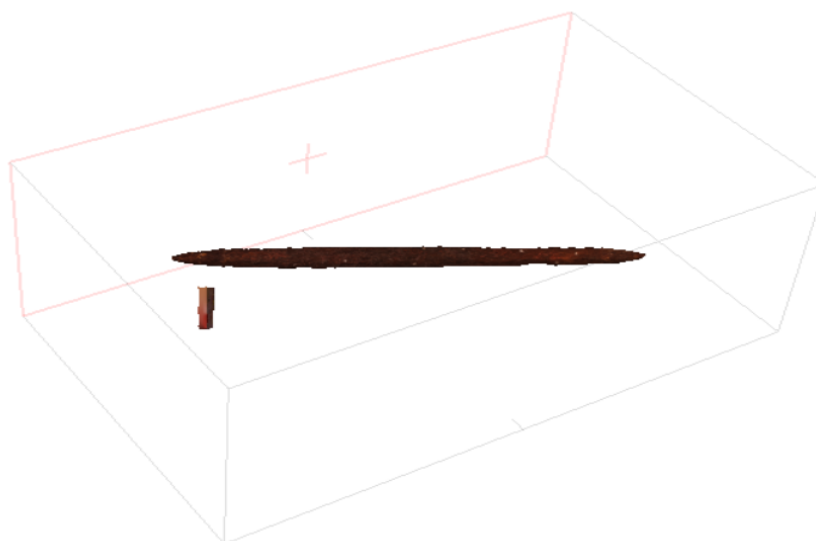


Figura 4.27: Junção dos dois blocos (apenas uma caixa de construção).

4.6.6 Exportação de Resultados

Uma vez estando todos os processos anteriores realizados pode-se, então, proceder à exportação dos resultados com vista a usá-los noutra programa que, no âmbito desta tese, foi o programa da autodesk, o 3DS max. Contudo não é necessário exportar todos os blocos, bastando apenas exportar aquele que já tem a fusão dos blocos. O ficheiro em que o modelo é guardado é o Wavefront OBJ, e posteriormente aberto no 3DS max.

4.7 3DS Max

O 3DS max foi utilizado para retirar os volumes de fatias com largura infinitesimal, para que posteriormente fosse possível calcular a área das secções ao longo dos varões corroídos. Também foi utilizado para verificar se as reconstruções tridimensionais estavam bem escaladas, isto é, se os varões tinham o comprimento real. Caso não acontecesse, era necessário corrigir a escala de modo a que os modelos dos varões tivessem o comprimento exatamente igual ao real.

O 3DS max tem ferramentas como o “slice” que permitem cortar planos através do modelo de malha, o que fez com que fosse possível retirar os volumes das fatias e sabendo que:

$$V = A\Delta L \quad (4.10)$$

Foi possível determinar as áreas de todas as 57 secções, uma vez que se sabe o volume e o ΔL , que foi um valor fixo de 0,1 milímetros, sendo a figura 4.28 a representação de uma fatia. É preciso ter em consideração as unidades em que o programa esta a trabalhar podendo ser necessário proceder à sua modificação.

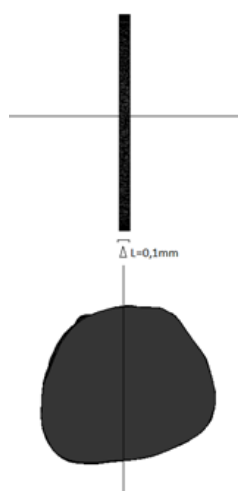


Figura 4.28: Representação de uma fatia

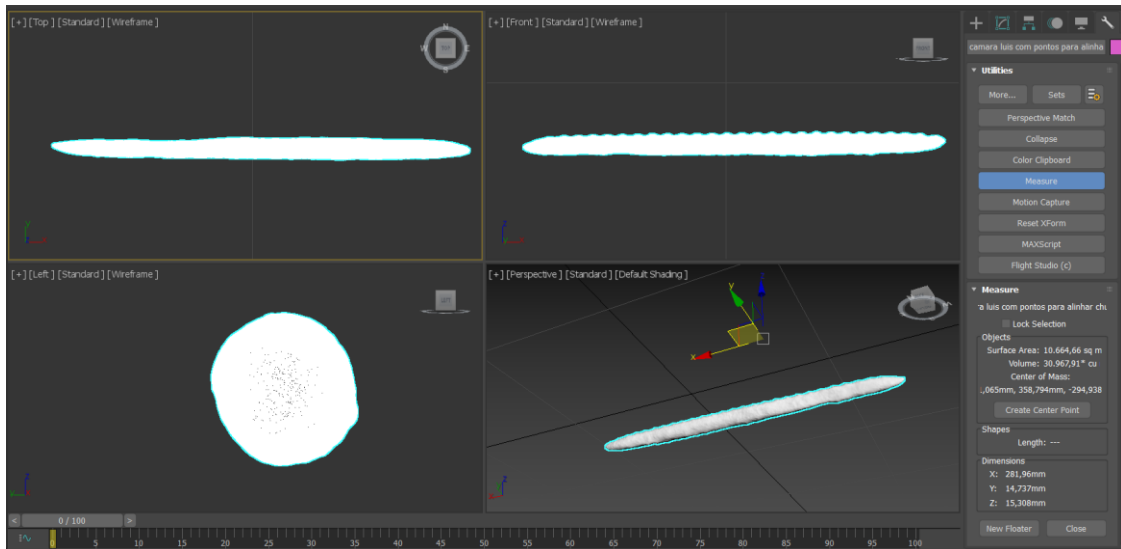


Figura 4.29: Representação do Provete P3 no programa 3DS max

5 Discussão e Resultados

Nesta seção serão apresentados todos os resultados de interesse para o âmbito desta tese.

Conforme referido no capítulo 3, muitas vezes é necessário adotar como exatos os valores obtidos em ensaios experimentais já que com estes é possível comparar resultados provenientes de outros métodos e avaliar a sua exatidão e precisão em relação aos resultados assumidos como exatos. Nesta tese, os ensaios assumidos como valores exatos são os provenientes da pesagem hidrostática em termos de volume, e, em termos de comprimentos foram assumidos como exatos os valores retirados através do levantamento com a régua. Estes valores foram medidos com uma régua com escala milimétrica.

Os resultados apresentados nesta seção dizem respeito à pesagem hidrostática, ao levantamento fotogramétrico, à modelação 3D, às áreas obtidas através do modelo proposto por Val e Melchers e ao programa 3DS max.

5.1 Provetes

Os provetes corroídos utilizados foram retirados do ensaio de corrosão acelerada. Num total de 18 varões corroídos, foi utilizado um varão de cada um dos provetes: L1, L2 e L3. Também foram utilizados 3 varões não corroídos para poderem ser feitas comparações entre estes. Foram utilizados provetes longos e curtos para analisar a dependência da técnica do comprimento do varão, como também provetes não corroídos para aferir a exatidão da técnica para níveis de corrosão baixos. A Tabela 3 apresenta dimensões como o diâmetro, “ \varnothing ”, e o comprimento, “L”, dos provetes utilizados e se está ou não corroído:

Tabela 3: Identificação dos Provetes

| Provete | \varnothing (mm) | L (mm) | Corrosão |
|---------|-----------------------|-----------|----------|
| P1 | 12 | 281 | Sim |
| P2 | 12 | 302 | Não |
| P3 | 16 | 282 | Sim |
| P4 | 16 | 45 | Sim |
| P5 | 16 | 302 | Não |
| P6 | 16 | 52,5 | Não |
| P7 | 20 | 300 | Sim |
| P8 | 20 | 303 | Não |

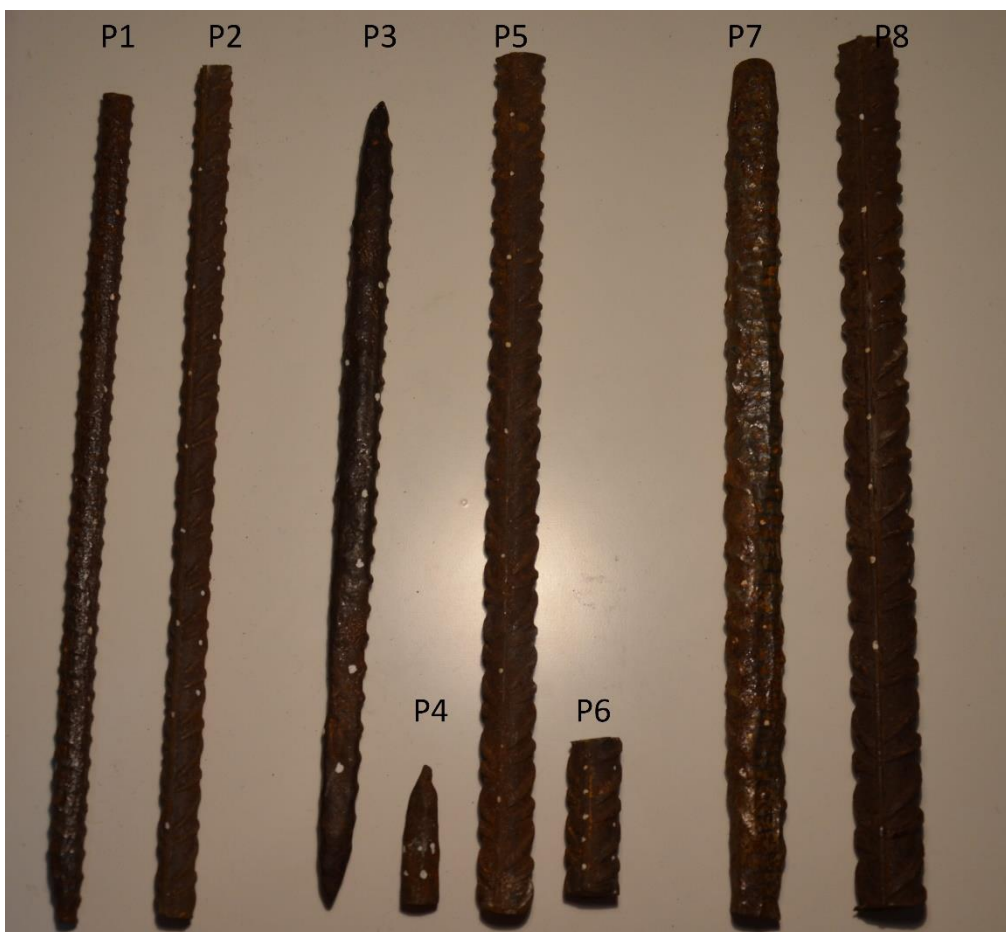


Figura 5.1: Imagem dos provetes retirados do ensaio de corrosão acelerada e provetes não corroídos.

5.2 Pesagem Hidrostática

Os resultados da média dos 3 valores observados tanto para a pesagem seca, “S”, e da pesagem proveniente da impulsão (pesagem húmida), “I”, e o respetivo volume, “ V_{PH} ”, de cada provete são apresentadas na seguinte Tabela 4:

Tabela 4: Volumes obtidos através da pesagem hidrostática

| Provete | Média de S (g) | Média de I (g) | V_{PH} (cm ³) |
|---------|-------------------|-------------------|--------------------------------|
| P1 | 197,100 | 171,869 | 25,231 |
| P2 | 257,881 | 223,148 | 34,733 |
| P3 | 242,700 | 211,765 | 30,935 |
| P4 | 21,444 | 18,683 | 2,761 |
| P5 | 480,398 | 416,589 | 63,809 |
| P6 | 79,983 | 69,747 | 10,236 |
| P7 | 542,9 | 473,743 | 69,157 |
| P8 | 730,2 | 636,479 | 93,721 |

Considerando que os provetes corroídos, antes dos ensaios de corrosão acelerada, tinham inicialmente as mesmas dimensões que os provetes não corroídos, e posto isto a mesma massa, através dos resultados da pesagem seca é possível obter a variação de massa entre os provetes corroídos e não corroídos, “ Δg ”, o que torna possível fazer uma estimativa da percentagem de corrosão dos provetes corroídos. Esta estimativa é apresentada na Tabela 5:

Tabela 5: Percentagens de corrosão dos provetes corroídos

| Provete | Δg (g) | corrosão (%) |
|---------|-------------------|-----------------|
| P1 | 60,781 | 23,6 |
| P3 | 237,698 | 49,5 |
| P4 | 58,539 | 73,2 |
| P7 | 187,3 | 25,7 |

5.3 Modelação 3D Fotogramétrica

No levantamento fotogramétrico os resultados de referencia foram aqueles obtidos com a Cannon 1200D, visto ser a câmara com melhor qualidade e características. Todos os levantamentos fotogramétricos dos varões foram executados com esta câmara e todos os levantamentos, com exceção dos provetes P4 e P6, foram compostos por 108 fotografias, sendo 54 para cada bloco. O levantamento dos provetes P4 e P6 foram constituídos por 72 fotografias, sendo 36 para cada bloco visto serem mais pequenos que os outros provetes. O erro entre o volume resultante da pesagem hidrostática (V_{PH}) e o volume do modelo (V_{3D}) foi calculado através da expressão 5.1 e são apresentados na Tabela 6:

$$Erro (\%) = \frac{V_{PH} - V_{3D}}{V_{PH}} * 100 \quad (5.1)$$

Tabela 6: Erro relativo entre o volume referente à pesagem hidrostática e o volume obtido através dos modelos 3D

| Provete | Nº de fotografias | V_{3D} (cm ³) | V_{PH} (cm ³) | Erro (%) | L (mm) | Corrosão (%) |
|---------|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------|-----------|-----------------|
| P1 | 108 | 25,239 | 25,231 | 0,032 | 281 | 23,6 |
| P2 | 108 | 34,707 | 34,733 | 0,075 | 302 | - |
| P3 | 108 | 30,970 | 30,935 | 0,113 | 282 | 49,5 |
| P4 | 72 | 2,756 | 2,761 | 0,181 | 45 | 73,2 |
| P5 | 108 | 63,831 | 63,809 | 0,035 | 302 | - |

| | | | | | | |
|----|-----|--------|--------|-------|------|------|
| P6 | 72 | 10,224 | 10,236 | 0,117 | 52,5 | - |
| P7 | 108 | 69,161 | 69,157 | 0,006 | 300 | 25,7 |
| P8 | 108 | 93,666 | 93,721 | 0,059 | 303 | - |

Não serão apresentados todos os modelos sendo que os três modelos apresentados nas figuras 5.2, 5.3 e 5.4 são modelos representativos dos restantes.

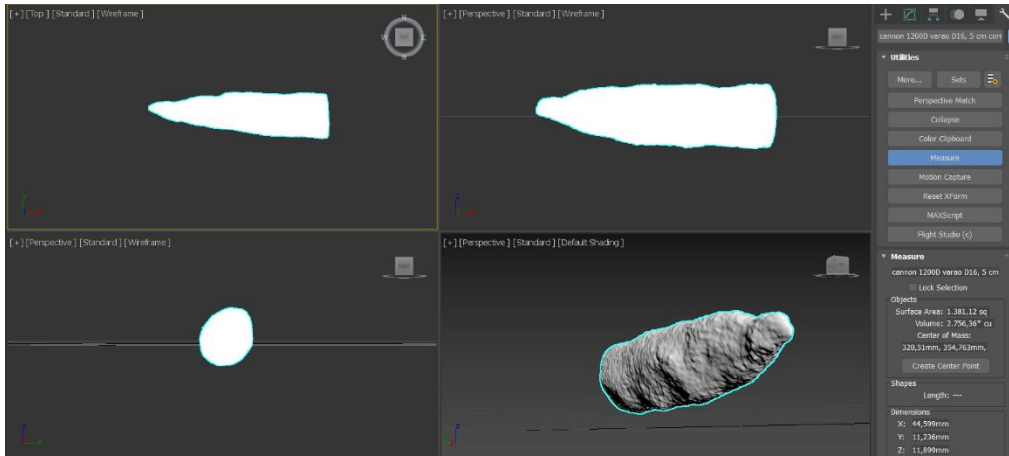


Figura 5.2: Modelo 3D do Provete P4

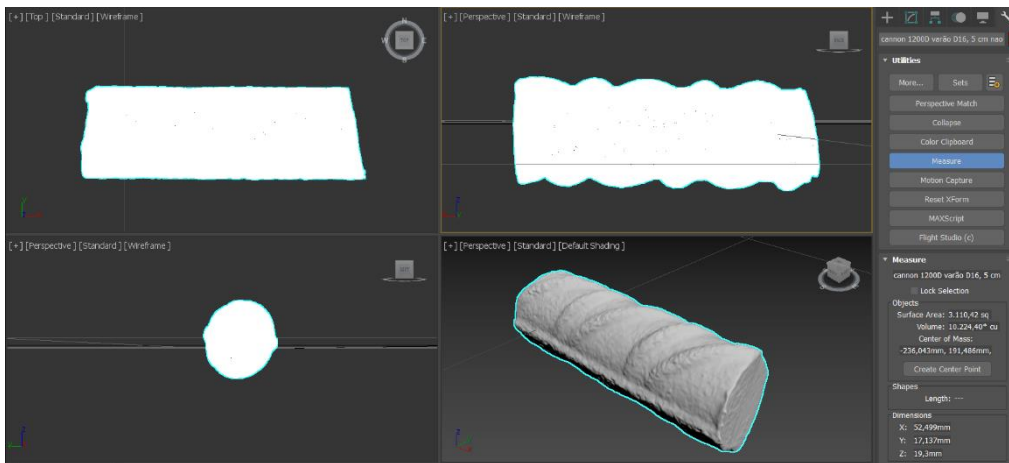


Figura 5.3: Modelo 3D do Provete P6

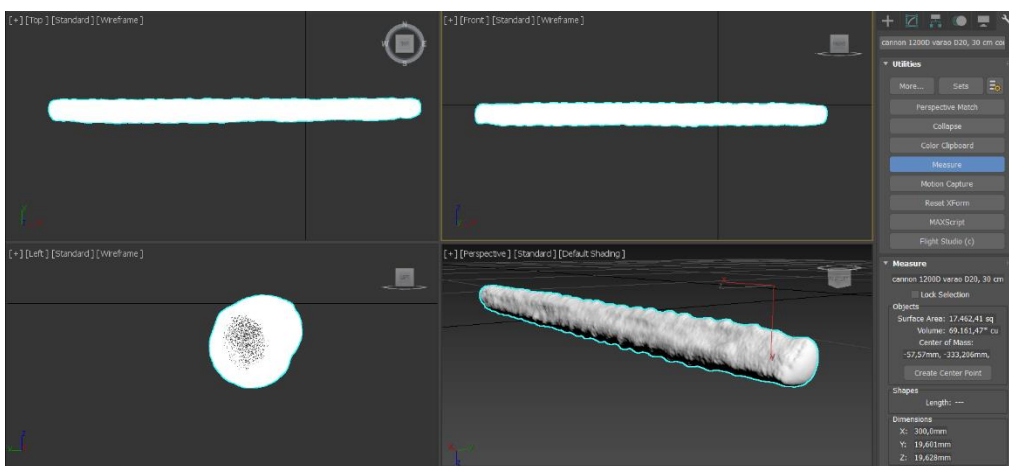


Figura 5.4: Modelo 3D do provete P7

Como é possível constatar da Tabela 6, a modelação através da fotogrametria cria modelos muito próximos aos provetes e tanto a variação dos diâmetros, como a variação dos comprimentos não afetam a precisão do método. Com estes resultados também é possível constatar que se pode analisar qualquer nível de corrosão seja este grande ou pequeno. Note-se, que no caso do provete P3 a percentagem de corrosão é de 49,5% e o erro associado à modelação desta é de 0.113%, e que no caso do provete P2, que não foi deteriorado pela corrosão, o erro associado continua muito pequeno sendo de 0.075%.

Os provetes P4 e P6 são bons exemplos de que este modelo funciona para objectos de qualquer dimensão, uma vez que os seus erros são da mesma ordem de grandeza que os restantes provetes.

Estes erros, embora muito pequenos, onde o máximo é de 0,181% e o mínimo de 0,06%, podem ser provenientes, em grande parte, da junção dos blocos, ou pelos blocos não ficarem perfeitamente alinhados, ou, ainda, por haver uma pequena sobreposição entre blocos, como mostra a Figura 5.5. Ainda seria possível minimizar ainda mais estes erros caso tivesse sido possível fazer o levantamento fotogramétrico apanhando todo o varão num só bloco.

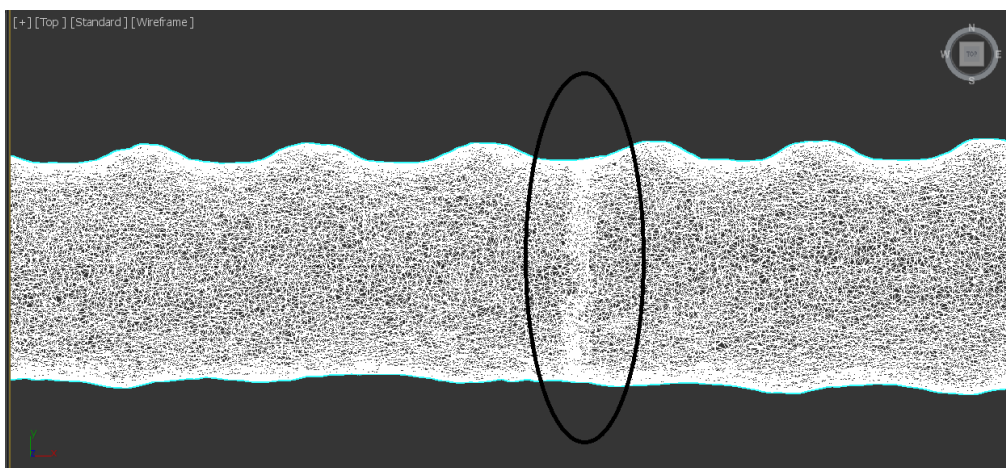


Figura 5.5: Erro associado à junção de blocos.

5.4 Influência da Escala

No modelo do provete P3 foram utilizadas 4 distâncias diferentes (L_{esc}) da escala referida no capítulo 4 na secção 4.5, com o objetivo de ver a influência destas nas dimensões do provete, e, poder analisar a aplicabilidade desta técnica quando não é possível ter acesso a todo o objecto. Muitas vezes é difícil conseguir ter acesso a todo o perímetro do varão, e, posto isto não é possível capturar o varão em 360°, impedindo uma total reconstrução 3D do mesmo. Assim é impossível saber qual o comprimento do varão sendo necessário utilizar alvos/escalas com

dimensões conhecidas para se poder executar uma reconstrução 3D com dimensões certas. Os resultados obtidos referentes as 4 escalas são apresentadas na tabela 7:

Tabela 7: Resultados das escalas.

| Escala | $L_{esc.}$ (mm) | V_{3D} (cm ³) | V_{PH} (cm ³) | Erro (%) |
|----------|--------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------|
| Escala 1 | 10 | 31,559 | | 2,017 |
| Escala 2 | 30 | 31,359 | 30,935 | 1,371 |
| Escala 3 | 60 | 31,048 | | 0,365 |
| Escala 4 | 80 | 31,039 | | 0,336 |

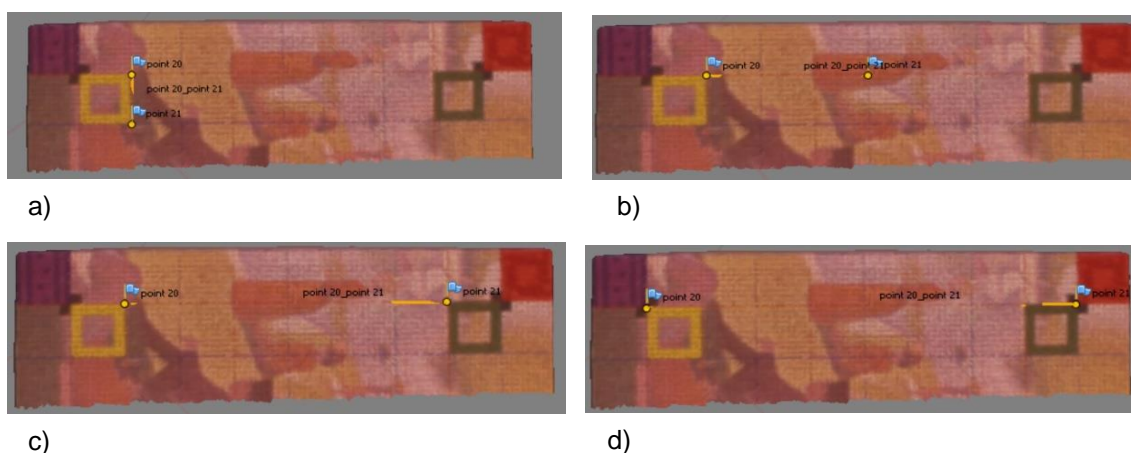


Figura 5.6: a) escala 1; b) escala 2; c) escala 3; d) escala 4.

Como é possível observar na tabela 7, os volumes afastam-se um pouco do valor real chegando o erro a ser 2% na escala 1. Contudo, à medida que se aumenta a distância entre os pontos da escala, o valor do erro diminui consideravelmente, sendo na escala 4 de 0,34%. Grande parte destes erros está associada à dificuldade de colocar os pontos da escala nos pontos exatos de intercessão de duas retas, ficando estes dentro de um raio infinitesimal nas imediações da interseção, afetando assim as dimensões da reconstrução 3D. Ao aumentar a distância entre os pontos da escala permite minimizar estes erros, uma vez que com uma escala maior a acumulação de erros é menor, sendo os resultados obtidos mais satisfatórios do que quando esta distancia é muito pequena.

5.5 Influência do Equipamento de Aquisição

O levantamento fotogramétrico foi feito com três câmaras fotográficas: a câmara de um iPhone 6, uma Cannon G11 e a Cannon 1200D. O iPhone 6 tem 8 MPixel, a Cannon G11 tem 10 MPixel e a Cannon 1200D tem 18Mpixel. Os objectivos de fazer o levantamento com estas três câmaras foram o de analisar a possibilidade deste tipo de levantamento ser feito com qualquer tipo de

câmara, até mesmo quando estas têm menos potencialidades a nível das suas características, e bem assim se pequenos equipamentos, como um telemóvel, são eficazes neste mesmo levantamento. Os levantamentos foram realizados no provete P3 e foram usados o mesmo número de fotografias para as 3 câmaras (Tabela 8).

Tabela 8: Comparação entre os modelos obtidos com as 3 camaras

| Camara | Nº de fotografias | V_{3D} (cm ³) | V_{PH} (cm ³) | Erro (%) |
|--------------|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------|
| Cannon 1200D | | 30,970 | | 0,113 |
| Cannon G11 | 108 | 30,986 | 30,935 | 0,165 |
| Iphone 6 | | 30,816 | | 0,385 |

Com estes levantamentos é possível constatar que a diferença entre a Cannon 1200D e a Cannon G11 não é muito grande. Contudo, quando se fala da câmara do iPhone em comparação às outras duas câmaras, verifica-se que o erro é maior, mas não de forma tão significativa que não nos permita que não concluir que também será possível fazer-se este tipo de levantamos até com um telefone obtendo valores precisos.

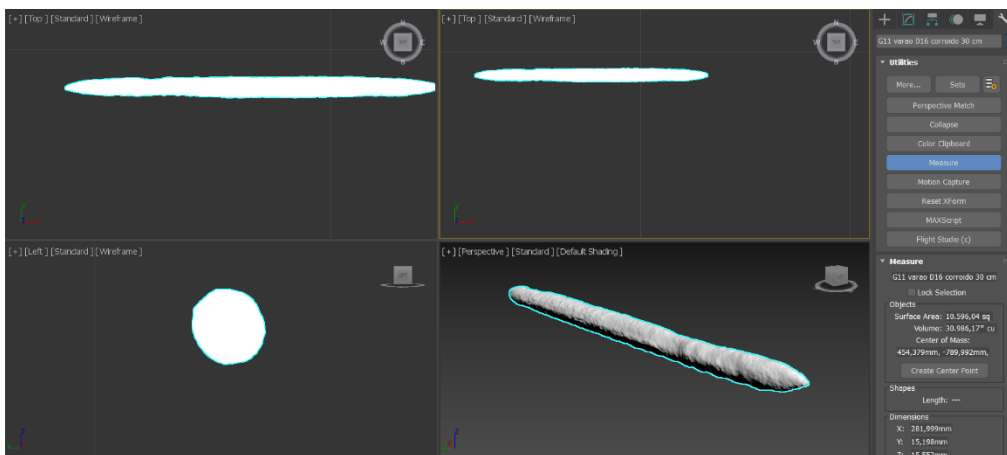


Figura 5.7: Modelo 3D obtido através da Cannon G11

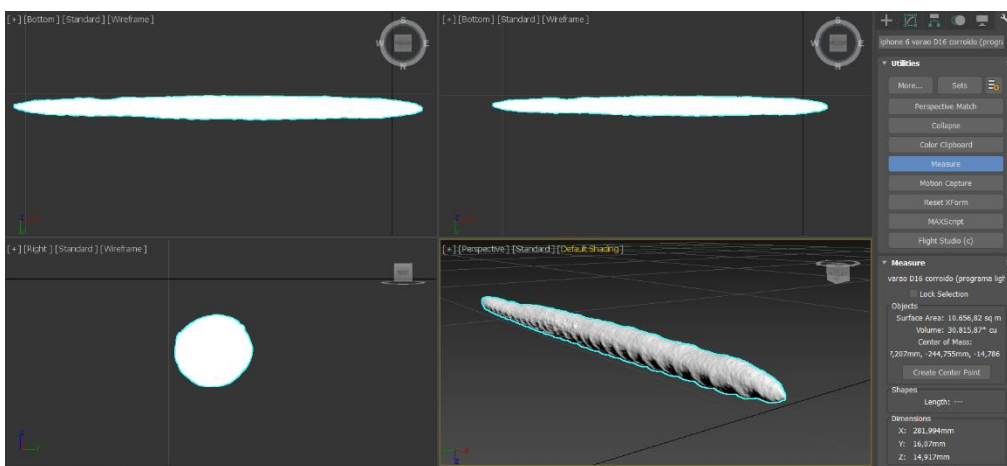


Figura 5.8: Modelo 3D obtido através do Iphone 6

5.6 Análise do Número de Fotografias

Foi possível constatar nas secções anteriores deste capítulo que com 108 fotos os resultados foram animadores e forneceram valores muito próximos dos reais variando o erro entre 0,385% e 0,113% para o provete P3 com a variação do equipamento. Ainda assim, o processamento de dados nas diversas etapas da modelação 3D por vezes foi moroso, tendo apenas um passo demorado largas horas.

Com vista a diminuir o esforço exigido na modelação das 108 fotos, foram comparados modelos com menos fotografias, analisando, assim, se é ou não possível realizar o levantamento com um número inferior de fotografias e obter bons resultados na mesma.

Como já foi dito anteriormente, para cada bloco houve 3 níveis de fotografias, contabilizando no total 54 fotos, sendo o varão rodado de 20 em 20 graus. Posto isto, foram feitas várias experiências como retirar níveis de fotografias sendo os conjuntos utilizados: os 3 níveis (nível 3); nível superior mais nível inferior (nível 2); e nível médio (nível 1). Tendo assim nos 3 níveis 108 fotografias, no nível superior mais nível inferior 72 fotografias e por fim 36 fotos no nível médio. Esta análise foi efectuada com o levantamento das 3 câmaras fotográficas e os resultados são apresentados na Tabela 8.

Com a Cannon 1200D os resultados com 3 níveis e 2 níveis de fotografias apresentam erros baixos, os quais aumentam significativamente só com um nível. Com a câmara G11 é possível observar que só com 3 níveis o erro é inferior a 0,2%, já que nos outros dois conjuntos o erro é maior chegando quase aos 3%. Não obstante, ainda assim é possível observar que só com o nível médio o resultado foi melhor que com o nível superior mais o nível inferior. No que toca ao iPhone, recorrendo à modelação com 2 níveis não foi possível construir o modelo inteiro devido à impossibilidade de modelar as pontas dos varões, e também, com 1 nível o erro já é muito elevado para se poder assumir como resultado fidedigno.

Tabela 9: Comparação entre os valores obtidos nos 3 níveis com 108 fotografias com as 3 câmaras, e variando os níveis no Provete P3

| Camara | Níveis | Nº de fotografias | V_{3D} (cm ³) | Erro (%) |
|--------------|--------|-------------------|-----------------------------|----------|
| Cannon 1200D | 3 | 108 | 30,970 | 0,113 |
| | 2 | 72 | 31,021 | 0,278 |
| | 1 | 36 | 30,466 | 1,516 |
| Cannon G11 | 3 | 108 | 30,986 | 0,165 |
| | 2 | 72 | 31,861 | 2,993 |
| | 1 | 36 | 31,622 | 2,221 |
| Iphone 6 | 3 | 108 | 30,816 | 0,385 |
| | 2 | 72 | - | - |
| | 1 | 36 | 33,606 | 8,634 |

Também foram analisados vários conjuntos de fotos, só que desta vez o varão em vez de ser rodado de 20 em 20 graus foi rodado de 40° em 40° e de 60° em 60°, perfazendo um total de 54 fotos e de 36 fotos respectivamente, 27 para cada bloco em que o varão rodou de 40° em 40° e 18 para a cada bloco em que o varão rodou de 60° em 60° graus. Contudo, devido à dificuldade de construir os modelos quando eram utilizados o nível 2 e o nível 1 apenas serão apresentados o nível 3. Os resultados são mostrados na Tabela 10:

Tabela 10: Comparação entre os valores obtidos nos 3 níveis com 54 e 36 fotografias com as 3 camaras, mantendo o nível 3 no Provetete P3

| Camara | Grau de rotação | Nível | Nº de fotografias | V _{3D} (cm ³) | Erro (%) |
|--------------|-----------------|-------|-------------------|------------------------------------|----------|
| Cannon 1200D | 40° | 3 | 54 | 30,789 | 0,472 |
| | 60° | | 36 | 31,129 | 0,627 |
| Cannon G11 | 40° | | 54 | 32,298 | 4,406 |
| | 60° | | 36 | 33,127 | 7,086 |
| IPhone 6 | 40° | | 54 | 30,456 | 1,548 |
| | 60° | | 36 | 32,705 | 5,722 |

Quando se começa a reduzir a quantidade de fotos os erros aumentam principalmente em relação ao iPhone e à Cannon G11, passando a serem muito maiores que os erros em relação aos levantamentos com 108 fotografias. Ainda assim é possível observar que os erros relativos ao iPhone são inferiores aos da G11, apesar do iPhone ter menos MPixel que a G11. Contudo, a construção dos modelos com o iPhone e a G11 não são tão nítidos quando são reduzidas as fotos, não ficando, por conseguinte, o varão perfeito apresentado algumas texturas a mais. Ainda assim, no caso das 36 fotografias, é necessário ter cuidado nas modelações 3D, pois apesar dos modelos com o iPhone terem menos erros em relação ao volume, no que toca à montagem do varão em si a modelação do iPhone apresenta algumas falhas o que não acontece nos modelos da G11 onde os erros nos volumes são maiores.

No que toca à Cannon 1200D os erros são muito aceitáveis mesmo depois da redução do número de fotografias, sendo que até com 36 fotos foi possível reconstruir o modelo com boa qualidade dando apenas um erro de 0,6%, sendo o erro com 108 fotos de 0,11%, e, como é possível observar no conjunto de figuras que se seguem, em que foram usadas 36 fotografias, a sua modelação não apresenta falhas como as modelações com o iPhone e a Cannon G11.

Assim sendo, quando é reduzido o numero de fotografias é necessário ter em atenção não só às dimensões dos provetes, como o volume e o comprimento, mas também à qualidade da sua modelação 3D. É necessário sempre averiguar se esta modelação apresenta ou não falhas no

que toca à geometria do objecto, sendo que estas falhas podem afetar a qualidade dos resultados obtidos.

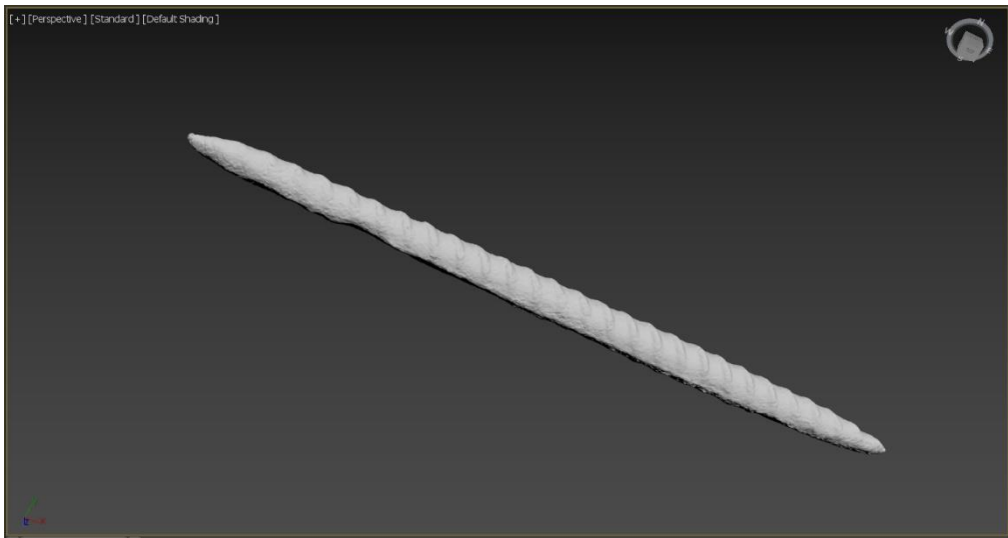


Figura 5.9: Modelo 3D obtido através da Cannon 1200D, com levantamento fotogramétrico de 36 fotografias

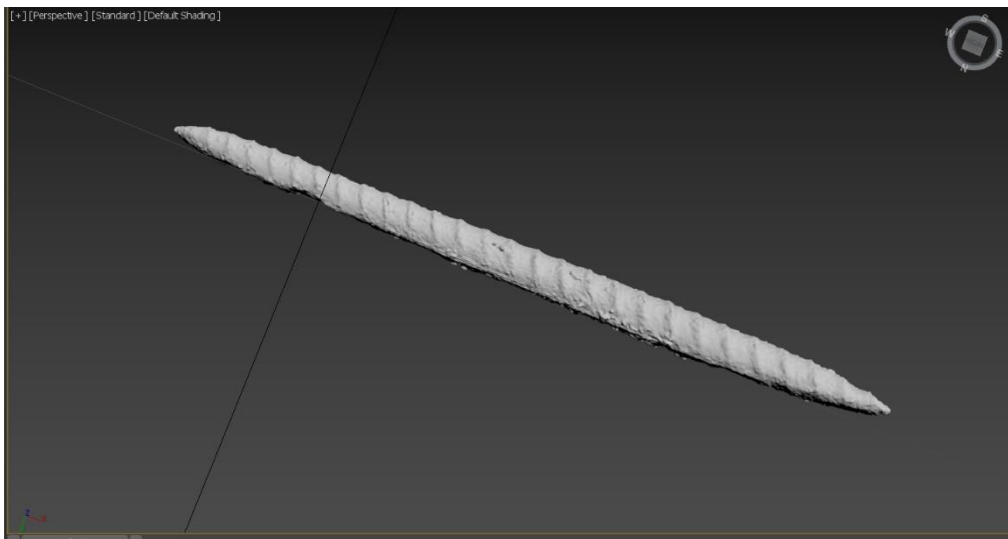


Figura 5.10: Modelo 3D obtido através da Cannon G11, com levantamento fotogramétrico de 36 fotografias

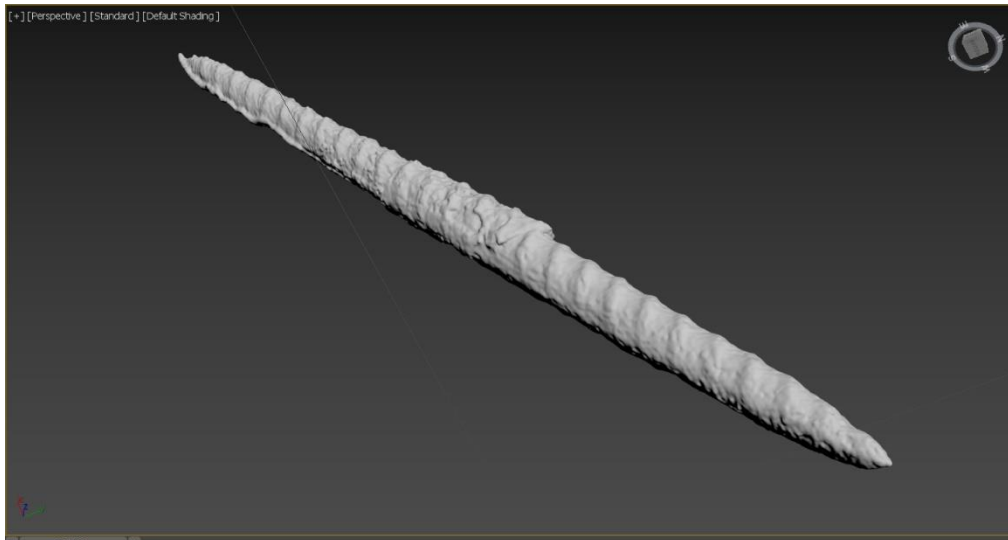


Figura 5.11: Modelo 3D obtido através do iPhone 6, com levantamento fotogramétrico de 36 fotografias

5.7 Análise da Secção Transversal

A análise da secção transversal foi executada com os modelos provenientes do levantamento fotogramétrico com 108 fotos visto serem os resultados mais fidedignos e onde os erros eram inferiores. Esta análise foi feita no provete P1, P3 e P7 e também foram utilizados os modelos da Cannon 1200D, do iPhone e da Cannon G11 no provete P3 para obter uma percepção da diferença de qualidade dos modelos sendo a câmara de referência a Cannon 1200D.

Também foi elaborada uma comparação entre os resultados obtidos na modelação 3D dos provetes P1, P3 e P7 e com os resultados analíticos mencionados na secção 4.3.

5.7.1 Secção Transversal dos Provetes P1, P3 e P7

Nesta análise o levantamento foi executado com a Cannon 1200D. No software 3DS max os provetes foram cortados em 57 secções com 0,1mm de espessura e foram retirados os respetivos volumes destas secções, sendo a área calculada posteriormente através da equação 4.10. Em todos os gráficos que se seguirão, A_{3D} é a área do varão corroído obtida através da modelação 3D e A_0 é a área teórica do varão. Os valores de A_0 são expressos na Tabela 11:

Tabela 11: Valores da secção teorica dos varões, A_0

| Provete | \varnothing (mm) | A_0 (mm ²) |
|---------|-----------------------|-----------------------------|
| P1 | 12 | 113,1 |
| P3 | 16 | 201,1 |
| P7 | 20 | 314,2 |

Os provetes P1 e P7 foram cortados nas suas extremidades daí as secções iniciais e finais se encontrarem com áreas perto das secções seguintes. No caso do provete P3, quando este foi retirado do provete L2, já se encontrava extremamente corroído e com as suas extremidades com secções muito reduzidas devido a estarem expostas ao ambiente agressivo. O provete P3 em nada foi alterado depois dos ensaios de corrosão acelerada.

Os gráficos que se seguem apresentam o andamento da secção ao longo dos varões e a área teórica que o varão deveria ter sem corrosão:

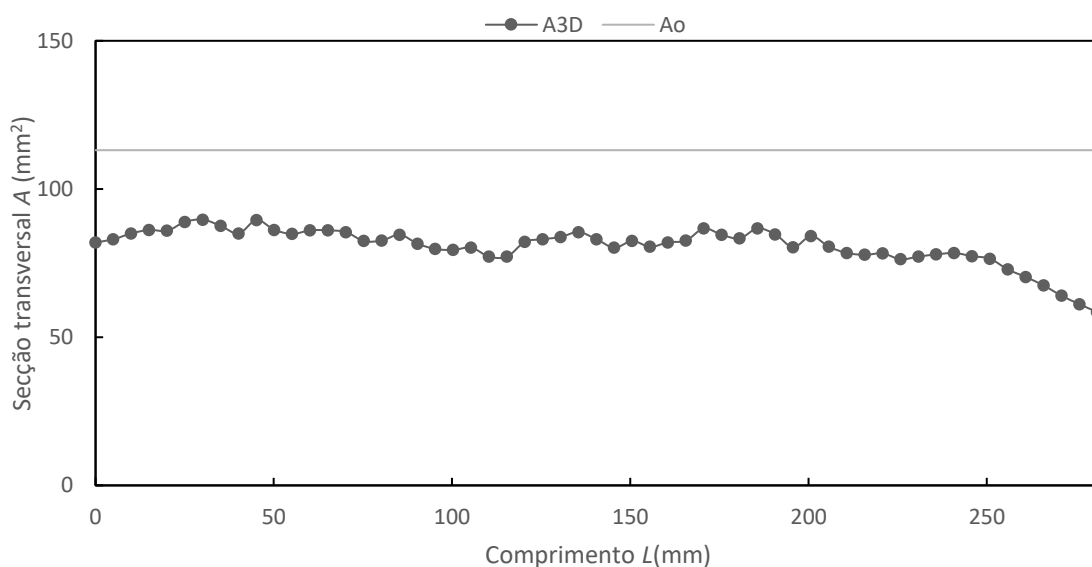


Figura 5.12: Área das secções do provete P1

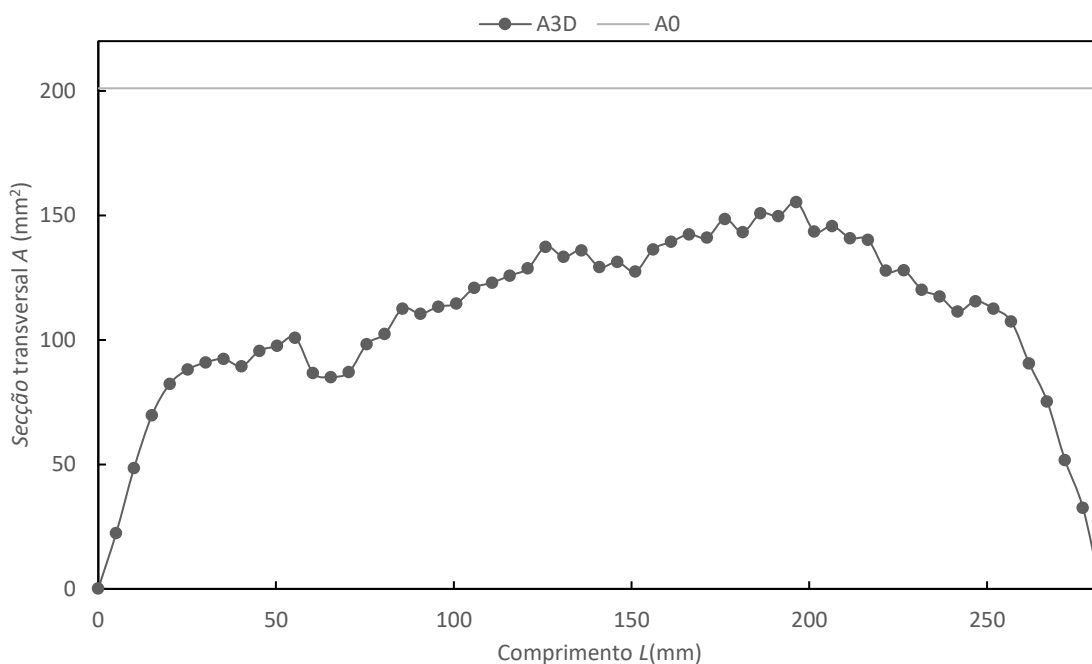


Figura 5.13: Área das secções do provete P3

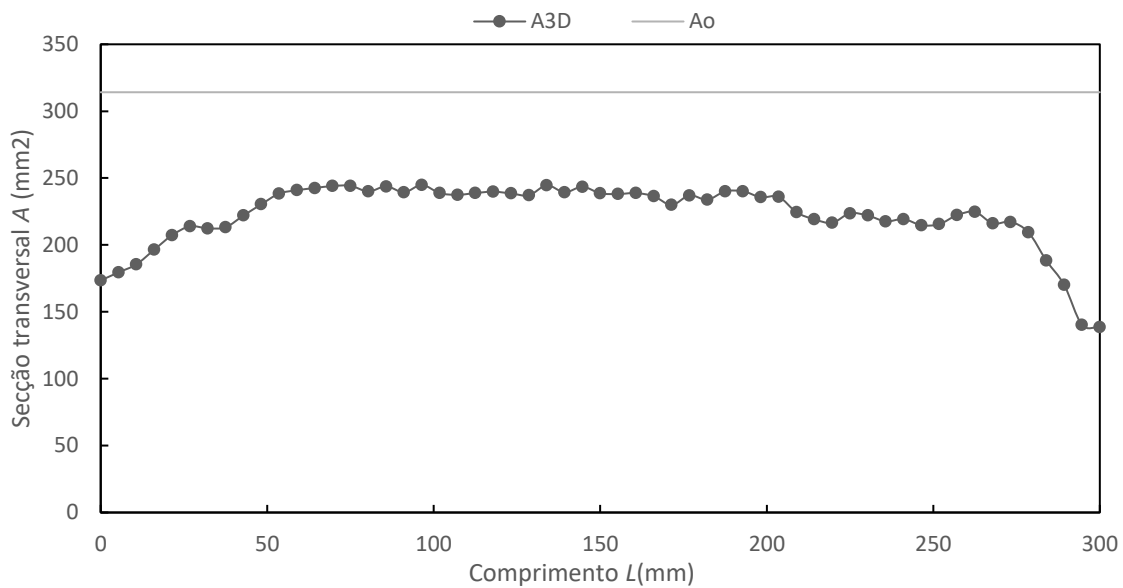


Figura 5.14:Área das secções do provete P7

Em todos os gráficos é de fácil observação que as extremidades dos varões foram as zonas mais afetadas. Este fenómeno, deve-se ao facto das extremidades se encontrarem com mais contacto com o ambiente agressivo fornecido nos ensaios de corrosão acelerada, estando, por conseguinte, mais vulneráveis ao contacto com o oxigénio e com os cloretos.

Na Tabela 12 são apresentados os valores de corrosão média e respetivos desvios padrão dos 3 provetes. A percentagem de corrosão de cada secção foi calculada através da expressão 5.1:

$$(\%)C = 1 - \frac{A_{3D}}{A_0} \quad (5.1)$$

Tabela 12: Corrosão média e desvio padrão

| Provete | Corrosão média (%) | Desvio padrão (%) |
|---------|--------------------|-------------------|
| P1 | 28,7 | 5,7 |
| P3 | 46,3 | 17,9 |
| P7 | 29,2 | 7,8 |

5.7.2 Comparação da secção transversal com as 3 camaras

Esta comparação será feita no provete P3 com o objetivo de se poder observar em que partes do varão é que a modelação possa ter tido alguma falha. Como referência foi utilizado o levantamento executado com a Cannon 1200D de 108 fotografias.

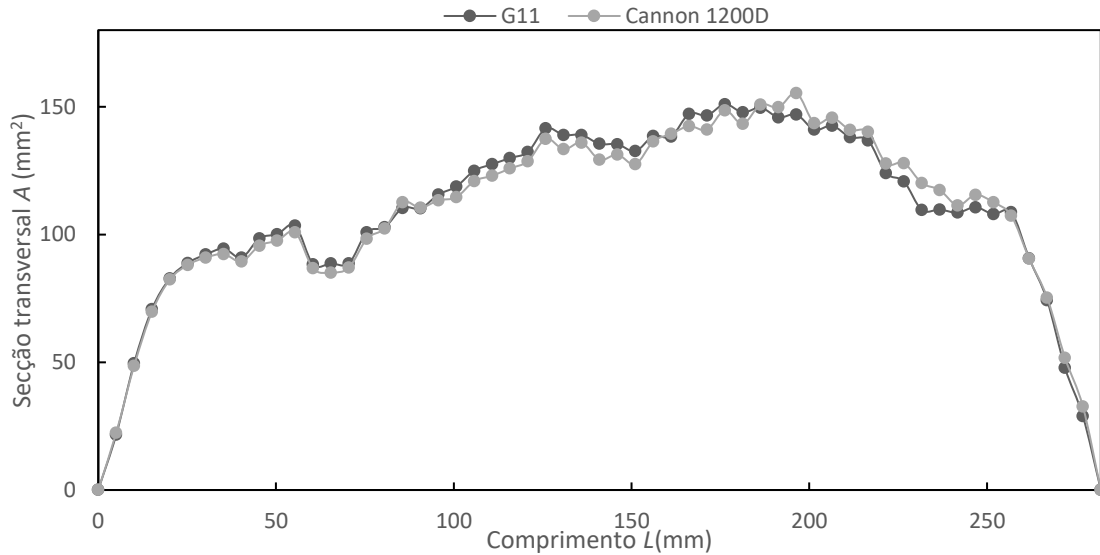


Figura 5.15: Comparação entre a perda de secção entre a Cannon 1200D e a G11, e respetivo erro

Através do gráfico 5.15 é possível observar que a modelação referente a estas duas câmaras é muito semelhante havendo apenas pequenas discrepâncias entre os mesmos, sendo o erro médio da câmara G11 em relação à Cannon 1200D é baixo tendo o valor de 2,86%.

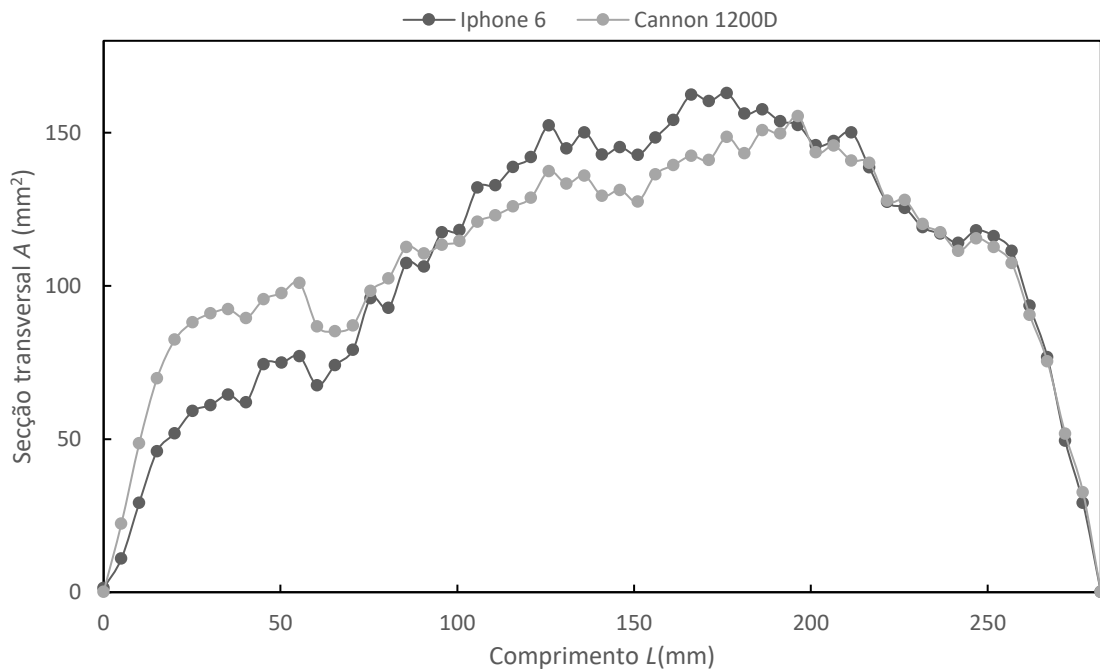


Figura 5.16: Comparação entre a perda de secção entre a Cannon 1200D e a Iphone, e respetivo erro

Na modelação com o iPhone, apesar dos erros relativamente ao volume serem pequenos, na ordem dos 0,4%, registam-se mais falhas na medição das secções em comparação com as outras duas câmaras. Contudo, o erro em relação ao volume é pequeno pois entre os 0 e os 100 mm as áreas das secções medidas com o iPhone são inferiores às da Cannon 1200D, e depois conseguem ser superiores entre os 100 e os 200mm, disfarçando assim o erro do volume. Entre os 200 até à extremidade final do varão o andamento das secções já é muito idêntico sendo que o erro associado anda à volta dos 3%. Entre os 0 e os 200 mm de comprimento do varão é possível observar que o erro em relação às duas câmaras anda à volta dos 20%, sendo que até aos primeiros 50 mm o erro anda à volta dos 30%. O erro médio entre o iPhone e a Cannon 1200D é de 11,39%.

5.7.3 Comparação da Secção Transversal entre a Modelação e os Resultados Analíticos

O modelo analítico para a determinação das áreas das secções corroídas apresentado na secção 4.3 proposto por Val e Melchers, foi aplicado nos provetes P1, P3 e P7. Estes resultados foram comparados com as secções obtidas através da modelação 3D.

Os resultados analíticos são calculados apenas com a medição de um parâmetro, p , que é a profundidade do “pit”, numa dada direção de corrosão do varão. Através deste valor foram usadas varias considerações geométricas com vista a calcular a área restante da secção não corroída, sendo estas áreas representadas por A_{an} .

Na modelação 3D, a obtenção de resultados é diferente. As áreas das secções calculadas através desta têm em conta todas as direções e todas as irregularidades que os vários “pits” podem causar, não contabilizando apenas o maior. Posto isto os gráficos que se seguem mostram a comparação entre os resultados analíticos e a modelação 3D, e a Tabela 13 indica as áreas médias tanto dos resultados analíticos como da modelação 3D para os três provetes:

Tabela 13: Áreas médias dos Provetes P1, P3 e P7

| Provete | A_{3Dmed} (mm ²) | $A_{an.med}$ (mm ²) |
|---------|-----------------------------------|------------------------------------|
| P1 | 80,789 | 108,665 |
| P3 | 107,912 | 156,239 |
| P7 | 222,374 | 288,683 |

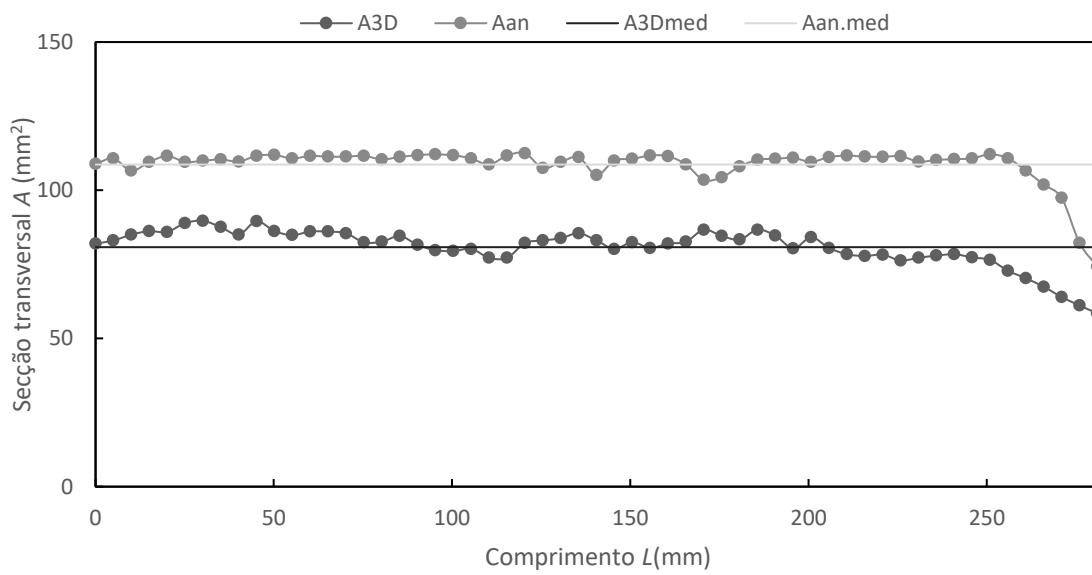


Figura 5.17: Comparação entre os resultados analíticos e a modelação 3D, provete P1

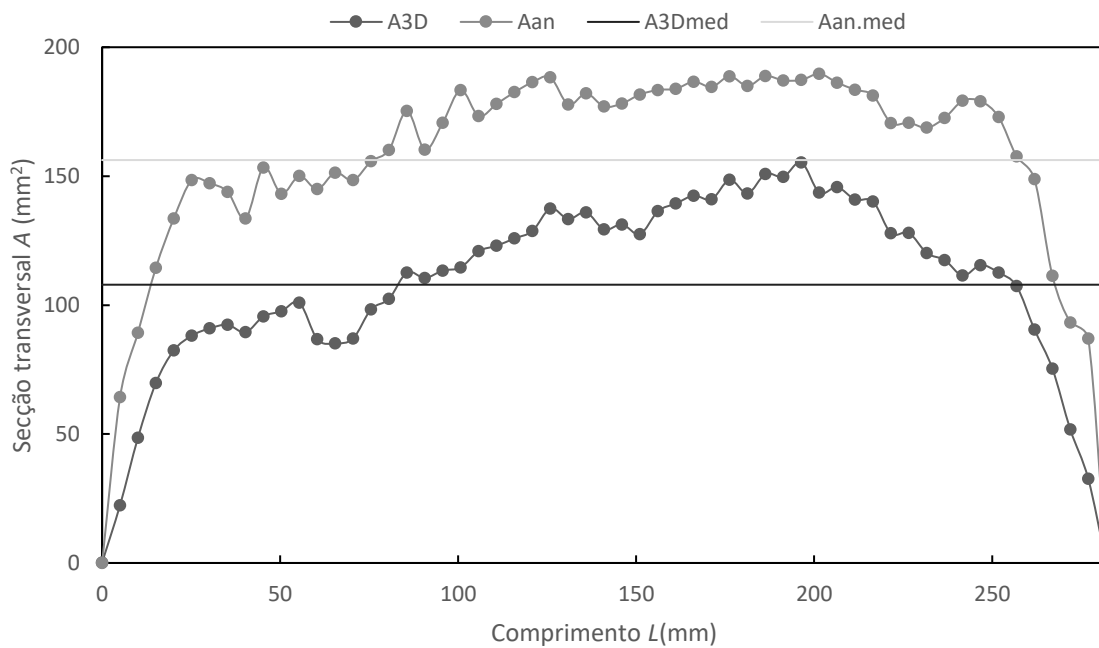


Figura 5.18: Comparação entre os resultados analíticos e a modelação 3D, provete P3

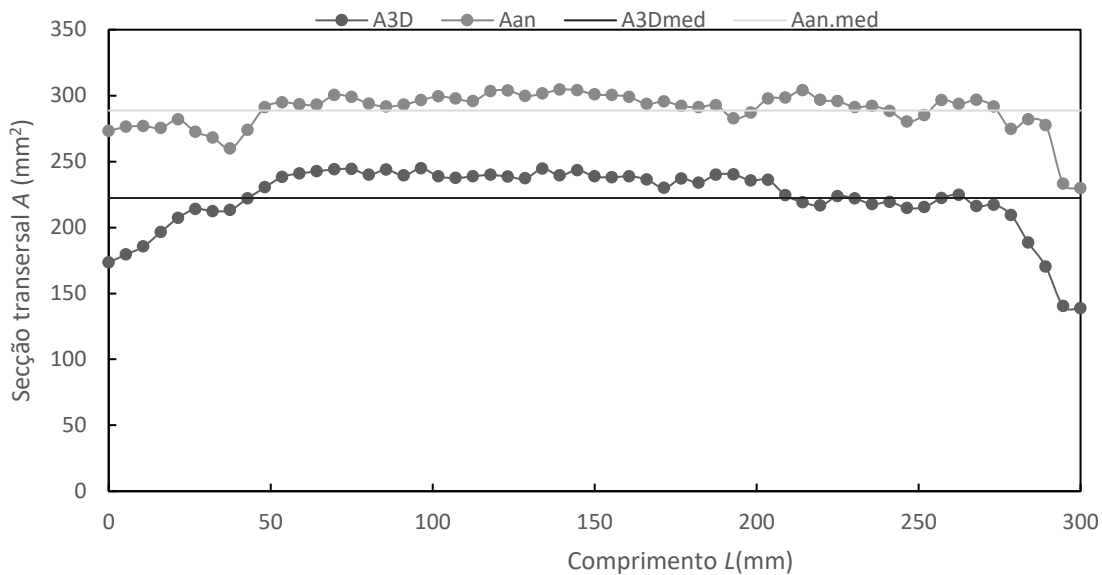


Figura 5.19: Comparação entre os resultados analíticos e a modelação 3D do provete P7

Em nenhum dos gráficos se dá uma interseção entre os resultados obtidos na modelação 3D e nos resultados analíticos, o que é de fácil explicação. Como já referido, os resultados analíticos são medidos através de um só parâmetro, p , que é a profundidade do “pit” maior dada a maior direção de corrosão. Assim, a área resultante dos resultados analíticos apenas retira a área desse “pit” não contabilizando mais nenhuma perda de área no seu perímetro considerando que o resto da superfície do varão não se encontra corroída. Outro dos problemas dos resultados analíticos são as dificuldades de medir esta profundidade. Com efeito, se o “pit” for de dimensões razoáveis esta medição é mais precisa, mas quando estas dimensões são demasiado pequenas é muito complicado obter o valor exato. Este problema é de fácil percepção na comparação dos resultados do provete P1 e P7, $\varnothing 12$ e $\varnothing 20$ respetivamente. Quando se repara nos resultados do P7 é possível observar uma aproximação de resultados entre os dois métodos, enquanto que nos resultados do provete P1, no que toca aos resultados analíticos, só se consegue perceber grande perda de secção em algumas secções, sendo que por estes resultados o provete mal corroeu.

As secções calculadas na modelação 3D têm em conta mais zonas de corrosão, não contabilizando apenas um “pit” ou apenas uma direção de corrosão. Através do modelo 3D é possível ter em conta todas as direções e todos os “pits” que estejam presentes numa dada secção, sendo que os valores são mais precisos. Como é possível constatar os valores das áreas das secções conforme esta modelação apresentam resultados inferiores, uma vez que contabilizam mais irregularidades provocadas pela corrosão.

Uma boa maneira de se diferenciar estes dois métodos é através da figura que se segue, onde à esquerda temos o método analítico, que contabiliza só um “pit” e à direita a modelação 3D, que contabiliza todas as irregularidades da superfície da secção.

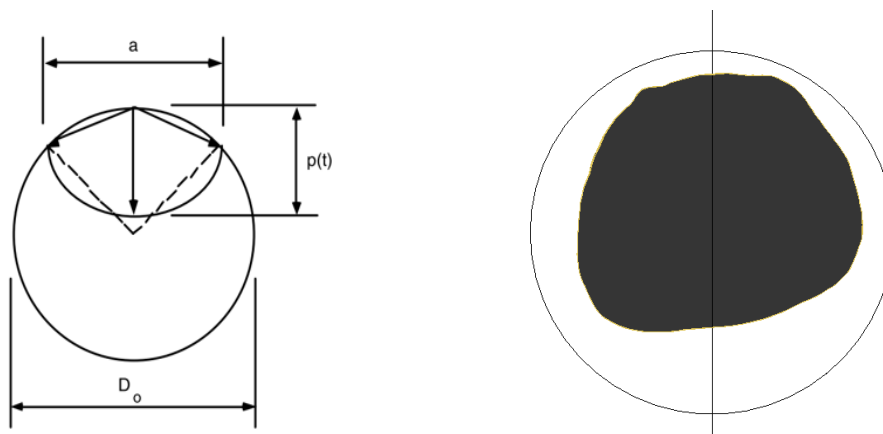


Figura 5.20: Comparação entre o método analítico e o método 3D para o cálculo da área das secções corroídas

5.7.4 Comparação entre os Volumes Obtidos na Modelação 3D e os Volumes Estimados Através dos Resultados Analíticos

Uma vez calculados os valores da perda de área das secções através dos resultados analíticos também é possível estimar o seu volume (V_{an}) calculando a área dos gráficos da secção 5.7.3 que dizem respeito aos resultados analíticos. Para tal, e sabendo que as secções foram medidas aproximadamente espaçadas de 5 mm no provete P1 e no provete P3 e de 5,4 mm no provete P7, apenas basta multiplicar este espaçamento pela respetiva área da secção corroída e obter-se o volume total do provete estimado.

Assim é possível fazer também uma comparação entre volumes e compara-los com os volumes reais obtidos através da pesagem hidrostática. Na tabela 14 serão apresentados os valores dos volumes obtidos através dos resultados analíticos, da modelação 3D e da pesagem hidrostática comoo também o erros destes dois métodos em relação à pesagem hidrostática. Os valores da modelação 3D serão aqueles que foram obtidos com o levantamento fotogramétrico da Cannon 1200D com 108 fotografias.

Tabela 14: Comparação entre os volumes dos resultados analíticos e dos modelados em 3D

| Provetes | V_{PH} (cm ³) | V_{an} (cm ³) | V_{3D} (cm ³) | Erro (V_{an}) (%) | Erro (V_{3D}) (%) |
|----------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| P1 | 25,231 | 31,085 | 25,239 | 23,202 | 0,032 |
| P3 | 30,935 | 46,871 | 30,970 | 51,514 | 0,113 |
| P7 | 69,157 | 88,604 | 69,161 | 28,120 | 0,006 |

Com esta tabela volta a ser possível confirmar a grande diferença de valores entre os resultados analíticos e os resultados obtidos da modelação 3D, onde os valores da modelação 3D não chegam a passar os 0,2% enquanto que os volumes estimados através do método analítico chegam até aos 52% não baixando de 23%. Com estas percentagens de erro é possível mostrar que o método analítico aplicado falha muito no que toca à precisão e à exatidão sendo muito insuficiente, na medida em que apenas tem em conta a medição de uma profundidade de corrosão ignorando as outras direções como mostra a figura 5.20, sendo de rápida processão que os volumes dos resultados analíticos são muito maiores que os modelados em 3D através do levantamento fotogramétrico.

6 Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

6.1 Conclusões

No presente trabalho propôs-se a fotogrametria como metodologia de inspecção e avaliação da corrosão média, incluindo variabilidade espacial, de armaduras em estruturas de betão armado.

Para avaliar a potencialidade do método, os resultados obtidos na modelação 3D, para provetes de diferentes comprimentos, diâmetros, e níveis de corrosão, foram comparados com resultados de uma avaliação volumétrica baseada em pesagem hidrostática. Para o levantamento fotográfico efectuado com a Canon 1200D, a média dos erros obtidos foi de 0,08%, estando estes valores compreendidos entre 0,006% e 0,18%, o que permite concluir sobre a viabilidade da metodologia.

A metodologia conduz a resultados mais exactos quando se utilizam câmaras com maior resolução e qualidade do sensor e material óptico. No entanto, a utilização de câmaras como a Canon G11 e um iPhone 6 também apresentam bons resultados podendo proceder-se à sua utilização em situações em que não seja possível a aquisição ou utilização de câmaras mais potentes como a Cannon 1200D. Contudo, quando se reduz o número de fotografias, os resultados das câmaras inferiores começam a dispersar do valor exato chegando os erros da G11 e do iPhone à ordem dos 7% e 5,7%, respetivamente, com 36 fotografias. Ainda assim, com 108 fotografias a G11 e o iPhone apresentam resultados precisos e exatos, sendo os erros de 0,17% e 0,39%, respetivamente, tendo o erro com a Cannon 1200D sido de 0,11%.

Os erros associados a estes modelos tridimensionais são provavelmente devidos à utilização de dois blocos independentes de fotografias para modelar toda a dimensão do provete. Devido à ligação destes blocos pode haver alguma sobreposição que influencie os resultados podendo assim registar-se um aumento do erro. Ainda assim, todos os erros apresentados, são muito baixos e continua-se a poder considerar o método como fiável.

No que respeita à análise das secções transversais dos varões corroídos, obtiveram-se erros médios relativos de 2,8% e 11% quando os modelos 3D foram obtidos com fotografia adquiridas com a Canon G11 e iPhone respectivamente em comparação com os valores de referência obtidos com o modelo baseado nas fotografias da Canon 1200D.

A comparação dos resultados analíticos com a modelação do levantamento fotogramétrico realizado com a Cannon 1200D no provete P1, P3 e P7, mostra que na verdade, a modelação 3D apresenta resultados mais detalhados da secção, considerando todas as irregularidades da secção, o que não acontece com os resultados analíticos obtidos com base na profundidade máxima de corrosão lidos numa craveira.

6.2 Desenvolvimentos Futuros

Como desenvolvimento futuro deste trabalho propõem-se a utilização de diferentes softwares e equipamentos fotográficos a fim de averiguar se é possível melhorar a qualidade dos resultados obtidos. Outra proposta seria comparar a distribuição espacial da corrosão em provetes corroídos de forma acelerada em laboratório e em provetes corroídos naturalmente em estruturas existentes.

Bibliografia

- Agisoft LLC. "Agisoft PhotoScan User Manual." *Professional Edition, Version 1.2* 37. (www.agisoft.ru).2016.
- Ahmad, Shamsad. "Reinforcement Corrosion in Concrete Structures, Its Monitoring and Service Life Prediction - A Review." *Cement and Concrete Composites* 25(4–5 SPEC):459–71. 2003
- Ahmad, Shamsad. "Techniques for Inducing Accelerated Corrosion of Steel in Concrete." *The Arabian Journal for Science and Engineering* 34(2):95–104.2009.
- Almusallam, Abdullah A."Effect of Degree of Corrosion on the Properties of Reinforcing Steel Bars." *Construction and Building Materials* 15(8):361–68. 2001.
- Almusallam, Abdullah A. "Influence of Reinforcement Corrosion on Bond Strength." *Bond in Concrete 2012* 10(2):453–59. (papers3://publication/uuid/E4C9EF72-4BBD-4C8A-928A-1697F37B93B1). 2012.
- Bastidas-Arteaga, Emilio and Mark G. Stewart. "Damage Risks and Economic Assessment of Climate Adaptation Strategies for Design of New Concrete Structures Subject to Chloride-Induced Corrosion." *Structural Safety* 52(PA):40–53. 2015.
- Bastos, Afonso. "Caracterização Da Degradação Estrutural Baseada No Estudo Das Propriedades Dinâmicas de Uma Estrutura". Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa. 2017.
- Bertolini, Luca. *Corrosion of Steel in Concrete Prevention, Diagnosis, Repair*. 2004.
- Brown, Michael E. *Principles and Practice*. 1998.
- E. Cavaco. "Robustness of Corroded Reinforced Concrete Structures". PhD thesis, Faculdade de Ciências e Tecnologia-Universidade Nova de Lisboa. 2013.
- Cavaco, Eduardo S., Joan R. Casas, Luis a C. Neves, and Alfredo E. Huespe. "Robustness of Corroded Reinforced Concrete Structures . A Structural Performance Approach ." *Structure and Infrastructure Engineering* 9(1):42–58. 2009.
- Chang, Cheng-feng and Jing-wen Chen. "The Experimental Investigation of Concrete Carbonation Depth." 36(July 2004):1760–67. 2006.
- Darmawan, M. S. "Pitting Corrosion Model for Reinforced Concrete Structures in a Chloride Environment." *Magazine of Concrete Research* 62(2):91–101. (<http://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/macr.2008.62.2.91>). 2010.
- Fang, Congqi, Karin Lundgren, Liuguo Chen, and Chaoying Zhu. "Corrosion Influence on Bond in Reinforced Concrete." *Cement and Concrete Research* 34(11):2159–67. 2004.
- Fédération Internationale du Béton. "Bond of Reinforcement in Concrete: State-of-Art Report." *Fib Bulletin No. 10*. 2000.
- G. J. Al-Sulaimani I. A. Basunbul, and Rasheeduzzafar, M.Kaleemullah. "Influence of Corrosion and Cracking on Bond Behavior and Strength of Reinforced Concrete Members." *Structural Journal* 87(2).1990.
- Gentil, Vicente. "Corrosão." *Corrosão* 341. 1996.

- Gonçalves, Rui. "Robustez de Estruturas de Betão Armado Sujeitas a Deterioração". Tese de mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa. 2011.
- Kepler, Jennifer L. and Carl E. Locke. "Evaluation of Corrosion Protection Methods for Reinforced Concrete Highway Structures." *Corrosion* (58):231.2000
- Koyama, Motomichi, Eiji Akiyama, Young-kook Lee, Dierk Raabe, and Kaneaki Tsuzaki. "ScienceDirect Overview of Hydrogen Embrittlement in High-Mn Steels." *International Journal of Hydrogen Energy* 42(17):12706–23. 2017.
- Kyle Stanish and S. J. Pantazopoulou, R. D.Hooton. n.d. "Corrosion Effects on Bond Strength in Reinforced Concrete." *Structural Journal* 96(6).1999.
- Lee, Han Seung, Takafumi Noguchi, and Fuminori Tomosawa. "Evaluation of the Bond Properties between Concrete and Reinforcement as a Function of the Degree of Reinforcement Corrosion." *Cement and Concrete Research* 32(8):1313–18. 2002.
- Marques, Filipa Borges. "Monitorização de Pórticos de Betão Armado Com Alvenaria de Tijolo Através de Fotogrametria". Tese de mestrado, Instituto Superior Técnico. 2016.
- Merçon, Fábio, Pedro Ivo Canesso Guimarães, and Fernando Benedicto Mainier. "Corrosão: Um Exemplo Usual de Fenômeno Químico." *Química Nova Na Escola* 19:11–14. 2004.
- Michel, A., M. Otieno, H. Stang, and M. R. Geiker. "Propagation of Steel Corrosion in Concrete: Experimental and Numerical Investigations." *Cement and Concrete Composites* 70:171–82. 2016.
- Montemor, M. F., A. M. P. Simões, and M. G. S. Ferreira. "Chloride-Induced Corrosion on Reinforcing Steel: From the Fundamentals to the Monitoring Techniques." *Cement and Concrete Composites* 25(4–5 SPEC):491–502. 2003.
- Neville, Adam. "Chloride Attack of Reinforcement Concrete an Overview.Pdf." *Materials and Structures* 28:63–70. 1995.
- Ortega, Néstor F. and Sandra I. Robles. "Assessment of Residual Life of Concrete Structures Affected by Reinforcement Corrosion." *HBRC Journal* 12(2):114–22. 2016.
- Otieno, M., H. Beushausen, and M. Alexander. "Chloride-Induced Corrosion of Steel in Cracked Concrete - Part I: Experimental Studies under Accelerated and Natural Marine Environments." *Cement and Concrete Research* 79:373–85. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.08.009>). 2016.
- Papakonstantinou, K. G. and M. Shinozuka. "Probabilistic Model for Steel Corrosion in Reinforced Concrete Structures of Large Dimensions Considering Crack Effects." *Engineering Structures* 57:306–26. 2013.
- Porter, Samantha Thi, Morgan Roussel, and Marie Soressi. "A Simple Photogrammetry Rig for the Reliable Creation of 3D Artifact Models in the Field Lithic Examples from the Early Upper Paleolithic Sequence of Les Cottés (France)." *Advances in Archaeological Practice* 4(1):71–86. 2016.
- Ranjith, A., K. Balaji Rao, and K. Manjunath. "Evaluating the Effect of Corrosion on Service Life Prediction of RC Structures, A Parametric Study." *International Journal of Sustainable Built Environment* 5(2):587–603. 2016.

- Raupach, M., and P. Schiessl. "Monitoring System for the Penetration of Chlorides, Carbonation and the Corrosion Risk for the Reinforcement." *Construction and Building Materials* 11.4 (1997): 207–214. Web.
- Rodriguez, J., Ortega, LM, Casal, J. and Diez, JM. "Corrosion of reinforcement and service life of concrete structures". 7th International Conference on Durability of building materials and components. 1996.
- S. Azher. "A Prediction Model For The Residual Flexural Strength Of Corroded Reinforced Concrete Beams". 2005.
- Silva, Nelson. "*Chloride Induced Corrosion of Reinforcement Steel in Concrete: Threshold Values and Ion Distributions at the Concrete-Steel Interface*". 2013.
- Stewart, Mark G. "Spatial Variability of Pitting Corrosion and Its Influence on Structural Fragility and Reliability of RC Beams in Flexure." *Structural Safety*. 2004.
- Tuutti, Kyosti. "Corrosion of steel in concrete". K. Tuutti, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1982.
- Valença, J. "Aplicações de Fotogrametria À Engenharia de Estruturas". Tese de mestrado, Instituto Superior Técnico. 2006.
- Vu, Kim Anh T. and Mark G. Stewart. "Structural Reliability of Concrete Bridges Including Improved Chloride-Induced Corrosion Models." *Structural Safety* 22(4):313–33. 2000.
- Zhang, W., B. Zhou, X. Gu, and H. Dai. "Probability Distribution Model for Cross-Sectional Area of Corroded Reinforcing Steel Bars." *Journal of Materials in Civil Engineering* 26(5):822–32. 2014.