



M 2017

U. PORTO
FEUP FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

COMPORTAMENTO MONOTÓNICO E À FADIGA DE ADESIVOS ESTRUTURAIS PARA REPARAÇÃO DE LIGAÇÕES DE PONTES METÁLICAS

MARIANA DA SILVA FERREIRA RODRIGUES
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA
À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM
ENGENHARIA CIVIL

COMPORTAMENTO MONOTÓNICO E À FADIGA DE ADESIVOS ESTRUTURAIS PARA REPARAÇÃO DE LIGAÇÕES DE PONTES METÁLICAS

MARIANA DA SILVA FERREIRA RODRIGUES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Orientador: Professor Doutor Rui Artur Bártolo Calçada

Coorientador: Doutor José António Fonseca de Oliveira Correia

Coorientadores: Professores Alfonso Fernández-Canteli & Miguel Calvente

JUNHO DE 2017

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2016/2017 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2017.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais e Irmão

“Smart people give smart answers but wise people ask smart questions”

Patrick Bet-Davi

AGRADECIMENTOS

Após a concretização da presente dissertação de mestrado queria expressar os meus agradecimentos a todas as pessoas e instituições que estiveram envolvidos na sua realização. Deste modo, agradeço em particular:

- Ao Professor Doutor Rui Calçada do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, pela disponibilização de todos os meios para a realização deste trabalho.
- Ao Doutor José António Correia, Investigador de Pós-Doutoramento do Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial da Universidade do Porto, por toda a orientação e revisão cuidada da dissertação bem como a transmissão de todo o conhecimento para a sua elaboração.
- Aos Professores Doutores Alfonso Fernández-Canteli e Miguel Muniz-Calvente do Departamento de Construção e Engenharia de Fabricação da Escola Superior de Engenharia de Gijón da Universidade de Oviedo, Astúrias, Espanha, por todo o apoio prestado durante a execução da dissertação.
- À instituição, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), e em especial ao Laboratório de Ótica e Mecânica Experimental pela disponibilização de excelentes condições para a realização deste trabalho.
- Ao Laboratório de Resistência dos Materiais do Departamento de Construção e Engenharia de Fabricação da Escola de Engenharia de Gijón da Universidade de Oviedo, pela realização dos ensaios de fadiga para a resina Sikadur-52, em particular ao Eng. Sergio Blasón e à Profa. Maria Jesus Rey.
- Ao Professor Doutor José Xavier da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, que mesmo não estando ligado diretamente a este trabalho, dedicou-se e disponibilizou-se para dar o seu contributo e transmitir o seu conhecimento relacionado com a técnica de correlação digital de imagem (CDI).
- Aos projetos de investigação, NORTE-01-0145-FEDER-000022, SciTech – Science and Technology for Competitive and Sustainable Industries – Research Line 1: Advanced Materials & Structures, financiado pelo Portugal 2020, e, NORTE-01-0247-FEDER-015670, FADEST - Competence Development in R&D in the fatigue design of structures and Structural Details.
- À empresa SIKA, pelo fornecimento de todo o material necessário para a realização dos ensaios experimentais.
- À Patrícia Raposo e ao Bruno Pedrosa por toda a ajuda e conhecimento partilhado tendo em conta a correta execução dos processos experimentais.
- À minha família, agradeço o apoio e carinho fundamental que me foi transmitido ao longo de todo o percurso académico.
- A todos os meus amigos e colegas de faculdade, que sem o seu carinho, amizade e entreaajuda teria sido um caminho mais árduo.

RESUMO

Em Portugal existe um número considerável de pontes metálicas rebitadas antigas em serviço sendo que estas infraestruturas apresentam dificuldades na sua reabilitação, visto que é complicado perceber os detalhes de construção originais, a técnica de substituição de rebites e há falta de equipas especializadas para efetuar estes trabalhos. Estas estruturas estão ainda suscetíveis a apresentar elevados níveis de dano por fadiga devido ao seu longo tempo em operação como também ao elevado aumento do tráfego.

Assim, a substituição a curto prazo destas infraestruturas por novas não se torna num processo economicamente viável e, deste modo, operações de manutenção, reforço e reabilitação apresentam-se como as melhores soluções.

Como consequência, as ligações aparafusadas com injeção de resina surgem como uma hipótese para proceder à reabilitação de estruturas metálicas antigas. No entanto, os estudos no âmbito da avaliação da fiabilidade deste tipo de ligações tendo em conta o fenómeno de fadiga são ainda escassos.

A presente dissertação propõe como tema principal o estudo do comportamento monotónico (tração, compressão e flexão) e de resistência à fadiga (tração-tração) das resinas estruturais utilizadas em ligações aparafusadas com injeção de resina, para que os resultados obtidos possam ser úteis na construção e aplicação de modelos numéricos avançados para a previsão da resistência à fadiga dessas ligações.

PALAVRAS-CHAVE: Fadiga; Comportamento Monotónico; Resinas/Adesivos Estruturais; Pontes Metálicas Históricas; Aços Antigos; Abordagens Locais.

ABSTRACT

In Portugal there are a considerable number of old riveted metallic bridges still in service. These infrastructures present difficulties in their correct rehabilitation, since it is not easy to apprehend the original construction details, such as rivet replacement technique and the lack of specialized personnel to carry out these works. These structures are still susceptible to high levels of fatigue due to their long operating time as well as high traffic growth.

Therefore, the short-term replacement of these infrastructures is not an economically feasible process and so, maintenance, reinforcement and rehabilitation operations are presented as the best solutions.

Consequently, injections bolts have been considered a good technique to implement on rehabilitation campaigns of old metallic structures. Although a lot of studies has been done to evaluate the reliability of this type of connections considering the phenomenon of fatigue.

The main objective of this thesis is the study of the monotonic behaviour (tensile, flexure and compression) and the fatigue resistance of the structural resins/adhesives used in this type of bonding, so that the results obtained can be implemented in advanced models to predict the fatigue resistance of injected-bolted metallic connections.

KEYWORDS: Fatigue; Monotonic Behaviour; Structural Adhesives/Resins; Old Metallic Bridges; Old Steels; Local Approaches.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	V
ABSTRACT	VII
ÍNDICE GERAL	IX
ÍNDICE DE QUADROS (OU TABELAS)	XVII
1 - INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.3. ORGANIZAÇÃO	2
2 - FADIGA E ADESIVOS ESTRUTURAIS EM PONTES METÁLICAS ANTIGAS	5
2.1. FADIGA	5
2.1.1. Breve introdução histórica à fadiga.....	5
2.1.2. Caracterização do fenómeno de fadiga	6
2.1.3. Fases do processo de fadiga	6
2.1.3.1. Período de iniciação de fendas.....	7
2.1.3.2. Período de propagação de fendas.....	7
2.1.4. Curvas S-N.....	9
2.1.5. Modelos de previsão da vida à fadiga: Abordagens globais.....	10
2.2. ADESIVOS ESTRUTURAIS	12
2.2.1. Breve introdução histórica aos adesivos.....	12
2.2.2. Caracterização de adesivos estruturais	12
2.2.3. Fadiga em ligações realizadas por adesivos estruturais	13
2.2.4. Parafusos de injeção.....	14
2.2.4.1. Breve história da utilização de parafusos de injeção.....	14
2.2.4.2. Caracterização de parafusos de injeção.....	16
2.2.5. Casos de estudo para aplicações de adesivos em Estruturas de Engenharia Civil.....	18
2.2.5.1. Colocação de Resina époxi entre placas aparafusadas.....	18
2.2.5.2. Parafusos com injeção de resina em ponte metálica antiga.....	20

2.2.5.3. Ligações aparafusadas com injeção de resina: juntas com FRP na Engenharia de Pontes	22
2.2.5.4. Parafusos com injeção de resina com placas de FRP.....	24

3 - TÉCNICAS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS ... 26

3.1. INTRODUÇÃO 26

3.2. MATERIAIS..... 27

3.2.1. Resina Sikadur-52® 27

3.2.2. Resina Sikadur-30® 27

3.2.3.1. Fabricação dos moldes 29

3.2.3.2. Preparação dos moldes para obtenção de provetes 33

3.2.3.3. Obtenção de provetes Sikasur-52® 34

3.2.3.4. Obtenção de provetes Sikasur-30® 36

3.3. ENSAIOS MONOTÓNICOS 39

3.3.1. Ensaios de tração..... 39

3.3.1.1. Provetes a ensaiar..... 39

3.3.1.2. Dimensões dos provetes moldados 40

3.3.1.3. Setup experimental..... 41

3.3.2. Ensaios de compressão 43

3.3.3.1. Provetes a ensaiar..... 43

3.3.3.2. Dimensões dos provetes moldados 45

3.3.3.3. Setup experimental..... 45

3.3.3. Ensaios de flexão 47

3.3.3.1. Provetes a ensaiar..... 47

3.3.3.2. Dimensões dos provetes moldados 48

3.3.3.3. Setup experimental..... 49

3.3.4. Correlação Digital de Imagem (CDI) 51

3.4. ENSAIOS DE FADIGA 53

3.4.1.1. Provetes a ensaiar..... 53

3.4.1.2. Dimensões dos provetes moldados 55

3.4.1.3. Setup experimental..... 56

4 - ANÁLISE DE RESULTADOS..... 59

4.1. INTRODUÇÃO	59
4.2. ENSAIOS MONOTÓNICOS.....	59
4.2.1. Ensaio de tração	59
4.2.2. Ensaio de Compressão	64
4.2.3. Ensaio de Flexão.....	68
4.3. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À FADIGA	75
4.3.1. Ensaio de Fadiga	75
4.4. RESUMO DAS PROPRIEDADES MECANICAS DA RESINA SIKADUR-30® E SIKADUR-52 ...	84
5 - CONCLUSÕES.....	86
5.1. INTRODUÇÃO	86
5.2. CONCLUSÕES FINAIS	86
5.3. PROPOSTAS DE MELHORIAS E TRABALHOS FUTUROS	87
6 - REFERÊNCIAS	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. - Sequência das fases de vida à fadiga e fatores importantes (Silva, 2009).....	7
Figura 2.2 - Secção transversal de uma microfenda (Schijve, 2004).....	8
Figura 2.3. - Efeito da granulometria na propagação de fenda (Schijve, 2004).....	8
Figura 2.4. - Curva S-N obtida através de ensaios à fadiga (Schijve, 2004).....	10
Figura 2.5 – Representação da curva S-N (Correia et al. 2014).....	11
Figura 2.6. - Comparação de curvas S-N entre ligações rebitadas e ligações com resina (Schijve, 2004).	14
Figura 2.7. - Ponte rebitada em Roterdão onde foram aplicados parafusos de injeção (Nikolovski, 2009).	15
Figura 2.8 – Ponte Edgar Cardoso	15
Figura 2.9 - Reparação da alma da viga principal através de parafusos de injeção numa ponte em Oranienburg, Alemanha (Gresnigt et al, 2010).....	16
Figura 2.11. - Geometria dos provetes: a) provetes com dois parafusos; b) provete com um parafuso (dimensões em mm)	18
Figura 2.12. - Resultados obtidos para provete com dois parafusos	19
Figura 2.13. - Resultados obtidos para provete com um parafuso	19
Figura 2.14. - Geometria dos provetes: a) provetes com ligação de corte simples; b) provete com ligação de corte duplo (dimensões em mm).....	20
Figura 2.15 – Comparação da Curva S-N média para ligações simples de material proveniente da ponte de Trezói.....	21
Figura 2.16 – Comparação da Curva S-N média para ligações duplas de material proveniente da ponte de Fão	21
Figura 2.17. – Geometria do provete com ligação de corte duplo (dimensões em mm).....	22
Figura 2.18. – Resultados experimentais da realização do Ensaio 1	23
Figura 2.19. – Resultados experimentais da realização do Ensaio 2.....	23
Figura 2.20. – Resultados experimentais da realização do Ensaio 3.....	23
Figura 2.21. – Resultados experimentais da realização do Ensaio 4.....	23
Figura 2.22. - Geometria dos provetes: a) provetes com parafusos M16; b) provete com parafusos M20 (dimensões em mm)	25
Figura 3.1 – Planta e respetivos cortes do molde a ser usado na fabricação dos provetes de compressão de acordo com a norma ASTM D695	30

Figura 3.2 – Projeto em 3D do molde a ser usado na fabricação dos provetes de compressão segundo a norma ASTM D695	30
Figura 3.3 – Planta e respetivos cortes do molde a ser usado na fabricação dos provetes de flexão segundo a norma ASTM D790.....	31
Figura 3.4 – Projeto em 3D do molde a ser usado na fabricação dos provetes de flexão segundo a norma ASTM D790.....	31
Figura 3.5 – Planta e respetivos cortes do molde a ser usado na fabricação dos provetes de tração e fadiga, segundo as normas ASTM D638 e ASTM D7791	32
Figura 3.6 – Projeto em 3D do molde a ser usado na fabricação dos provetes de tração e fadiga segundo as normas ASTM D638 e ASTM D7791-12.....	32
Figura 3.7 – Fotografia dos moldes a utilizar na fabricação dos provetes de compressão segundo a norma ASTM D695.....	33
Figura 3.8 – Fotografia dos moldes a utilizar na fabricação dos provetes de flexão segundo a norma ASTM D790.....	33
Figura 3.9 – Fotografia dos moldes a utilizar na fabricação dos provetes de tração e fadiga segundo as normas ASTM D638 e ASTM D7791-12.....	34
Figura 3.10 – Mistura dos componentes de resina Sikadur-52®: a) Identificação dos dois componentes; b) Pesagem dos componentes.....	35
Figura 3.11 – Obtenção dos provetes Sikadur-52®: a) Colocação da resina nos moldes através de uma seringa; b) pormenor da perda de resina pelas chapas metálicas dos moldes.....	36
Figura 3.12 – Mistura dos componentes de resina Sikadur-30®: a) Identificação dos dois componentes; b) Pesagem dos componentes.....	37
Figura 3.13 – Obtenção dos provetes Sikadur-30®: a) selagem dos moldes com fita-adesiva; b) colocação da resina nos moldes através de uma espátula.....	38
Figura 3.14 – Aplicação de chapas acrílicas na zona de amarração dos provetes.....	39
Figura 3.16 – Fotografia dos provetes moldados em forma de “osso de cão” : a) resina Sikadur-52; ® b) resina Sikadur-30®	40
Figura 3.17 – Máquina de ensaio INSTRON 8801: ensaio à tração	42
Figura 3.18 – Sistema de correlação digital de imagem: ensaio à tração.....	42
Figura 3.19 – Provede a ser moldado para a realização do ensaio de compressão segundo a norma ASTM D695.....	44
Figura 3.20 – Provedes moldados em forma de prisma: a) resina Sikadur-52®; b) resina Sikadur-30®	44
Figura 3.21 – Máquina de ensaios INSTRON 8801: ensaio à compressão.....	46
Figura 3.22 – Sistema de correlação digital de imagem: ensaio à compressão.....	46
Figura 3.23 – Geometria do provede a ser usando nos ensaios de flexão segundo a norma ASTM D790.....	47
Figura 3.24 – Fotografia dos provedes moldados em barra retangular de resina Sikadur-52®.....	48

Figura 3.25 – Fotografia dos provetes moldados em barra retangular de resina Sikadur-30®	48
Figura 3.26 – Máquina de ensaios INSTRON 5484 MicroTester.....	50
Figura 3.27 – Linhas médias traçadas nos provetes de resina Sikadur-52® e Sikadur-30®.....	50
Figura 3.28 – Tintas a que se recorre para criar um padrão speckle	51
Figura 3.29: Pintura dos provetes para CDI: a) Provede a ser usado no ensaio de tração de resina Sikadur-52; b) Provede a ser usado no ensaio de tração de resina Sikadur-30; c) Provetes a serem usados nos ensaios de compressão de resina Sikadur-52; d) Provetes a serem usados nos ensaios de compressão de resina Sikadur-30.....	52
Figura 3.30 – Provede a ser moldado para a realização do ensaio de resistência à fadiga segundo a norma ASTM D7791-12	54
Figura 3.31 – Fotografia dos provetes moldados em forma de “osso de cão” para a resina Sikadur-52®.....	54
Figura 3.32 – Fotografia dos provetes moldados em forma de “osso de cão” para a resina Sikadur-30®.....	54
Figura 3.33 – Aplicação de placas acrílicas em provetes Sikadur-30®	56
Figura 3.34 – Aplicação de placas metálicas em provetes Sikadur-52®	56
Figura 3.35 – Máquina de ensaio INSTRON 8801: ensaio à fadiga.....	57
Figura 3.36 – Pormenor da colocação do provede para o ensaio de fadiga	57
Figura 3.37 – Máquina de ensaios dinâmicos e de fadiga MTS Bionix.....	58
Figura 3.38 – Pormenor da colocação do provede para o ensaio de fadiga	58
Figura 4.1 - Apresentação dos provetes usados nos ensaios de tração de resina Sikadur-52® após a rotura	60
Figura 4.2 - Apresentação dos provetes usados nos ensaios de tração de resina Sikadur-30® após a rotura.	60
Figura 4.3 – Gráfico tensão-deformação: Ensaio à Tração da resina Sikadur-52®	62
Figura 4.4 – Gráfico tensão-deslocamento: ensaio à tração da resina Sikadur-30®	63
Figura 4.5 – Apresentação dos provetes usados nos ensaios de compressão da resina Sikadur-52®	64
Figura 4.6 – Apresentação dos provetes usados nos ensaios de compressão da resina Sikadur-30®	64
Figura 4.7 – Pormenor da rotura do provede de resina Sikadur-52®	65
Figura 4.8 – Pormenor da rotura do provede de resina Sikadur-30®	66
Figura 4.9 – Gráfico tensão-deformação: ensaio à compressão da resina Sikadur-52®	66
Figura 4.10 – Gráfico tensão-deformação: ensaio à compressão da resina Sikadur-30®	67
Figura 4.11 – Curvas tensão-deformação propostas pela norma ASTM D790.....	69
Figura 4.12 – Apresentação dos provetes usados nos ensaios de flexão para a resina Sikadur-52® após a rotura.	70

Figura 4.13 – Apresentação dos provetes usados nos ensaios de flexão para a resina Sikadur-30® após rotura.....	71
Figura 4.14 – Término do ensaio à flexão após grande deformação do provete.....	72
Figura 4.15 – Gráfico da curva tensão-deformação: ensaio à flexão da resina Sikadur-52®, Eq. (4.3).....	72
Figura 4.16 – Gráfico da curva tensão-deformação: ensaio à flexão da resina Sikadur-52®, Eq. (4.4).....	73
Figura 4.17 – Gráfico da curva tensão-deformação: ensaio à flexão da resina Sikadur-30®.....	74
Figura 4.18 – Apresentação dos provetes dos ensaios de fadiga para a resina Sikadur-52®.....	76
Figura 4.19 – Apresentação dos provetes dos ensaios de fadiga para a resina Sikadur-30®.....	76
Figura 4.20 – Imagem fratográfica da secção a onde ocorre a rotura para o provete 52_2.....	77
Figura 4.21 – Imagem fratográfica da secção a onde ocorre a rotura para o provete 52_4.....	77
Figura 4.22 – Curvas de percentis probabilísticos correspondentes a diversas probabilidades de rotura para a resina Sikadur-52®.....	80
Figura 4.23 – Curva S-N obtida através de bandas de confiança retilíneas para a resina Sikadur-52®.....	81
Figura 4.24 – Curvas de percentil correspondentes a diversas probabilidades de rotura para a resina Sikadur-30®.....	82
Figura 4.31 – Curva S-N de projeto proposta obtida através de bandas de confiança retilíneas para a resina Sikadur-52®.....	83
Figura 4.32 – Comparação das curvas S-N médias para as resinas Sikadur-52® e Sikadur-30® ...	84

ÍNDICE DE QUADROS (OU TABELAS)

Tabela 2.1 – Modelos propostos para a curva S-N (Correia, 2014).....	11
Tabela 3.1 – Viscosidade da resina Sikadur-52® a diferentes temperaturas	27
Tabela 3.2 – Propriedades da resina Sikadur-52® após 7 dias a +23 °C	27
Tabela 3.3 – Resistência à compressão da resina Sikadur-30®	28
Tabela 3.4 – Resistência à tração da resina Sikadur-30®	28
Tabela 3.5 – Resistência ao corte da resina Sikadur-30®	28
Tabela 3.6 – Dimensões dos moldes relativos aos ensaios indicados	29
Tabela 3.7 – Dimensões dos provetes a serem ensaiados segundo a norma ASTM D638	41
Tabela 3.8 – Dimensões dos provetes a ser ensaiados segundo a norma ASTM D695	45
Tabela 3.9 – Dimensões dos provetes a ser ensaiados segundo a norma ASTM D790	49
Tabela 3.10 – Características dos componentes óticos utilizados na CDI	53
Tabela 3.11 – Dimensões dos provetes a ser testados segundo a norma ASTM D7791-12	55
Tabela 4.1 – Validação dos provetes testados nos ensaios à tração	61
Tabela 4.2 – Resumo dos resultados obtidos para os ensaios de tração para a resina Sikadur-52... ..	62
Tabela 4.3 – Resumo dos resultados obtidos para os ensaios de tração para a resina Sikadur-30® ..	63
Tabela 4.4 – Validação dos provetes testados nos ensaios à compressão	65
Tabela 4.5 – Resumo dos resultados obtidos para os ensaios de compressão para a resina Sikadur-52®.....	67
Tabela 4.6 – Resumo dos resultados obtidos para os ensaios de compressão para a resina Sikadur-30®.....	68
Tabela 4.7 – Validação dos provetes realizados à flexão.....	71
Tabela 4.8 – Resumo dos resultados obtidos para os ensaios de flexão para a resina Sikadur-52® ..	73
Tabela 4.9 – Resumo dos resultados obtidos para os ensaios de flexão para a resina Sikadur-30® ..	74
Tabela 4.10 – Resumo dos resultados obtidos para os ensaios de fadiga para a resina Sikadur-52®	78
Tabela 4.11 – Resumo dos resultados obtidos para os ensaios de fadiga para a resina Sikadur-30®	79
Tabela 4.12 – Parâmetros das curvas S-N de projeto para a resina Sikadur-52®	79
Tabela 4.13 – Parâmetros das curvas S-N de projeto para a resina Sikadur-30®	81
Tabela 4.14 – Resumo das propriedades mecânicas da resina Sikadur-52® e Sikadur-30®.....	85

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

Abreviaturas

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

ASTM - American Society for Testing and Materials

BS – British Standard

CDI – Correlação Digital de Imagem

EC3 – Eurocódigo 3

ECCS - European Convention for Constructional Steelwork

Esp. – Espessura, mm

FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

FRP - Materiais Compósitos Reforçados com Fibras

Larg. – Largura, mm

LOME – Laboratório de Ótica e Mecânica Experimental

MIEC - Mestrado Integrado em Engenharia Civil

UTAD – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Simbologia

Letras gregas

$\Delta\sigma$, – Amplitude de tensão

ε_f – Deformação na fibra mais extrema

ε – Deformação, %

ν – Coeficiente de Poisson

σ_f – Resistência à flexão, MPa

σ_c – Resistência à compressão, MPa

σ_t – Resistência à tração, MPa

Letras latinas

A_{min} – Área mínima da secção transversal, mm²

b – Largura do provete ensaiado, mm

d – Espessura do provete ensaiado, mm

D – Deslocamento da linha média do provete a meio vão, mm

E – Módulo de Elasticidade

L – Comprimento entre suportes, mm

N – Número de ciclos

N_f – Número de ciclos de aplicação da carga até à rotura

N_i – Número de ciclos do período de iniciação

N_p – Número de ciclos do período de propagação

P – Força num determinado ponto da curva Força-Deslocamento, N.

R_σ – Razão de Tensões

R^2 – Coeficiente de determinação

1

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

As pontes estabelecem a comunicação entre dois pontos separados por um curso de água ou por uma depressão do terreno sendo que estes tipos de infraestruturas estão sujeitos a efeitos dinâmicos originados por diversos fatores, como a movimentação de pessoas e veículos, ação do vento, variações de temperatura, entre outros. A substituição a curto prazo destas infraestruturas por novas não se torna num processo economicamente viável e, deste modo, operações de manutenção, reforço e reabilitação apresentam-se como as melhores soluções.

A manutenção e a garantia da segurança de pontes metálicas antigas rebitadas, construídas e colocadas em serviço entre o final do século XIX e o início do século XX, merecem particular atenção (Akesson, 1994), na medida em que, estas estruturas estão suscetíveis a apresentar elevados níveis de fadiga devido ao seu longo tempo em operação, bem como, ao aumento acentuado do tráfego, isto é, a frequência e a carga dos veículos são extremamente diferentes ao inicialmente usado em projeto, sabendo que, à época os problemas da fadiga nunca tiveram grande relevância, já que predominavam solicitações essencialmente estáticas e de baixa intensidade.

É também importante referir, que à época em que estas estruturas foram projetadas, o conhecimento científico era bastante escasso nomeadamente no que diz respeito ao fenómeno de fadiga. Este fenómeno só foi inteiramente estudado durante o século XX. As investigações sobre o fenómeno de fadiga em pontes metálicas rebitadas antigas desenvolveram-se nos Estados Unidos da América e Europa do Norte, mas, mais recentemente, outros países têm vindo a interessar-se por este fenómeno devido à importância económica que apresenta. As pesquisas efetuadas revelam que as localizações nas ligações rebitadas, na medida em que promovem a concentração de tensões principalmente na vizinhança dos furos e deste modo, as fendas de fadiga iniciam-se neste local propagando-se pelos elementos estruturais levando à sua rotura.

Em Portugal existe um número considerável de pontes metálicas rebitadas antigas em serviço (Fernandes et al, 2012), sendo que a reabilitação destas infraestruturas torna-se o caminho economicamente mais viável. As intervenções em detalhes estruturais originais, tais como, remover rebites sem causar danos, as técnicas de aplicação e falta de equipas especializadas para efetuar estes trabalhos, tornam-se em tarefas quase impossíveis e muito dispendiosas

Assim, o tipo de ligação a que se recorre para intervenções de reabilitação são a sobreposição de chapas de ligação e o uso de ligações aparafusadas com injeção de resina estrutural, apesar de

estudos serem escassos no âmbito da avaliação da fiabilidade deste tipo de ligações tendo em conta o fenómeno de fadiga, sendo que a abordagem deste tema apresenta relevância nacional e internacional. A qualidade da ligação depende dos parâmetros das resinas, como também, da realização da injeção, sendo que se esta não for executada corretamente conduzirá a elevada concentração de tensões nos locais críticos potencializando a risco de fratura (Kortis, 2011).

Neste momento, os métodos numéricos demonstram ser importantes para complementarem os métodos experimentais. As análises numéricas têm contribuído para um estudo mais aprofundado do fenómeno de fadiga, tendo em consideração a resina estrutural colocada na ligação aparafusada.

Em suma, esta dissertação visa a caracterização do comportamento estático e à fadiga de resinas estruturais, usualmente empregues na reabilitação e reforço de ligações estruturais de pontes metálicas antigas rebitadas. O programa experimental deste trabalho será executado usando provetes moldados de resina Sikadur-52 e Sikadur-30. Os ensaios serão realizados com recurso a normas americanas da ASTM (American Society for Testing and Materials).

1.2. OBJETIVOS

A presente dissertação tem como tema principal a caracterização do comportamento estático e à fadiga de adesivos estruturais usados em reparação de pontes metálicas antigas. Este estudo visa, essencialmente, a caracterização de adesivos/resinas estruturais, Sikadur-52 e Sikadur-30, usados para preencher o furo entre o parafuso e as placas das ligações metálicas aparafusadas usadas em reparação de pontes metálicas históricas.

O comportamento monotónico das resinas estruturais em estudo será obtido com recurso a ensaios experimentais com o objetivo de obter as propriedades mecânicas, tais como, o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, resistência à tração, compressão e flexão.

Por outro lado, a caracterização do comportamento à fadiga em tração será realizada com recurso a ensaios experimentais com o objetivo de obter as curvas S-N das resinas usando a norma americana ASTM D7791-12. As propriedades de fadiga podem variar com o tamanho da amostra e a frequência do teste. A influência desses parâmetros será levada em consideração neste estudo. A frequência de teste pode ser de 1-25Hz, mas recomenda-se que seja utilizada uma frequência de 5 Hz ou menos.

Os resultados do comportamento à fadiga das resinas/adesivos estruturais são importantes para serem usados em modelação numérica para previsão da resistência à fadiga de ligações aparafusadas com injeção de resinas.

1.3. ORGANIZAÇÃO

A presente dissertação encontra-se organizada em 5 capítulos, incluindo o presente que consiste na introdução do tema e na definição de objetivos.

No capítulo 2 é realizada uma revisão ao desenvolvimento do estudo do fenómeno de fadiga e as contribuições efetuadas para o seu melhor entendimento. Por seguida, é efetuada uma caracterização do fenómeno como também das fases da vida à fadiga, um breve resumo das abordagens globais das curvas S-N e uma revisão bibliográfica sucinta sobre alguns estudos realizados no âmbito da avaliação experimental à fadiga de ligações aparafusadas com injeção de resina. De outro modo, neste mesmo capítulo, é referida uma breve história à utilização de adesivos

estruturais, bem como, a apresentação de algumas características das resinas/adesivos estruturais. É ainda apresentado um breve historial à utilização de parafusos usados para injeção de resina, aplicados em estruturas de engenharia, enumerando as suas principais vantagens e desvantagens sendo que o capítulo termina com uma breve referência aos casos de estudos efetuados relativos à aplicação de adesivos estruturais em ligações aparafusadas com injeção de resina estrutural em casos de estudo de Engenharia Civil.

De seguida, é apresentado um capítulo 3 denominado por técnicas e procedimentos experimentais em que se explica todo o processo de obtenção dos provetes a serem utilizados nos ensaios monotônicos, bem como, nos ensaios de avaliação da resistência à fadiga. Neste capítulo apresentam-se as dimensões dos moldes usados para a fabricação dos provetes, a geometria dos provetes usados nos diferentes ensaios propostos. Para além disto, apresenta-se uma breve descrição das características comerciais das resinas estruturais, como também, as normas de ensaios experimentais usadas neste estudo, as máquinas usadas nos ensaios e todo o setup experimental envolvido.

O capítulo 4 intitulado como análise de resultados encontra-se dividido em dois grandes temas, tais como: ensaios monotônicos usados na caracterização do comportamento dos materiais à tração, compressão, flexão, e ainda as propriedades elásticas, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson; e, os ensaios para a avaliação do comportamento à fadiga das resinas estruturais usadas neste estudo (Sikadur-30 e Sikadur-52), sendo apresentadas as curvas S-N médias, bem como, propostas de curvas S-N de projeto.

Por fim, um capítulo destinado às conclusões onde está disponível, de maneira sucinta e organizada, toda a informação, considerada útil, proveniente da análise experimental realizada. Também é feita uma pequena abordagem às limitações encontradas no trabalho realizado, bem como, é apresentado algumas sugestões para trabalhos futuros.

2

FADIGA E ADESIVOS ESTRUTURAIS EM PONTES METÁLICAS ANTIGAS

2.1. FADIGA

2.1.1. BREVE INTRODUÇÃO HISTÓRICA À FADIGA

As primeiras falhas observadas devido a fenómenos de fadiga ocorreram nos mastros e velas dos barcos que percorreram longas distâncias. Com a revolução industrial foram relatadas várias falhas de fadiga graves em estruturas metálicas sendo que se iniciaram assim as primeiras investigações laboratoriais.

A história do conhecimento sobre o fenómeno de fadiga inicia-se, em 1937, com Albert, engenheiro de minas alemão, publicando os primeiros resultados relativos a ensaios de fadiga em correntes usadas pelos tapetes transportadores de minério (Ribeiro et al, 2011).

Por conseguinte, em 1842, Rankine teve uma grande contribuição para o conhecimento das zonas de concentração de tensões em componentes metálicos para ocorrer a rotura das mesmas, sendo que só em 1854 é que o termo fadiga foi referido pela primeira vez pelo inglês Braithwaite (Ribeiro et al, 2011).

Posteriormente, em 1870, foram realizadas grandes investigações laboratoriais sob esforços repetidos submetidos à flexão, torção e cargas axiais em eixos de carruagens para ferrovia levadas a cabo por um engenheiro alemão, August Wöhler. Os estudos efetuados revelaram que “o material pode sofrer uma falha devido à aplicação repetida de tensões, todas inferiores ao limite de resistência elástica do material. As gamas de tensões são decisivas na destruição da coesão do material. A tensão máxima é importante, uma vez que quanto maior ela for, menor deverá ser a gama de tensão que conduzirá à rotura” (Silva, 2009). Destacou-se também pela introdução do conceito de limite de fadiga juntamente com a caracterização do mesmo fenómeno usando curvas S-N, também conhecidas curvas de Wöhler.

No século XIX é de referenciar também o desenvolvimento de métodos de dimensionamento à fadiga para diferentes ciclos de tensão realizados por Fairbairn e Gerber, em 1864 e 1874, respetivamente. No fim deste século, em 1899, concluiu-se que o limite elástico dos metais era alterado devido à aplicação de ciclos de tensão alternados (Ribeiro et al., 2011).

Mais tarde, em 1910, Basquin, propôs uma equação matemática para representar a região de vida finita das curvas S-N. Posteriormente, no início dos anos 60, estabeleceu-se uma relação empírica de Coffin-Manson que relaciona o número de ciclos para a rotura com a amplitude de deformação plástica (Coffin, 1945) e (Manson, 1954).

Em 1960, ocorreu um grande desenvolvimento da mecânica da fratura e a sua aplicação no fenómeno de fadiga. Uma das principais contribuições para a compreensão deste fenómeno foi proposto em 1962, por Paris, sabendo que foi o primeiro a reconhecer a relação entre a fadiga e a Mecânica da Fratura.

Os estudos continuam a ser efetuados e desenvolvidos nomeadamente no que dizem respeito à modelação da vida à fadiga, pois ainda não há uma compressão total do fenómeno. O desenvolvimento de ensaios de fadiga uniaxiais e multiaxiais sob condições de carregamento de amplitudes constante e variável contribuíram para o surgimento de formulações analíticas que caracterizam estes estados.

Atualmente, já existem máquinas de ensaios de ressonância que permitem a obtenção do conhecimento do fenómeno de fadiga de materiais ou detalhes estruturais em regime de elevados ciclos de fadiga.

2.1.2. CARACTERIZAÇÃO DO FENÓMENO DE FADIGA

A ocorrência de falhas em estruturas metálicas está relacionada, em cerca de 80 a 90 %, a fenómenos de fadiga e fratura. Deste modo, é necessário dar atenção ao fenómeno da fadiga, na medida em que, em Portugal a maioria das pontes rebitadas que foram projetadas e colocadas em serviço no final do século XIX e início do século XX necessitam de manutenção. Assim, surgiram códigos de projeto para estruturas metálicas modernas como por exemplo, BS5400, EC 3 e AASHTO em que se exige a avaliação das resistências à fadiga e fratura de detalhes e ligações estruturais. (Silva, 2009).

De acordo com a ASTM, o termo fadiga refere-se à “mudança estrutural, localizada e progressiva, que ocorre num material sujeito a certas condições que provocam extensões e tensões dinâmicas até a um ponto ou pontos que culminam em fendas ou fraturas completas após um determinando numero de variações de carga”.

2.1.3. FASES DO PROCESSO DE FADIGA

As investigações realizadas no século XX sugeriram que a nucleação de microfendas geralmente ocorre muito cedo na vida de fadiga, isto é, aquando da aplicação de uma carga cíclica acima do limite de fadiga, nível de tensão cíclica abaixo do qual não ocorre uma falha por fadiga. (Schijve, 2004).

O processo associado à fadiga é, geralmente, dividido num período de iniciação e num período de propagação de fendas como é ilustrado na Figura 2.1.

A distinção entre estes dois períodos é de grande importância, na medida em que, várias condições de superfície afetam o período de iniciação, mas têm uma influência também no período de crescimento da fissura. A rugosidade superficial e os ambientes corrosivos podem afetar a iniciação e a propagação de fendas, mas de uma maneira diferente para os dois períodos.

Os métodos de previsão são diferentes para as duas fases, visto que, por exemplo, a rugosidade superficial afeta o período de iniciação da fenda, mas, não têm qualquer interferência no período de crescimento da fissura. Nos modelos de previsão de fadiga para a iniciação de fissuras, utiliza-se o fator de concentração de tensão K_t , parâmetro que caracteriza a gravidade da distribuição da tensão

em torno de um entalhe. Complementarmente, para definir o período de crescimento da fissura, é utilizado o fator de intensidade de tensão K , que caracteriza o campo de tensão em torno da fenda.

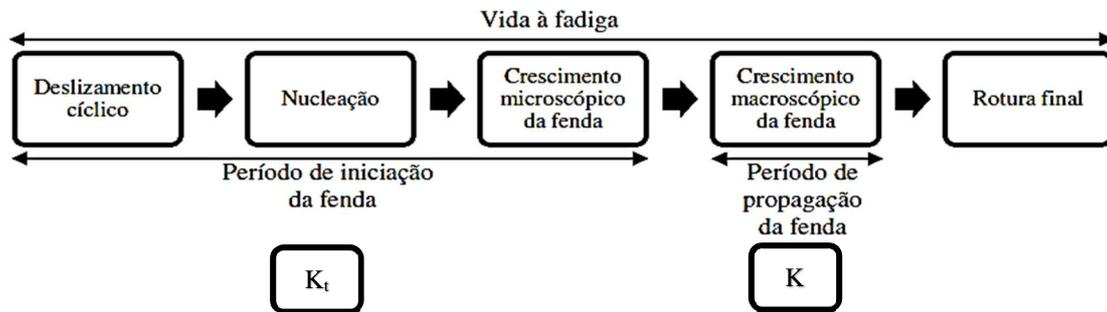


Figura 2.1. - Sequência das fases de vida à fadiga e fatores importantes (Silva, 2009)

A duração de um elemento estrutural à fadiga define-se geralmente pelo número de ciclos de aplicação da carga até à rotura, N_f , incluindo o período de iniciação, N_i , e o período de propagação N_p , ou seja:

$$N_f = N_i + N_p \quad (2.1)$$

2.1.3.1. PERÍODO DE INICIAÇÃO DE FENDAS

A primeira fase consiste no surgimento de microfendas extremamente pequenas para serem visíveis “a olho nu” sendo que neste período são submetidas a pequenos ciclos de carga que podem ocupar mais de 90 por cento da vida do material em estudo. No momento em que essas fendas se tornam visíveis, apenas uma pequena percentagem permanece da vida total do material. No entanto, em estruturas reais como navios, aviões e pontes, esta vida remanescente pode ser muito mais longa do que as investigações realizadas em laboratório (Schijve, 2004).

Assim, este período inicial implica alguma deformação plástica cíclica e ocorre, normalmente, em amplitudes de tensão abaixo da tensão de cedência do material, ou seja, a deformação ocorre apenas numa área restrita e pequena.

A superfície do material torna-se vulnerável, devido ao facto da microplasticidade ocorrer preferencialmente em grãos na superfície do material derivado da menor restrição de deslizamento. Na superfície livre de um material, o material circundante está presente apenas num lado sendo que o outro lado é o ambiente. Com consequência, a deformação plástica nos grãos de superfície é restringida por grãos vizinhos (Schijve, 2004).

Deste modo, pode-se afirmar que este período inicial é influenciado principalmente pelas condições da superfície do material, tal como a rugosidade superficial.

2.1.3.2. PERÍODO DE PROPAGAÇÃO DE FENDAS

Desde que o tamanho da microfenda esteja ainda na ordem de um único grão, esta está presente num material elasticamente anisotrópico com uma estrutura cristalina e vários sistemas de deslizamento. Assim, a restrição dos deslocamentos de deslizamento aumentará, devido à presença dos grãos vizinhos, se a fissura estiver a crescer no material em alguns grãos adjacentes (Schijve, 2004).

Assim, irá ocorrer mais do que um plano de deslizamento, por consequência, a microfissura adquire uma tendência de crescimento perpendicularmente à direção de carga, como é possível observar na Figura 2.2.

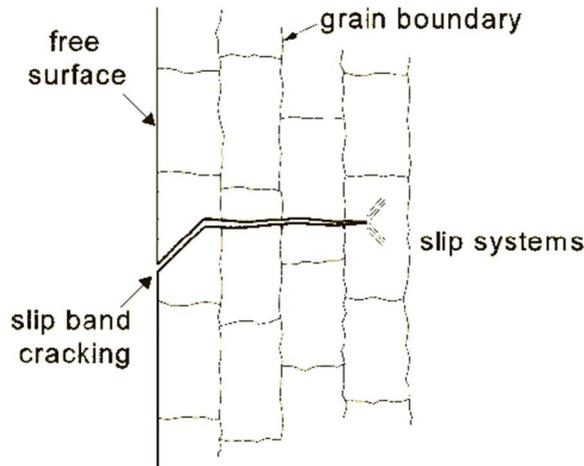


Figura 2.2 - Seção transversal de uma microfenda (Schijve, 2004).

O crescimento da microfenda depende da plasticidade cíclica do material. Assim, a taxa de crescimento da microfenda diminuiu quando o limite da fenda se aproxima do primeiro limite de grão. Ao penetrar através do limite do grão, a taxa de crescimento aumenta quando da aproximação do próximo grão, mas diminuiu novamente quando se aproxima do segundo limite de grão. Após de passar essa barreira, a microfenda continua a crescer com uma taxa de aumento constante. Este processo é possível de se observar na Figura 2.3.

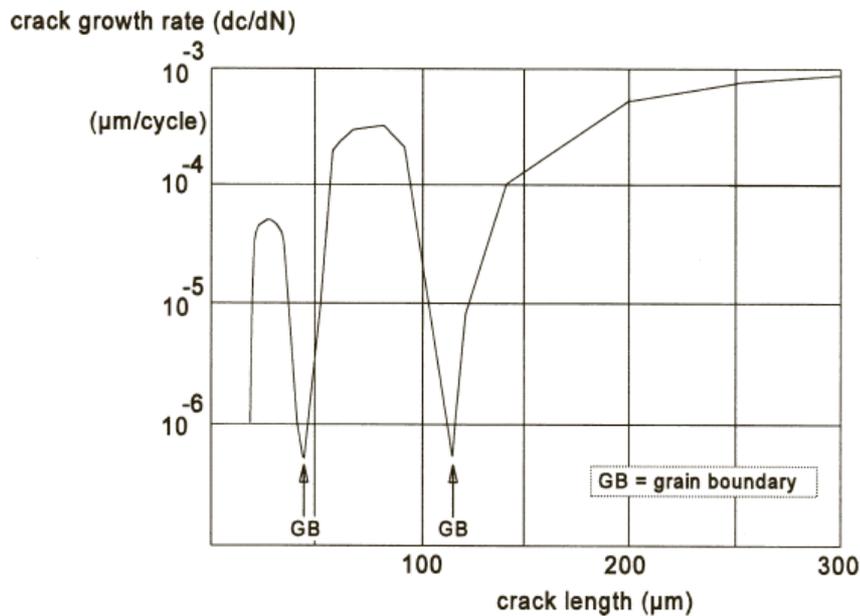


Figura 2.3. - Efeito da granulometria na propagação de fenda (Schijve, 2004).

Assim, o período de propagação coincide com a fase de crescimento de fendas sendo que, ao contrário do que acontece no período de iniciação de fendas, para grandes amplitudes de carga este é um período com grande significância na vida da estrutura.

Apesar de não haver uma clara separação entre os dois períodos que caracterizam a vida à fadiga de uma estrutura e do mesmo variar tendo em conta o material (Schijve, 2004).

Neste período, as características da superfície, tais como, a rugosidade não afeta a propagação de fendas mas, por outro lado, as propriedades de granulometria adquirem um papel fundamental nesta fase.

2.1.4. CURVAS S-N

As curvas S-N, também conhecidas como curvas de Wöhler, normalmente utilizadas para representar a vida à fadiga de um material ou detalhe estrutural, são obtidas através dos resultados de ensaios experimentais realizados à fadiga tendo em conta diferentes níveis de tensão. Estas curvas relacionam a amplitude de tensão com o número de ciclos até à rotura. Usualmente, o número de ciclos, N , é colocado numa escala logarítmica e a amplitude de tensão, $\Delta\sigma$, é, preferencialmente, apresentada numa escala linear (Correia, 2014; Correia et al., 2017; Gallegos Mayorga et al., 2016, 2017) como se ilustra na Figura 2.4.

As curvas de Wöhler são tipicamente estabelecidas utilizando a amplitude de tensões, a gama de tensões ou a tensão máxima do ciclo como parâmetro de dano principal. Cada curva é geralmente derivada de um parâmetro fixo relacionado ao nível de tensão do ciclo, como a própria tensão média, a tensão máxima ou mínima ou a razão de tensões, R .

Fadiga de elevadas amplitudes, designada também por fadiga de baixo ciclo, situa-se até cerca de 10^4 ciclos, por outro lado, se estamos perante um número elevado de ciclos, isto é, 10^5 ciclos ou mais, é denominado por fadiga de alto ciclo. Sabe-se que o limite entre fadiga de baixo e alto ciclo não é exatamente definido por um número específico de ciclos, deste modo, o que se torna mais relevante entre as duas condições é que a fadiga de baixo ciclo está associada com deformação macropelástica em cada ciclo enquanto a fadiga de ciclo elevado é mais relacionada a um comportamento elástico numa escala macro do material (Ribeiro et al., 2011).

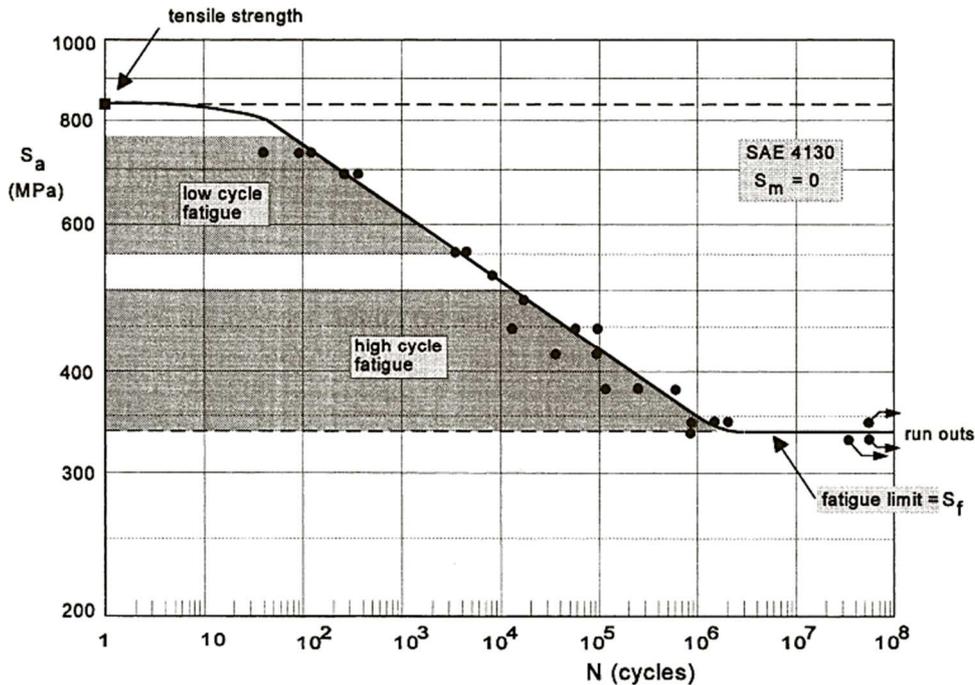


Figura 2.4. - Curva S-N obtida através de ensaios à fadiga (Schijve, 2004).

2.1.5. MODELOS DE PREVISÃO DA VIDA À FADIGA: ABORDAGENS GLOBAIS

Os problemas de fadiga são de natureza complexa e não são facilmente compreensíveis ou viáveis para serem modelados com precisão, uma vez que dependem de uma grande variedade de fatores, que nem sempre são independentes, que controlam a resposta estrutural ao carregamento cíclico (Correia, 2014).

Deste modo, os procedimentos de dimensionamento e avaliação são tipicamente de natureza empírica. Como nenhuma teoria unificada pode prever de forma confiável a resposta à fadiga, recorrem-se a ensaios experimentais para descrever a resistência à fadiga dos materiais (Correia, 2014).

Recentemente, Correia et al. (Correia et al. 2011, 2012, 2013, 2015), Sampayo et al. (2015) e Raposo et al. (2017) e Huffman et al. (2016, 2017) têm tentado apresentar algumas abordagens unificadas tendo em consideração as fases de iniciação e propagação de fendas para a previsão da vida à fadiga de detalhes estruturais, usando o modelo UniGrow desenvolvido por Noorzi e Glinka (Noorzi et al., 2005).

Mais recentemente, Correia et al. (2017) propôs uma abordagem baseada em simulação por elementos finitos para obter curvas S-N usando modelos de fadiga de dois estágios (iniciação e propagação de fendas de fadiga). Este estudo permitiu obter curvas S-N com base em modelação numérica tendo em conta várias variáveis nas duas fases de fadiga.

Na Tabela apresentam-se diferentes modelos (parabólicos, hiperbólicos, lineares, etc.) que se adequam aos resultados experimentais. É de salientar que nem todos os modelos são fisicamente válidos.

Tabela 2.1 – Modelos propostos para a curva S-N (Correia, 2014)

Modelo	Equação
Wöhler (1870)	$\log N = A - B * \Delta\sigma; \Delta\sigma \geq \Delta\sigma_0$
Basquin (1910)	$\log N = A - B * \log \Delta\sigma; \Delta\sigma \geq \Delta\sigma_0$
Strohmeyer (1914)	$\log N = A - B * \log(\Delta\sigma - \Delta\sigma_0)$
Palmgren (1924)	$\log(N + D) = A - B * \log(\Delta\sigma - \Delta\sigma_0)$
Palmgren (1924)	$\log N = A - B * \log(\Delta\sigma - \Delta\sigma_0)$
Weibull (1949)	$\log(N + D) = A - B * \log((\Delta\sigma - \Delta\sigma_0)/(\Delta\sigma_{st} - \Delta\sigma_0))$
Stüssi (1955)	$\log N = A - B * \log((\Delta\sigma - \Delta\sigma_0)/(\Delta\sigma_{st} - \Delta\sigma))$
Bastenaire (1972)	$(\log N - B) * (\Delta\sigma - \Delta\sigma_0) = A * \exp[-C * (\Delta\sigma - \Delta\sigma_0)]$
Spindel-Haibach (1981)	$\log\left(\frac{N}{N_0}\right) = \frac{\lambda + \delta * (-\log(1 - \rho))^{1/\beta}}{\log(\Delta\sigma / \Delta\sigma_0)}$
Castillo et al. (1985)	$\log\left(\frac{N}{N_0}\right) = A * \log\left(\frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma_0}\right) - B * \log\left(\frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma_0}\right) + B\left\{\frac{1}{\alpha}\right\} * \log\left[1 + \left(\frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma_0}\right)^{-2\alpha}\right]$
Kohout and Vechet (2001)	$\log\left(\frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma_\infty}\right) = \log\frac{N + N_1}{N + N_2}$
Pascual e Meeker (1999)	$\log N = A - B * \log(\Delta\sigma - \Delta\sigma_0)$

As curvas de fadiga são traçadas como linhas retas quando a amplitude de tensão, $\Delta\sigma$, e a vida à fadiga, N_f , são expressas numa escala logarítmica, como ilustrado na Figura 2.5.

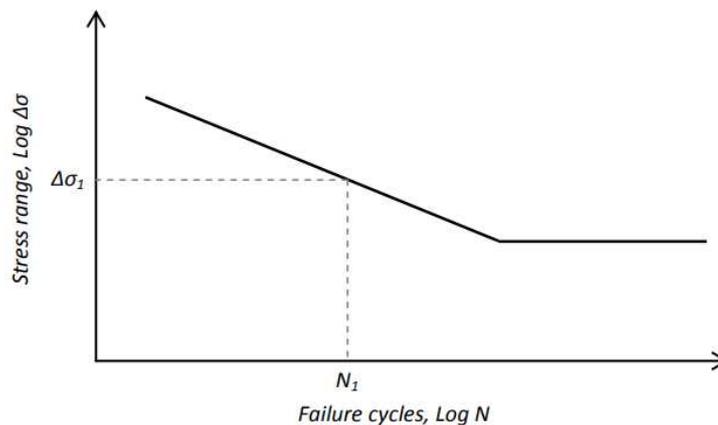


Figura 2.5 – Representação da curva S-N (Correia et al. 2014)

A amplitude de tensão, $\Delta\sigma$, corresponde a um valor da vida cíclica, N , sendo que pelo menos 15 provetes do material e/ou detalhe estrutural em estudo deve ser ensaiado para estabelecer a curva S-N representativa de aços, betão, plásticos, resinas, polímeros, compósitos etc.

Os códigos de projeto adotam a seguinte expressão proposta por Basquin para descreverem as curvas S-N de fadiga:

$$\Delta\sigma^m N_f = C \quad (2.2)$$

onde C e m são constantes dos materiais e/ou detalhes estruturais.

2.2. ADESIVOS ESTRUTURAIS

2.2.1. BREVE INTRODUÇÃO HISTÓRICA AOS ADESIVOS

A utilização de resinas remete para inúmeros séculos atrás apesar da sua verdadeira produção a nível industrial apenas estar datada há 300 anos. Dos primeiros adesivos utilizados sabe-se que a matéria-prima predominante eram plantas, minerais e substâncias de animais, sabendo que eram essencialmente utilizados por caçadores com objetivo de fabricação de setas através da união da seta à pena com cera de abelha, por egípcios para decoração de caixões através de pigmentação a partir de uma mistura entre cola e giz e por gregos na pintura de paredes recorrendo à mistura de giz, ocre de ferro e cobre com cal molhada (Miravalles, 2007).

Em 1910, iniciou-se a grande comercialização de adesivos estruturais com a introdução de resinas de fenol-formaldeído e colas de caseína. Posteriormente, surgiram no mercado adesivos à base de éster de celulose e grãos de soja como também a resina alquídica e o neoprene (Miravalles, 2007).

Em meados do século XIX, ocorreu um grande desenvolvimento desta área, assim, em 1930, comercializaram-se as primeiras fitas adesivas sensíveis à pressão como também adesivos de ureia-formaldeído sendo que, na época seguinte, surgiram as primeiras fitas acrílicas e as resinas fenólicas nitrílicas e de vinil. Na década de 50 e 60 emergiram as resinas epóxi, anaeróbicas e fenólicas.

Em 1970 houve uma evolução em termos de material acrílico, deste modo, surgiram as fitas acrílicas sensíveis à pressão e, por conseguinte, as resinas termo-endurecíveis. Entre o final do século XIX e início do século XX apostou-se em sistemas de curas UV e colagem a quente, resinas à base de silicone como também fitas adesivas VHB sensíveis à pressão (Miravalles, 2007).

Atualmente, com a emergência da indústria química e de polímeros sintéticos houve uma expansão enorme ao nível dos adesivos. Assim, estes podem ser classificados tendo em conta a sua cura, características químicas e aplicação estrutural ou não-estrutural.

2.2.2. CARACTERIZAÇÃO DE ADESIVOS ESTRUTURAIS

Um adesivo é definido como uma substância capaz de conter pelo menos duas superfícies permanentemente unidas e devido à sua importância em manter os materiais ligados é necessário ter um uso consciente do material sabendo as vantagens e desvantagens da sua utilização sendo que a qualidade de um adesivo é caracterizada pelo grau elevado de viscosidade sendo que a união requiere pouco tempo, alta durabilidade e em condições secas a união adquire elevadas propriedades de resistência.

Os adesivos estruturais podem ser classificados de inúmeras maneiras, normalmente, o critério utilizado é o que enfatiza as características com maior interesse, deste modo sugere-se a seguinte classificação (Hartshorn, 1986):

- Aspeto físico – pó, líquido, fita adesiva e pasta
- Composição química – epóxi, acrílico, fenólicos, ureia e poliuretanos

- Natureza dos aderentes – madeira, cerâmica, vidro e metal
- Condição de cura – temperatura ambiente, temperatura elevada, mistura anaeróbia e radiação
- Uso – construção

De acordo com a ASTM, a definição de adesivo estrutural é a seguinte: “agente de ligação usado para transferir cargas requeridas entre aderentes expostos a ambientes de serviço típicos para a estrutura envolvida”.

Relativamente às vantagens inerentes à utilização de adesivos estruturais são o facto de não necessitarem de altas temperaturas para a união, de puderem ser aplicados em qualquer tipo de superfície, tais como, metal com vidro, metal com plástico e cerâmica com cerâmica sendo que a integridade de todos os materiais presentes na ligação é garantida. É importante referir também que, usualmente, a processo de aplicação é simples e com um preço reduzido tendo propriedades de elevada resistência à corrosão, vazamento de gases e líquidos, funcionam como isoladores térmicos e elétricos e conferem elevada resistência à fadiga.

Por outro lado, as limitações associadas ao recurso a adesivos estruturais são o facto destes não poderem ser aplicados a elevadas temperaturas, visto que, com o aumento da temperatura a resistência da ligação diminuiu sendo que só podem ser aplicados no caso de uma superfície limpa e plana. Sabe-se também que, os adesivos requerem tempo para adquirirem as propriedades de resistências máximas apresentando um longo tempo de cura, a inspeção das ligações é complicada de ser efetuada e a sua vida útil é determinada pelas condições ambientais (Miravalles, 2007).

2.2.2.1. FADIGA EM LIGAÇÕES REALIZADAS POR ADESIVOS ESTRUTURAIS

As ligações efetuadas com recurso a adesivos têm uma grande variedade de aplicações, incluindo ligação entre materiais metálicos e entre material metálico e não-metálico. Assim, se a ligação entre metais ocorrer sob condições controladas é possível a obtenção de ligações com elevadas propriedades e durabilidade.

Para a realização de uma boa abordagem sobre as vantagens de utilização de adesivos em relação ao fenómeno de fadiga é necessário ter em conta que numa ligação rebitada o contacto entre as superfícies é efetuado em apenas certos pontos, deste modo, criará concentração de tensão. Mas, se a ligação foi contínua, realizada com recurso a adesivos, esse excesso concentração de tensão não irá ocorrer. Também é importante referir que, se não houver contacto entre as duas superfícies, devido ao facto da existência de um adesivo então este protege o material contra a corrosão.

De acordo com ensaios experimentais já efetuados, gráfico ilustrado na Figura 2.6, confirma-se que a solução de utilização de adesivos é preferível ao método de rebitagem sendo apresentadas curvas S-N que o comprovam (Schijve, 2004).

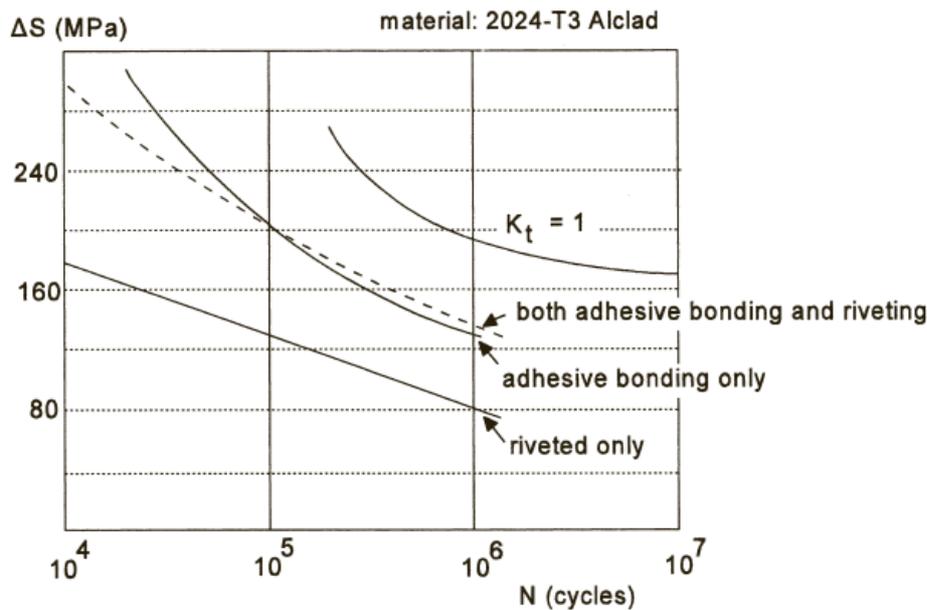


Figura 2.6. - Comparação de curvas S-N entre ligações rebitadas e ligações com resina (Schijve, 2004).

2.2.3. PARAFUSOS DE INJEÇÃO

2.2.3.1. BREVE HISTÓRIA DA UTILIZAÇÃO DE PARAFUSOS DE INJEÇÃO

Muitas falhas que ocorreram em pontes rebitadas antigas devem-se, essencialmente, aos seus problemas nas ligações. Normalmente, estas estruturas apresentam problemas de corrosão graves, deste modo, torna-se difícil a sua reparação através de soldadura de chapas de reforço. Uma forma possível seria a reparação dos rebites mas, devido ao facto da sua grande dificuldade de execução e da ausência de profissionais experientes na área torna-se num processo de difícil execução (Gresnigt et al, 2010). Assim, surge a possibilidade de reparação através de parafusos de injeção (Kortis, 2011).

As primeiras investigações levadas a cabo no “Stevin Laboratory”, Universidade Tecnológica de Delft (Holanda), sendo que os resultados obtidos foram publicados na Convenção Europeia de Construção em Aço, ECCS, contribuíram numa nova relação de confiabilidade. É de salientar também que a partir dos ensaios realizados à fadiga, desenvolvendo o estudo de Delft, comprova-se que a resistência à fadiga de ligações efetuadas através de parafusos de injeção é similar à resistência de ligações rebitadas e melhor do que ligações realizadas com parafusos não pré-esforçados como também de “fitted bolts”.

A primeira utilização de parafusos de injeção está datada de 1970, na Holanda, Figura 2.7, sabe-se que na época este método era utilizado, na reparação de pontes metálicas antigas rebitadas, essencialmente, de pontes ferroviárias, mas também, de novas estruturas e equipamentos (Nikolovski, 2009).



Figura 2.7. - Ponte rebitada em Roterdão onde foram aplicados parafusos de injeção (Nikolovski, 2009).

Em Portugal, a primeira aplicação de adesivos estruturais em ligações de estruturas metálicas ocorreu em 1980, numa ponte que se situa na Figueira da Foz, Figura 2.8, fazendo a travessia sobre o rio Mondego originalmente projetada pelo Engenheiro Edgar Cardoso. Apesar da técnica de aplicação não estar prevista no caderno de encargo foi proposta por uma empresa que procedeu a uma série de ensaios experimentais monotónicos com a obtenção de bons resultados. Segundo o autor Mattes, até ao ano de 2007, estes parafusos encontravam-se em serviço e cumpriam estruturalmente a função à qual foram dimensionados (Mattes, 2007).



Figura 2.8 – Ponte Edgar Cardoso

Seguiu-se a Alemanha em que a primeira aplicação ocorreu em 1996, com o Ministério de Tráfego do município Brandemburgo, que depois de analisar os bons resultados obtidos na Holanda, decidiu aplicar esta ligação na reparação da ponte em Oranienburg (Gresnigt et al, 2010), Figura 2.9. É de notar que, durante a sua aplicação as autoridades alemãs asseguraram a viabilidade desta nova técnica, isto é, a resistência à deformação de longa duração como também foram realizados ensaios à fluência.

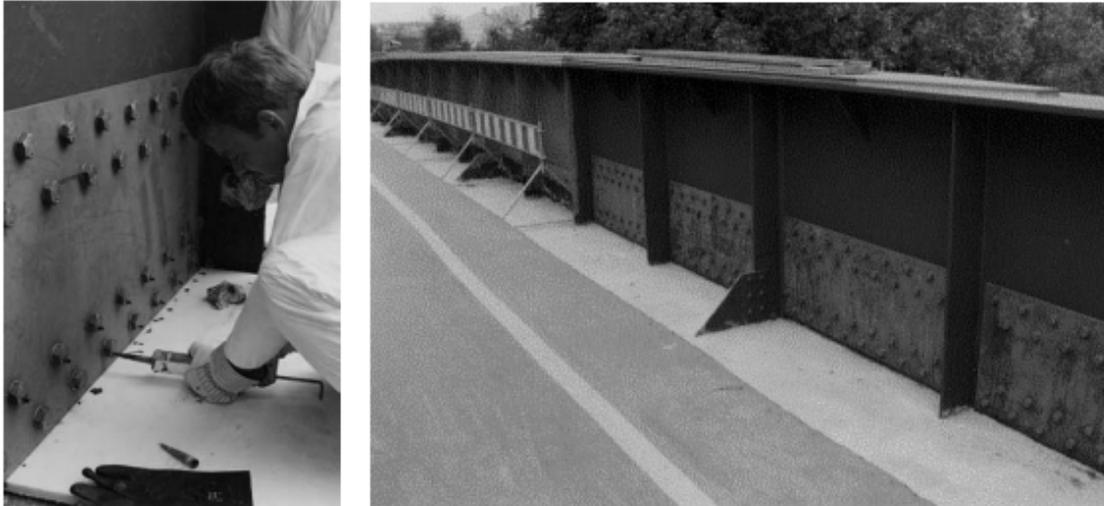


Figura 2.9 - Reparação da alma da viga principal através de parafusos de injeção numa ponte em Oranienburg, Alemanha (Gresnigt et al, 2010).

2.2.3.2. CARACTERIZAÇÃO DE PARAFUSOS DE INJEÇÃO

Quando é aplicado um adesivo estrutural em ligações é expectável que este reduza a concentração de tensões presente em redor dos furos contribuindo assim para a transferência de carga por uma maior área (Zarafi et al, 2016).

Os parafusos de injeção são instalados em orifícios que são 2 a 3 mm maiores que os diâmetros dos parafusos sendo que a cavidade entre o parafuso e a parede do furo tem de ser completamente preenchida com resina époxi de dois componentes. A injeção é efetuada através de um pequeno orifício na cabeça do parafuso e pode-se estar perante parafusos pré-esforçados, Figura 2.10 (Zarafi et al, 2016; Nikolovski, 2009).

A conexão do parafuso com o uso dos parafusos de injeção é assumida como sendo anti deslizante após a injeção e cura completa da resina. Deste modo, é possível aplicá-los em vez de rebites ou “fitted bolts”, especialmente em casos em que a tecnologia para conexão de rebites não está disponível ou a solução mais barata e simples é necessária (Kortis, 2011).

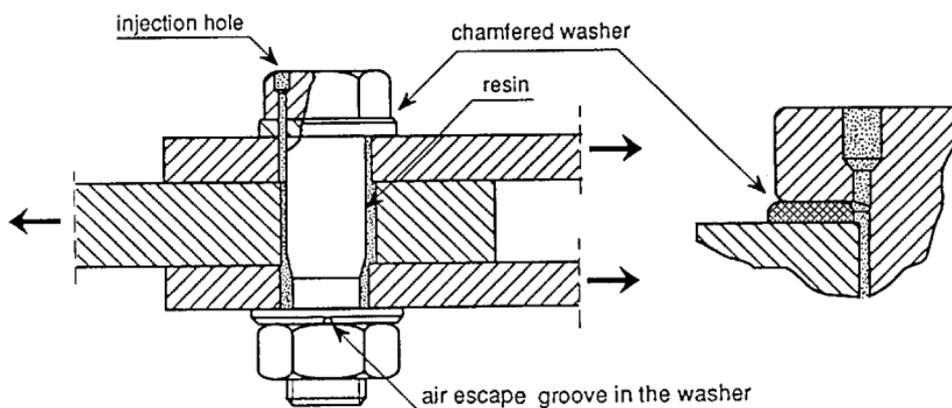


Figura 2.10. Corte transversal de um parafuso de injeção

Os benefícios associados à utilização destes parafusos em estruturas já existentes são os seguintes (Nikolovski, 2009):

- Aplicação em ligações com um fator de deslizamento reduzido.
- Boa capacidade de resistência a carregamentos dinâmico, isto é, o dimensionamento para carregamentos dinâmico é suficiente para substituir rebites defeituosos;
- Impede a ocorrência de corrosão interna, na medida em que a resina preenche completamente a cavidade que existe entre as paredes do furo e o parafuso.

Deste modo, para além das vantagens referidas anteriormente relacionadas com estruturas já existentes, também é necessário identificar os seus benefícios na aplicação de novas estruturas (Nikolovski, 2009):

- Boa capacidade de resistência aos carregamentos dinâmicos, isto é, com uma razoável relação entre as espessuras das chapas e o diâmetro do furo, o dimensionamento para carregamentos dinâmico está na mesma magnitude que a resistência ao escorregamento de parafusos de fricção de alta resistência;
- Impossibilidade de ocorrer deslizamento repentino das peças estruturais.
- Requisitos especiais no caso de estar perante parafusos de fricção de alta resistência para as superfícies de contato para obter o fator de escorregamento necessário ou se for necessária proteção contra a corrosão, a tinta a ser utilizada tem de cumprir o fator de deslizamento necessário.

Por outro lado, um dos principais problemas associados a este método de reparação, é o facto de não ser possível garantir a qualidade do cumprimento de todas as normas exigidas e não existem métodos aplicáveis para o verificar, ou seja, se os parafusos de injeção forem utilizados para substituir os rebites danificados, a sua presença na ligação pode mudar o carregamento dos rebites existentes (Gresnigt, 2010).

2.2.4. CASOS DE ESTUDO PARA APLICAÇÕES DE ADESIVOS EM ESTRUTURAS DE ENGENHARIA CIVIL

2.2.4.1. COLOCAÇÃO DE RESINA ÉPOXI ENTRE PLACAS APARAFUSADAS

Um adesivo é aplicado sobre a superfície da placa, a fim de prolongar a vida de fadiga e aumentar a resistência estática de ligações aparafusadas, espera-se que o mesmo ajude a distribuir e transferir a carga sobre uma grande área, reduzindo assim as concentrações de tensão. A aplicação bem-sucedida da tecnologia de colagem requer uma seleção cuidadosa do adesivo para o ambiente de serviço pretendido (Albrecht et al, 1984).

Os ensaios experimentais de fadiga realizados por Albrecht, em 1984, onde foram testados dois tipos de provetes, sendo que estes se diferenciavam no número de furos e na geometria da placa como pode ser observado na Figura 2.11.

Deste modo, os parafusos foram tencionados com 84.5 kN sendo que o adesivo escolhido para a realização dos ensaios experimentais foi Versilok 201, acrílico, na medida em que comparado com adesivos estruturais este apresentar mais resistência à tração e ao corte com um menor tempo de cura (Albrecht et al, 1984).

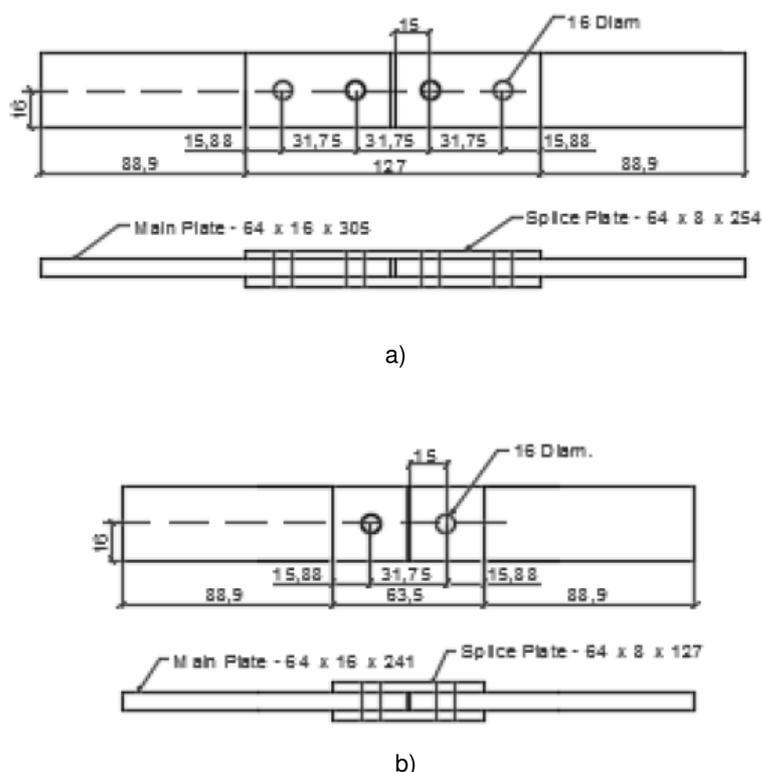


Figura 2.11. - Geometria dos provetes: a) provetes com dois parafusos; b) provete com um parafuso (dimensões em mm)

As curvas S-N obtidas através dos ensaios realizados à fadiga demonstram que para provetes com dois parafusos, a média da curva S-N de placas com ligação realizada através de resina apresenta melhores resultados do que comparada com a média da curva S-N sem resina, como se pode observar na Figura 2.12. Por outro lado, relativamente aos ensaios efetuados em provetes com um parafuso, obteve-se resultados com baixa qualidade, isto é, não se comprova que há um benefício claro na

utilização da resina e, ainda que, para fadiga de baixo ciclo reduz a resistência à fadiga, de acordo com a Figura 2.13.

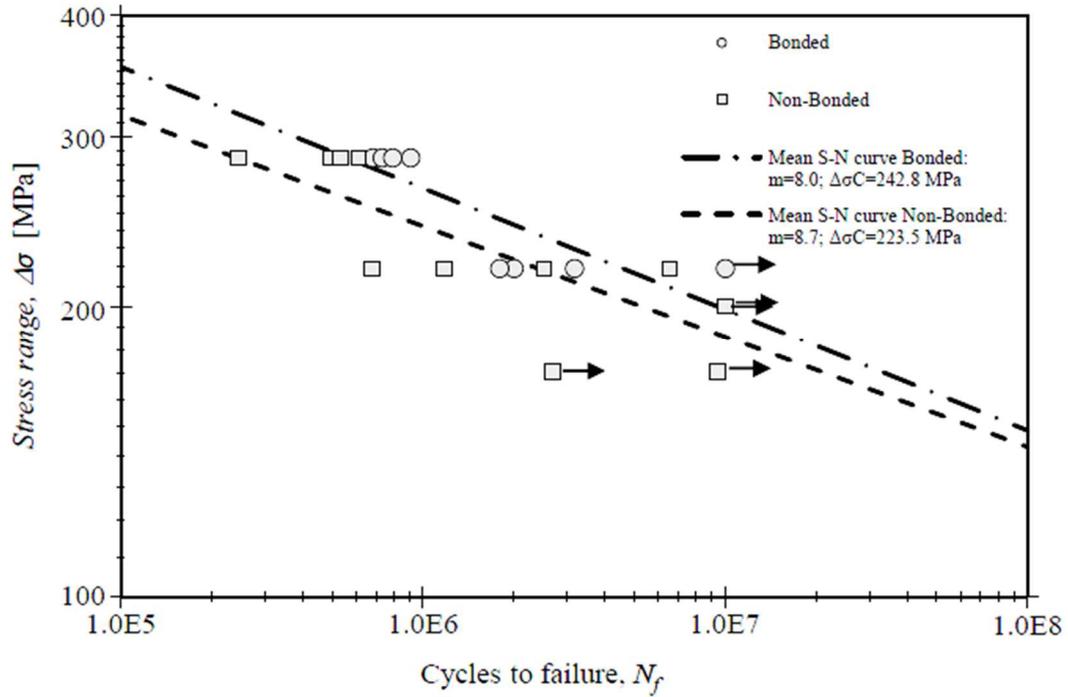


Figura 2.12. - Resultados obtidos para provete com dois parafusos

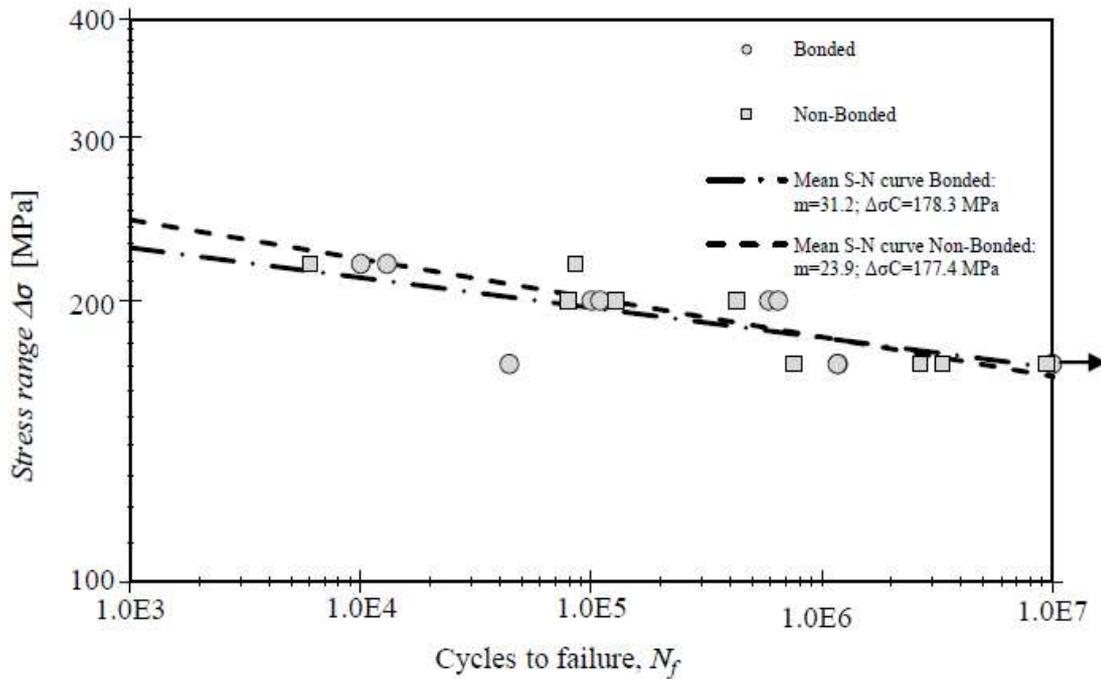


Figura 2.13. - Resultados obtidos para provete com um parafuso

Os autores Pedrosa (Pedrosa, 2016) e Correia *et al.* (2017) usaram os resultados dos ensaios de fadiga de ligações estudadas por Albrecht *et al.* (Albrecht *et al.*, 1984) e efetuaram um estudo estatístico com o objetivo de obter as curvas S-N de projeto para essas ligações. Estes autores concluíram que a curva S-N de projeto das ligações adesivas aumenta a vida de fadiga quando dois parafusos estão presentes, mas se o número de parafusos for reduzido, ocorre uma redução na vida de fadiga e não pode ser recuperada pela ligação.

2.2.4.2. PARAFUSOS COM INJEÇÃO DE RESINA EM PONTE METÁLICA ANTIGA

Os ensaios experimentais realizados por Jesus *et al.* (Jesus *et al.*, 2010) consistem na comparação de ensaios à fadiga de ligações simplesmente aparafusadas e de ligações com parafusos de injeção realizados com material proveniente de pontes metálicas antigas. Deste modo, foram testados dois tipos de geometrias de provetes, sendo um primeiro extraído da ponte rodoviária rebitada de Fão e um segundo da ponte ferroviária rebitada de Trezoi, como é ilustrado na Figura 2.14.

Os parafusos, onde foi aplicado um momento de 80 N.m em todos os provetes, porcas e arruelas, foram adaptados para permitir a injeção de resina para preencher a folga radial de 1 mm entre os parafusos e as placas, sendo que a resina utilizada para a realização dos ensaios foi a Sikadur-30, resina épxi, com um tempo de cura necessário de 8 dias. (Jesus *et al.*, 2010; Correia *et al.*, 2016).

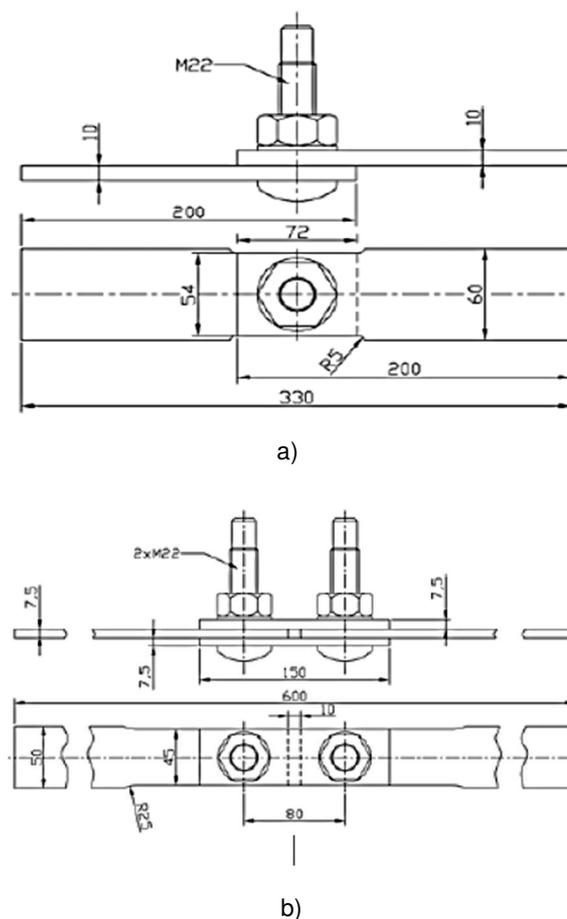


Figura 2.14. - Geometria dos provetes: a) provetes com ligação de corte simples; b) provete com ligação de corte duplo (dimensões em mm)

Os resultados obtidos para ligações de corte simples e duplo podem ser observados na Figura 2.15 e na Figura 2.16, respectivamente, onde se incluiu a média das curvas S-N, exceto para ligações duplas com parafusos de injeção, na medida em que, para ligações de corte duplo com parafusos de injeção apenas foi testado para um nível de tensões.

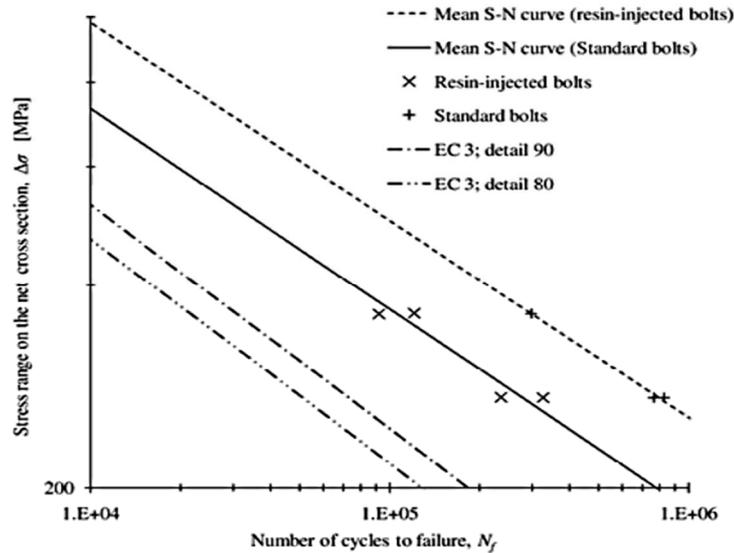


Figura 2.15 – Comparação da Curva S-N média para ligações simples de material proveniente da ponte de Trezói

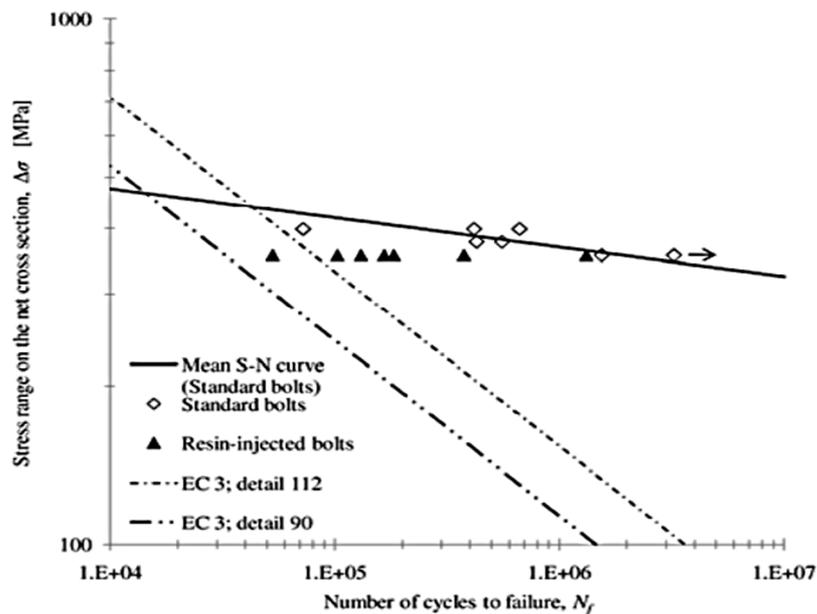


Figura 2.16 – Comparação da Curva S-N média para ligações duplas de material proveniente da ponte de Fão

Uma das explicações que o autor propõe está relacionada com o pré-esforço sendo que o mesmo afirma que as hipóteses apresentadas deverão ser sempre verificadas, posteriormente, por simulações numéricas. O pré-esforço reduz a concentração de tensão à volta dos furos e, deste modo, aumenta a resistência à fadiga, sendo que para elevadas amplitudes de tensão, responsável por deformações plásticas localizadas, o pré-esforço inicial nos parafusos poderá aumentar.

Deste modo, as tensões de contacto de compressão entre o parafuso e o furo aumentam a espessura das chapas devido ao efeito de Poisson, como também, a tensão de aperto dos parafusos sabendo que as maiores tensões de compressão ocorrem nas ligações simplesmente aparafusados. Por outro lado, a injeção de resina produz uma redistribuição de tensões à volta dos furos reduzindo a magnitude das tensões de compressão e de aperto.

Em suma, segundo os ensaios realizados pelo autor, a utilização de parafusos de injeção provoca uma redução na resistência à fadiga o que leva a alguma preocupação, na medida em que, é um método a que se recorre para a reabilitação de estruturas metálicas antigas.

2.2.4.3. LIGAÇÕES APARAFUSADAS COM INJEÇÃO DE RESINA: JUNTAS COM FRP NA ENGENHARIA DE PONTES

As investigações laboratoriais realizadas por Jawed Qureshix englobam testes estáticos que incidem em ligações com parafusos de injeção com material FRP pultrudado sendo o principal objetivo caracterizar um método de ligação que pode ter resistência à fadiga como também ao escorregamento. Para comparação, os testes também são realizados em ligações com parafusos normalizados sem resina e com furos de folga de 2 mm sendo que os provetes utilizados para a sua execução se encontram na Figura 2.17 com as respetivas dimensões (Qureshi and Mottram, 2012).

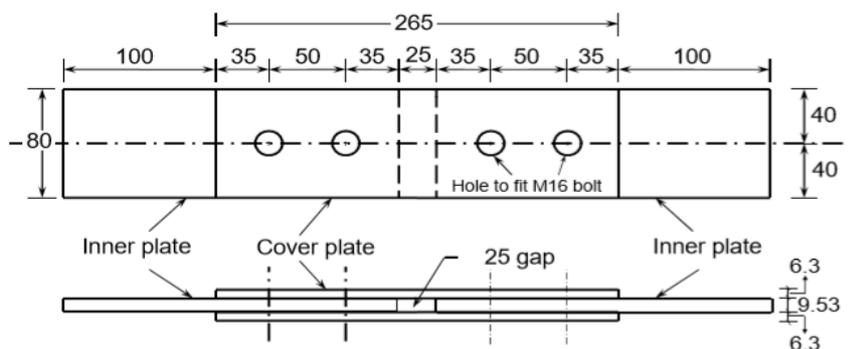


Figura 2.17. – Geometria do provete com ligação de corte duplo (dimensões em mm)

Os resultados experimentais são apresentados tendo em conta 4 diferentes ensaios sendo estes:

- Ensaio 1: sem resina com espaço entre o parafuso e o orifício do mesmo (provetes com parafusos M16, diâmetro do furo de 18 mm e sem injeção de resina);
- Ensaio 2: sem resina e sem espaço entre o parafuso e o orifício do mesmo (provetes com parafusos M16, diâmetro do furo de 16 mm e sem injeção de resina);
- Ensaio 3: injeção de resina RenGel SW404+HY2404 (provetes com parafusos M16, diâmetro do furo de 18 mm e com injeção de resina);
- Ensaio 4: injeção de resina Sikadur-30 (provetes com parafusos M16, diâmetro do furo de 18 mm e com injeção de resina).

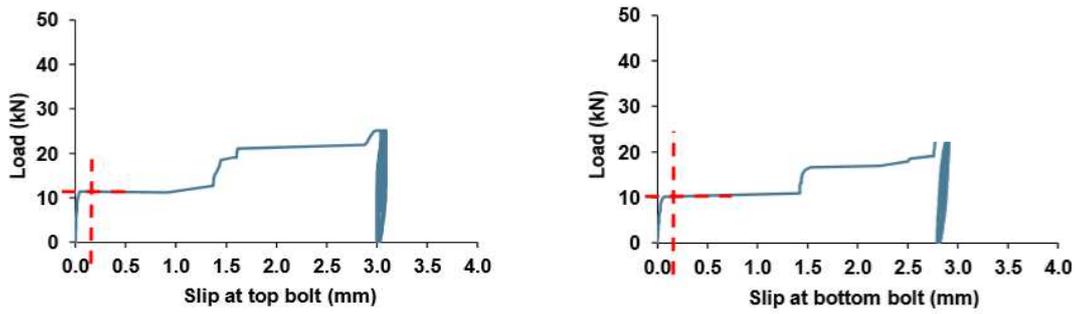


Figura 2.18. – Resultados experimentais da realização do Ensaio 1

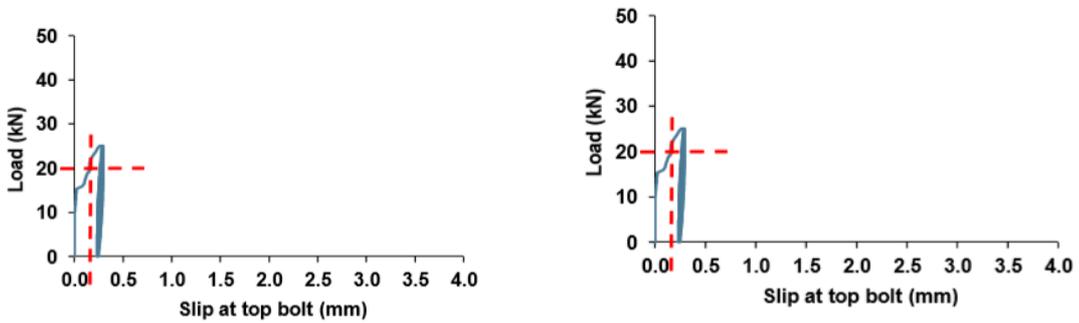


Figura 2.19. – Resultados experimentais da realização do Ensaio 2

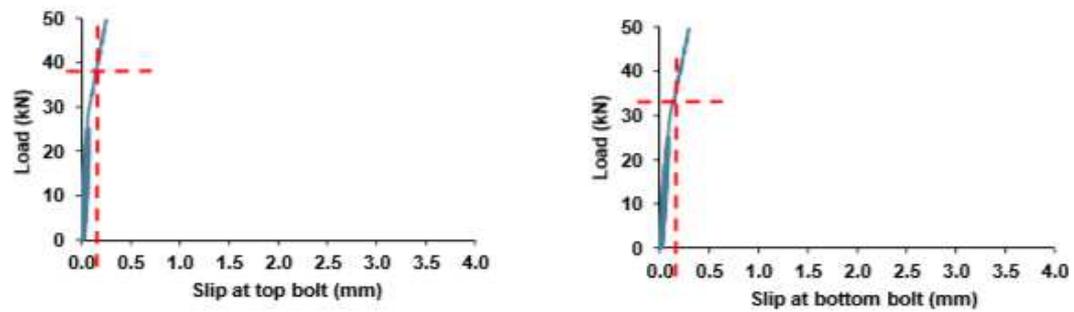


Figura 2.20. – Resultados experimentais da realização do Ensaio 3

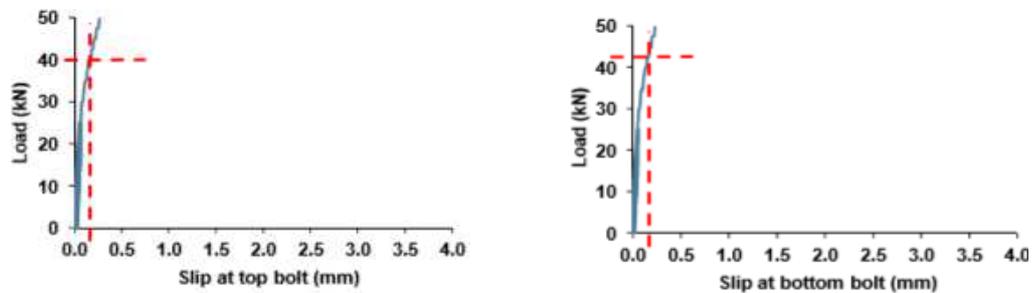


Figura 2.21. – Resultados experimentais da realização do Ensaio 4

De acordo com os resultados obtidos conclui-se então que nos parafusos sem injeção de resina com um espaço entre o parafuso e o furo de 2 mm ocorre um escorregamento rápido após se atingir um determinado nível de carga, Figura 2.18. Relativamente aos provetes em que não há injeção de resina nem uma abertura entre o furo e o parafuso e através da Figura 2.19 é possível observar que o valor da carga mais elevada.

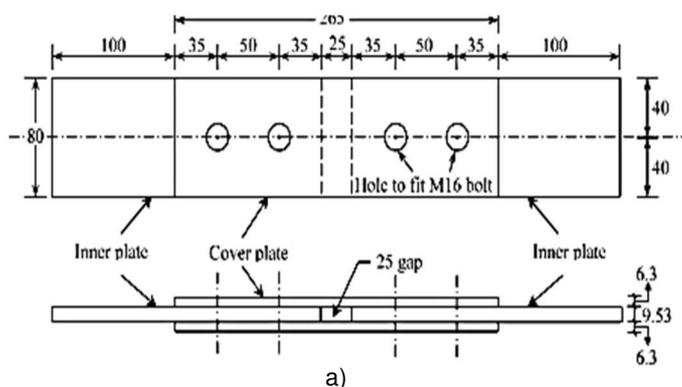
Por outro lado, a partir dos ensaios efetuados com resina o provete em que se colocou RenGel SW404+HY2404, a força de tração foi aumentada para além de um limite de 25 kN para que pudesse gerar um deslizamento superior a 0,15 mm. Assim, apresentou níveis de carga de 39 kN e 33 kN no parafuso superior e inferior, respetivamente, Figura 2.20. Similarmente, no provete em que se colocou Sikadur-30 este apresentou cargas de 40 kN e 42 kN no parafuso superior e inferior, respetivamente, Figura 2.21.

Em suma, os resultados dos testes estáticos mostram que os parafusos de injeção podem oferecer ligações resistente para a utilização de FRP na Engenharia de Pontes sendo que os autores acreditam que a ligação através de parafusos de injeção é preferível aos “fitted bolts”, sendo que, ainda será necessário classificar o seu comportamento à fadiga.

2.2.4.4. PARAFUSOS COM INJEÇÃO DE RESINA COM PLACAS DE FRP

De acordo com as investigações efetuadas por Zafari, em 2016, com o objetivo de determinar o comportamento estático e à fadiga de parafusos com injeção de resina com FRP. Foram testados dois tipos de provetes sendo um primeiro com parafusos M16 com um espaçamento entre o furo e o parafuso de 2mm e um segundo M20 com um espaçamento de 2.4 mm sabendo que estes dois se tratam de ligações efetuadas por corte duplo com dois parafusos alinhados com a aplicação da carga axial, como a Figura 2.22 indica (Zarafi et al., 2016).

Os parafusos que se encontravam nos provetes do tipo 1 foram submetidos a um momento de 80 N.m e por outro lado, nos provetes do tipo 2 o momento aplicado foi de 88 N.m e a resina estrutural que foi selecionada foi a Sikadur-30 sendo que a RenGel SW404, com boas características químicas e endurecimento rápido, foi utilizada em alguns dos provetes.



3

TÉCNICAS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo são referenciadas e descritas as técnicas, bem como, os procedimentos experimentais usados na caracterização do comportamento monotónico/estático e à fadiga de resinas estruturais.

Deste modo, o capítulo está dividido em três grandes temas, sendo que, o primeiro incide na identificação dos materiais utilizados neste estudo (SIKADUR 30 e 52), isto é, a caracterização das resinas tendo em conta as informações disponíveis nas fichas técnicas do fabricante (SIKA), bem como, a preparação dos moldes em alumínio usados para fabricação dos provetes. O segundo tema está relacionado com o programa experimental dos ensaios monotónicos, em que o principal objetivo é a obtenção de propriedades mecânicas, tais como, o módulo de elasticidade, E , e coeficiente de Poisson, ν , resistência à tração, compressão e flexão. Finalmente, é apresentado o programa experimental para os ensaios à fadiga das resinas estruturais em estudo, referindo as normas usadas, bem como, os procedimentos experimentais propostos.

Devido ao elevado número de ensaios a efetuar e à indisponibilidade de utilização da máquina de ensaios do Laboratório de Ótica e Mecânica Experimental, LOME, foi necessário recorrer, ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra para efetuar a moldagem e descofragem dos provetes necessários para os ensaios, de resina Sikadur-52 e Sikadur-30, ao laboratório de ensaios mecânicos da UTAD para a realização de todos os ensaios monotónicos usando a correlação digital de imagem (CDI) e os ensaios experimentais à fadiga da resina Sikadur-30 e por fim, ao Laboratório de Resistência de Materiais da Universidade de Oviedo (Espanha), para a realização dos restantes ensaios de fadiga da resina Sikadur-52.

Para a realização dos ensaios experimentais, com objetivo de caracterizar as resinas estruturais em estudo, foram usadas as seguintes normas de ensaios:

- Norma de ensaios de tração – ASTM D638 Standard;
- Norma de ensaios de compressão – ASTM D695 Standard;
- Normas de ensaios de flexão – ASTM D790 Standard;
- Norma de ensaios de fadiga – ASTM D7791 – 12 Standard.

3.2. MATERIAIS

Para que as normas de ensaios possam ser aplicadas, foi necessário fabricar moldes com diferentes geometrias tendo em consideração as indicações sugeridas pelas normas para desse extrair os provetes indispensáveis à realização do programa experimental proposto.

3.2.1. RESINA SIKADUR-52®

A resina Sikadur-52® Injection é um fluido de baixa viscosidade para injeção, à base de resinas epóxi de elevadas resistências, com elevadas propriedades mecânicas como também de aderência. É, normalmente, utilizada como enchimento e selagem de cavidades em pontes e em elementos estruturais e também como uma barreira eficaz contra a infiltração de água e corrosão.

Uma das vantagens da utilização da resina indicada é o facto de poder ser utilizada sobre superfícies secas ou húmidas, mas, por outro lado, não é possível a sua utilização na presença de água tendo uma elevada capacidade de penetração.

Para a utilização correta da mesma é necessário a mistura de um componente A, com uma cor transparente, e um componente B, com uma cor acastanhada sendo a relação entre os mesmos de 2:1 (partes em peso ou em volume). Após a sua correta mistura a resina adquire um aspeto amarelo acastanhado.

Segundo a ficha de descrição do produto, a resina Sikadur-52® possui um coeficiente de expansão térmica de aproximadamente 9.4×10^{-6} por °C, de -20 °C a +40 °C, uma massa volúmica de aproximadamente 1,1 kg/dm³ a +20 °C sendo que apresenta ainda as características apresentadas nas Tabelas 3.1 e 3.2:

Tabela 3.1 – Viscosidade da resina Sikadur-52® a diferentes temperaturas

Temperatura	+20 °C Aprox.	+30 °C Aprox.	+40 °C Aprox.
Viscosidade (mPa.s)	330	150	95

Tabela 3.2 – Propriedades da resina Sikadur-52® após 7 dias a +23 °C

Propriedades mecânicas	Resistência à compressão (N/mm ²)	Resistência à flexão (N/mm ²)	Resistência à tração (N/mm ²)	Tensão de aderência (N/mm ²)	Módulo de elasticidade (N/mm ²)
Após 7 dias a +23 °C	34	41	24	>4	1100

3.2.2. RESINA SIKADUR-30®

A resina Sikadur®-30 é uma argamassa tixotrópica, adesiva, em dois componentes, baseada numa combinação de resinas epóxi e cargas especiais que não contêm solventes. Usualmente recorre-se a este tipo de resina para colagem de elementos de reforço estrutural, tais como, ligação de chapas de aço a betão.

As vantagens associadas a utilização desta resina é o facto da sua fácil mistura e aplicação, elevadas resistências mecânicas iniciais e finais, muito boa aderência a diversos materiais, tais como o aço, e é impermeável a líquidos como também ao vapor de água.

Sabendo que a resina sikadur-30 se trata de uma combinação entre dois componentes é, deste modo, necessário a mistura de um componente A, com uma cor branca, e um componente B, com uma cor preto, sendo que a relação entre os mesmos é de 3:1 (partes em peso ou em volume) respetivamente. Assim, após uma correta mistura esta adquire um aspeto cinzento claro.

De acordo com a ficha de produto disponibilizada pela empresa Sika, sabe-se que a resina apresenta um módulo de elasticidade, E , à compressão de 9600 N/mm^2 e à tração de 11200 N/mm^2 a $+23^\circ\text{C}$, uma massa volúmica de aproximadamente 1.65 kg/dm^3 e coeficiente de expansão de $2.5 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$, sendo que apresenta ainda as propriedades mecânicas indicadas nas Tabelas 3.3, 3.4 e 3.5.

Tabela 3.3 – Resistência à compressão da resina Sikadur-30®

Tempo de cura	Temperatura de cura	
	+ 10 °C	+ 35 °C
12 horas	-	80 - 90 N/mm ³
1 dia	50 - 60 N/mm ³	85 - 95 N/mm ³
3 dias	65 - 75 N/mm ³	85 - 95 N/mm ³
7 dias	70 - 80 N/mm ³	85 - 95 N/mm ³

Tabela 3.4 – Resistência à tração da resina Sikadur-30®

Tempo de cura	Temperatura de cura	
	+ 10 °C	+ 35 °C
1 dia	18 - 21 N/mm ²	23 - 28 N/mm ²
3 dias	21 - 24 N/mm ²	25 - 30 N/mm ²
7 dias	24 - 27 N/mm ²	26 - 31 N/mm ²

Tabela 3.5 – Resistência ao corte da resina Sikadur-30®

Tempo de cura	Temperatura de cura	
	+ 10 °C	+ 35 °C
1 dia	3 - 5 N/mm ²	15 - 18 N/mm ²
3 dias	13 - 16 N/mm ²	16 - 19 N/mm ²
7 dias	14 - 17 N/mm ²	16 - 19 N/mm ²

3.2.3. MOLDES PARA OBTENÇÃO DE PROVETES

3.2.3.1. FABRICAÇÃO DOS MOLDES

Para a obtenção dos provetes a serem ensaiados foram efetuadas plantas dos moldes necessários com recurso ao programa da empresa Autodesk® denominado por Autocad® e posteriormente analisados de acordo com o material escolhido.

Deste modo, devido principalmente a fatores económicos, decidiu-se efetuar três diferentes tipos de moldes tendo em conta as diversas dimensões dos provetes a testar. Cada um dos moldes é constituído por duas chapas metálicas em alumínio sobrepostas com um sistema de aperto com parafusos M6 entre as mesmas para facilitar a retirada dos provetes sem que estes fiquem danificados.

Nos diversos moldes a chapa que se encontra colocada na posição inferior tem sempre uma espessura de 15 mm para que seja possível obter uma base estável, facilitar o sistema de aperto e, também devido ao facto das espessuras das chapas serem parametrizadas tornando mais fácil a obtenção desta dimensão. Por outro lado, a que é colocada sobreposta a esta pode variar entre 5 e 15 mm tendo em conta as dimensões dos provetes referentes a cada ensaio.

Para melhor esclarecimento sobre os moldes utilizados e o seu processamento, apresenta-se na Tabela 3.6 as dimensões das chapas metálicas e nas Figuras 3.1, 3.3 e 3.5 as plantas realizadas e nas Figuras 3.2, 3.4 e 3.6 os projetos 3D executados, a preparação e a realização dos moldes tendo em conta os ensaios a realizar.

Tabela 3.6 – Dimensões dos moldes relativos aos ensaios indicados

Nº de moldes	Norma ASTM	Ensaio	Dimensões do molde (mm ²)	Espessura Total (mm)
2	D695	Compressão	135 x 50	30 (15+15)
2	D790	Flexão	123,5 x 147	20 (5+15)
6	D7791-12/ D638	Fadiga/ Tração	155 x 185	20 (5+15)

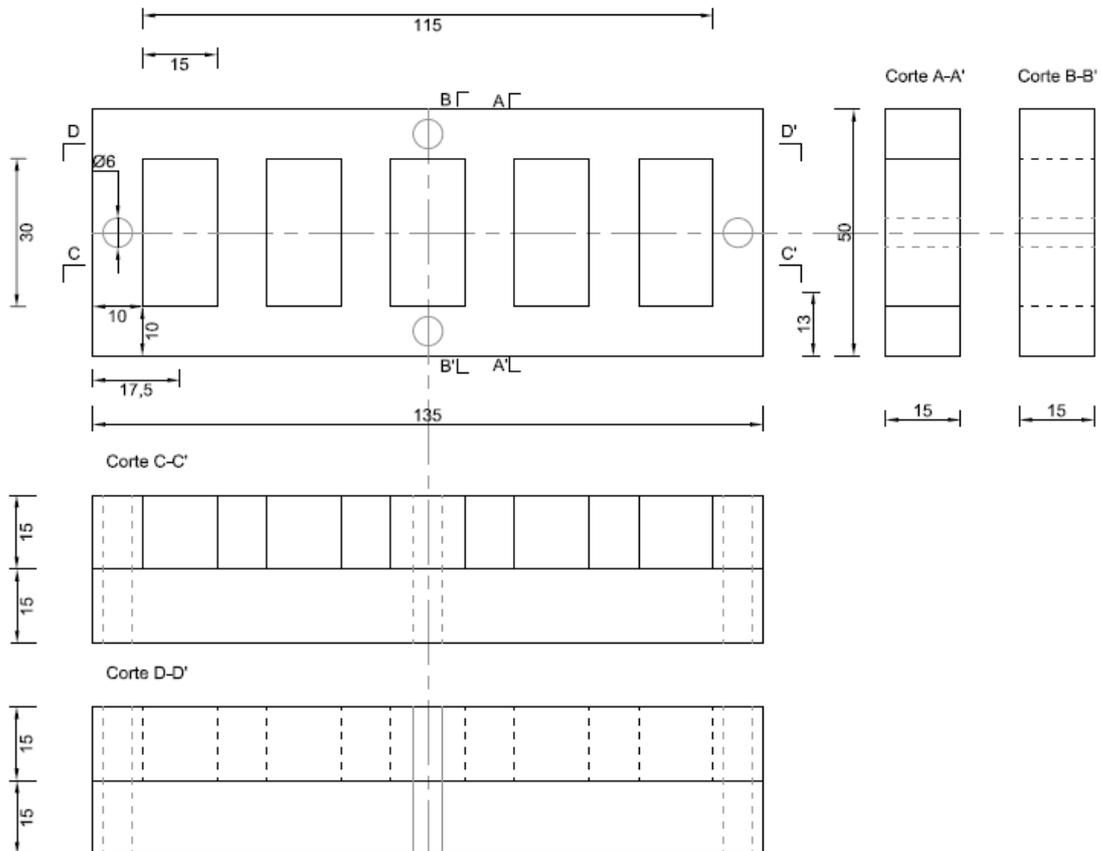


Figura 3.1 – Planta e respetivos cortes do molde a ser usado na fabricação dos provetes de compressão de acordo com a norma ASTM D695



Figura 3.2 – Projeto em 3D do molde a ser usado na fabricação dos provetes de compressão segundo a norma ASTM D695

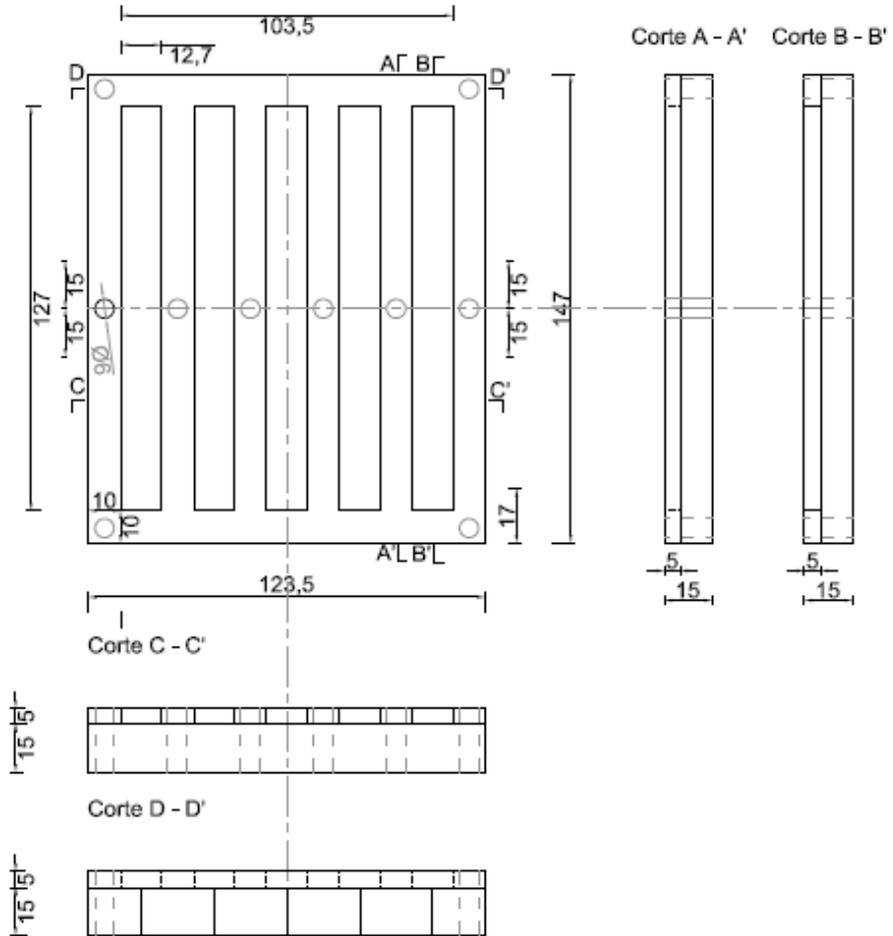


Figura 3.3 – Planta e respectivos cortes do molde a ser usado na fabricação dos provetes de flexão segundo a norma ASTM D790



Figura 3.4 – Projeto em 3D do molde a ser usado na fabricação dos provetes de flexão segundo a norma ASTM D790

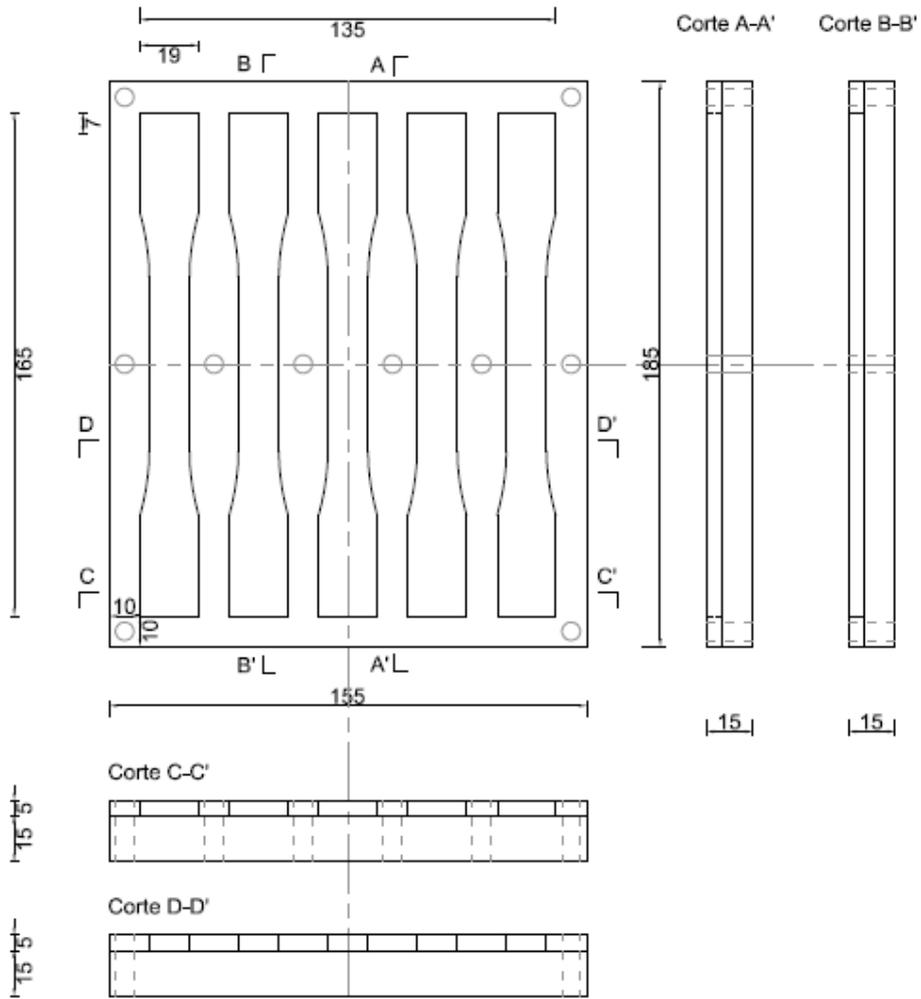


Figura 3.5 – Planta e respetivos cortes do molde a ser usado na fabricação dos provetes de tração e fadiga, segundo as normas ASTM D638 e ASTM D7791



Figura 3.6 – Projeto em 3D do molde a ser usado na fabricação dos provetes de tração e fadiga segundo as normas ASTM D638 e ASTM D7791-12

3.2.3.2. PREPARAÇÃO DOS MOLDES PARA OBTENÇÃO DE PROVETES

Com vista à utilização dos moldes efetuados sem quaisquer impurezas é necessário ter em atenção a aplicação de 3 produtos diferentes relativos à limpeza e secagem dos moldes e, por fim, um desmoldante para facilitar a retirada dos provetes.

É importante referir que em todos estes processos é necessária a utilização de equipamento de proteção, tais como luvas e máscaras, devido à agressividade e perigosidade dos produtos em contacto com a pele sendo que estes são aplicados através de um pano.

Assim, a limpeza do molde é efetuada através do produto Loctite Frekote PMC™, em que a sua principal função é dissolver e remover resíduos sem danificar a superfície dos mesmos sendo que é essencial um tempo de espera de pelo menos 15 minutos após a sua aplicação. Deste modo, após a colocação do produto relativo à limpeza, inicia-se o processo relacionado com a secagem do molde com Loctite Frekote B-15™ com função de vedante para moldes metálicos com problemas de microporosidade, pequenos arranhões superficiais ou imperfeições, sendo que neste caso, é necessário um tempo de cura de pelo menos 30 minutos.

Por fim, é aplicado o Loctite Frekote 770-NC™ sabendo que funciona como um agente de libertação de moldes epóxi proporcionando um alto deslizamento. Após a aplicação deste último produto os moldes devem ser selados e podem ser utilizados num prazo de 2 semanas.

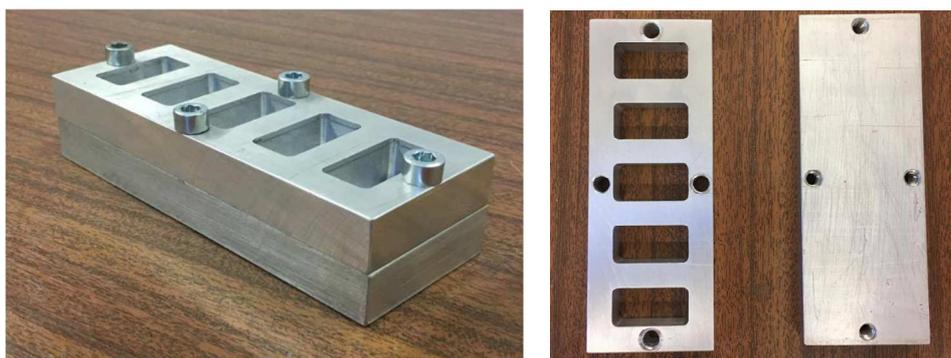


Figura 3.7 – Fotografia dos moldes a utilizar na fabricação dos provetes de compressão segundo a norma ASTM D695



Figura 3.8 – Fotografia dos moldes a utilizar na fabricação dos provetes de flexão segundo a norma ASTM D790



Figura 3.9 – Fotografia dos moldes a utilizar na fabricação dos provetes de tração e fadiga segundo as normas ASTM D638 e ASTM D7791-12

3.2.3.3. OBTENÇÃO DE PROVETES SIKASUR-52®

Pela análise da ficha de produto da resina Sikadur-52®, sabe-se que esta é constituída por dois componentes em que há uma relação de 2:1 entre eles, componente A e componente B respetivamente, Figura 3.10 a). É importante referir que, as quantidades necessárias foram pesadas numa balança digital e foi utilizado equipamento de proteção durante o processo. Assim, numa primeira fase, para a obtenção de provetes destinados a ensaios monotónicos misturaram-se aproximadamente 233,3 gr do componente A e aproximadamente 116.67 gr do componente B, perfazendo um total de 350 gr, por cerca de 3 minutos, Figura 3.10 b).



a)



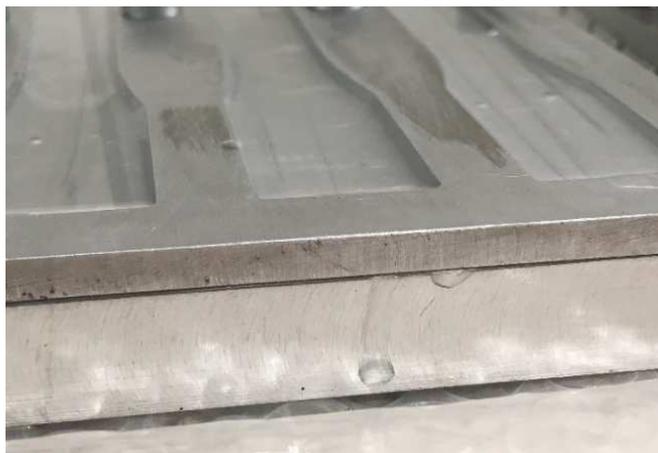
b)

Figura 3.10 – Mistura dos componentes de resina Sikadur-52®: a) Identificação dos dois componentes; b) Pesagem dos componentes

Por conseguinte, com recurso a uma seringa, na medida em que se trata de uma mistura fluida, colocou-se a resina, com todo o cuidado, nos moldes, Figura 3.11 a). Após a colocação de toda a resina foi notória alguma perda da mesma por entre as duas chapas que constituem cada molde, Figura 3.11 b), e, deste modo, foi necessário a mistura de novas quantidades, isto é, 15 gr do componente A e 7.5 gr do componente B, para que os provetes tivessem as espessuras requeridas e para que não ocorresse novamente perda de resina os moldes foram selados com fita adesiva.



a)



b)

Figura 3.11 – Obtenção dos provetes Sikadur-52®: a) Colocação da resina nos moldes através de uma seringa; b) pormenor da perda de resina pelas chapas metálicas dos moldes

Para a descofragem dos provetes foi necessário um tempo de cura de, pelo menos de 7 dias, e, para tal, desapertam-se os parafusos presentes nos moldes com o objetivo de soltar as duas chapas facilitando a retirada dos provetes e estando assim protegidos de qualquer dano relativo à sua descofragem. Por conseguinte, com recurso a uma lixa é necessário criar uma superfície completamente lisa resultando assim em algumas variações nas seções dos provetes.

Os provetes em forma prismática têm dimensões bastante variáveis devido a problemas de completa selagem do molde, problema identificado anteriormente. O mesmo aconteceu para os provetes dog-bone “em forma de osso de cão”, sendo que neste caso perderam-se dois provetes.

3.2.3.4. OBTENÇÃO DE PROVETES SIKASUR-30®

De acordo com as informações disponibilizadas sobre o produto sabe-se que é necessária uma mistura de um componente A e um componente B existindo uma relação de 3:1 partes em peso, respetivamente. Assim, como foi referido no subcapítulo anterior, para a obtenção das quantidades corretas recorre-se a uma balança digital. É de referir que durante todo o processo de mistura, efetuado de acordo com o indicado pela ficha de produto, foi utilizado equipamento de proteção devido à perigosidade e agressividade do produto em contacto com a pele.

Deste modo, com o objetivo de obter provetes destinados a ensaios monotónicos como também à fadiga, misturam-se cerca de 375 gr do componente A e adiciona-se a este 125 gr de um componente B, resultando um total de 500 gr de resina sikadur-30, processo identificado na figura 3.12.



a)



b)

Figura 3.12 – Mistura dos componentes de resina Sikadur-30®: a) Identificação dos dois componentes; b) Pesagem dos componentes

Assim, como se trata de uma resina com pouca fluidez, a sua colocação nos moldes foi efetuada com recurso a uma espátula e devido à dificuldade na colocação da resina sem perdas foi necessário efetuar uma nova mistura com as mesmas quantidades utilizadas na primeira fase. Como foi referido anteriormente, todos os moldes foram selados com fita-cola para prevenir a perda de resina entre as chapas que constituem os moldes.



a)



b)

Figura 3.13 – Obtenção dos provetes Sikadur-30®: a) selagem dos moldes com fita-adesiva; b) colocação da resina nos moldes através de uma espátula

O sistema de descofragem dos provetes é igual ao utilizado para a obtenção de provetes de Sikadur-52®, na medida em que os moldes utilizados são equivalentes. Neste caso, o tempo de cura mantém-se o mesmo do referido anteriormente, 7 dias, a uma temperatura ambiente e também é necessário lixar cada um dos provetes para obter uma superfície completamente plana.

No processo de descofragem houve alguma dificuldade na retirada dos provetes visto que se trata de uma resina que ao endurecer torna-se muito rígida. Assim, alguns dos provetes partiram e outros aparentam algumas fraturas, deste modo 3 destes foram adaptados, isto é, os provetes com forma em barra e seção retangular foram cortados na área de fratura para que adquirirem-se novas dimensões, e os restantes não foram possíveis de serem aproveitados.

Para a correta execução dos ensaios experimentais à tração e fadiga, segundo as normas ASTM D638 e ASTM D7791-12, respetivamente, foi necessário colocar placas de acrílico com alguma rugosidade nas amarras dos provetes dog-bone “em forma de osso de cão” para que aquando da aplicação do carregamento não ocorra deslizamento entre a amarra do atuador e o provete. O reforço nas amarras dos provetes pode ser observado na Figura 3.14.



Figura 3.14 – Aplicação de chapas acrílicas na zona de amarração dos provetes

3.3. ENSAIOS MONOTÓNICOS

3.3.1. ENSAIOS DE TRAÇÃO

Este ensaio experimental será efetuado segundo a norma ASTM D638 e tem como principal objetivo a determinação de propriedades de tração de plásticos reforçados e não reforçados sob a forma de provetes moldados “em forma de osso” sob condições definidas de pré-tratamento, temperatura, humidade e velocidade da máquina de ensaio, sendo também possível a determinação do coeficiente de poisson, ν , à temperatura ambiente.

3.3.1.1. PROVETES A ENSAIAR

Como a resina a testar é um material isotrópico, serão necessários testar cinco provetes de resina Sikadur-30®, bem como da Sikadur-52® de acordo com as especificações da norma. As dimensões dos provetes são as indicadas na Figura 3.15. A norma sugere a utilização de uma espessura de 3.5 mm, no entanto, por razões económicas, os moldes foram fabricados com uma espessura de 5 mm devido ao facto das espessuras das chapas serem normalizadas e assim, torna-se mais económico a utilização de uma dimensão normalizada.

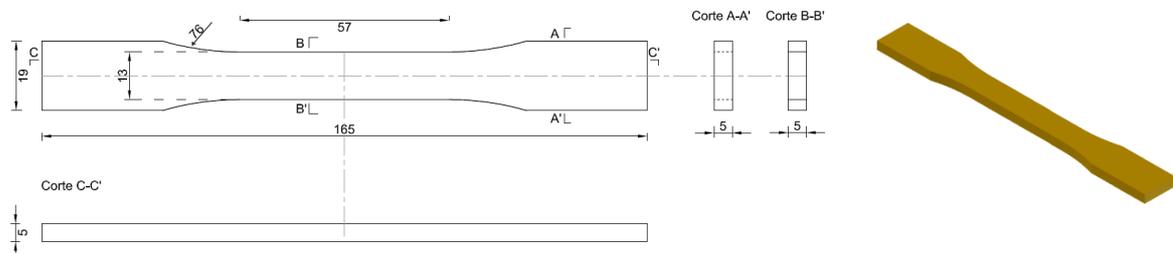


Figura 3.15 – Proвете a ser moldado para a realização do ensaio segundo a norma ASTM D638



a)



b)

Figura 3.16 – Fotografia dos provetes moldados em forma de “osso de cão” : a) resina Sikadur-52; © b) resina Sikadur-30®

3.3.1.2. DIMENSÕES DOS PROVETES MOLDADOS

A norma ASTM D638 sugere que se meça a largura e a espessura dos provetes moldados com recurso à utilização de um paquímetro com uma aproximação de 0.5 mm. Na Tabela 3.7 é possível analisar a recolha das medições efetuadas para cada um dos provetes respetivamente identificados.

Tabela 3.7 – Dimensões dos provetes a serem ensaiados segundo a norma ASTM D638

	Nº do provete	Compr. (mm)	Larg. a meio vão (mm)	Esp. a meio vão (mm)
Sikadur-52®	52_T1	165	13.4	4.8
	52_T2	165	13.2	5
	52_T3	165	13.4	4.8
	52_T4	165	13	4.8
	52_T5	165	13	4.8
Sikadur-30®	30_T1	165	13	6
	30_T2	165	13	5.1
	30_T3	165	13	6
	30_T4	165	13.5	5.8
	30_T5	165	13.5	5.8

As diferenças entre espessuras dos provetes das duas resinas é explicada pelo facto de ser essencial criar superfícies planas para a execução dos ensaios e deste modo, sendo a resina Sikadur-52® maleável, facilmente com recurso a uma lixa se consegue esse resultado. Por outro lado, sabendo que a resina Sikadur-30® é um material muito rígido não foi possível lixar com receio que os provetes partissem não sendo deste modo possível eliminar as rebarbas dos provetes.

3.3.1.3. SETUP EXPERIMENTAL

No sentido de perceber a disposição de todo o setup experimental, o mesmo é apresentado nas Figuras 3.17 e 3.18. Na Figura 3.17 é possível verificar a célula de carga da servo-hidráulica Instron 8801 com capacidade de carga de 100 kN. Na Figura 3.18 é possível mostrar o sistema que permite aplicar a técnica da correlação digital de imagem disponibilizado pela Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, com o objetivo de obter o coeficiente de Poisson e o módulo de elasticidade, com recurso ao software MatchID.



Figura 3.17 – Máquina de ensaio INSTRON 8801: ensaio à tração



Figura 3.18 – Sistema de correlação digital de imagem: ensaio à tração

É de salientar, que, para a correta execução do ensaio em questão, é essencial a colocação do provete na vertical, e para tal, efetuou-se uma linha média em cada provete, Figura 3.20, para facilitar a colocação do provete na máquina de ensaios.

Estes ensaios experimentais iniciaram-se com o provete de resina Sikadur-52, sendo que, o resultado obtido para o provete identificado como 52_T1 não pode ser considerado válido, na medida em que ocorreu uma sobrecarga “overload” que conduziu à rotura prévia do provete. Em consequência, após ser colocado o provete 52_T2 na máquina de ensaio, e se ter iniciado o ensaio, este rompeu na zona das amarras. Assim, para contrariar a situação colocaram-se umas chapas metálicas nesta zona para que não ocorresse deslizamento entre a máquina e os restantes provetes. Para esta resina considerou-se uma velocidade de ensaio de 2 mm/min.

Seguiram-se os provetes de resina Sikadur-30, em que o provete 30_T1 teve uma velocidade de ensaio de 1 mm/min. Como se considerou que a velocidade estava alta em relação ao ensaio diminuiu-se a do provete 30_T2 para 0.5 mm/min. Os restantes provetes foram ensaiados com uma velocidade de 0.25 mm/min.

3.3.2. ENSAIOS DE COMPRESSÃO

Segundo as condições impostas pela norma ASTM D695, este método tem como objetivo a determinação das propriedades mecânicas dos plásticos rígidos não reforçados e reforçados, incluindo compósitos de alto módulo, quando carregados em compressão com cargas relativamente baixas.

3.3.3.1. PROVETES A ENSAIAR

Neste caso, serão ensaiados cinco provetes de resina Sikadur-30® e também o mesmo número de ensaios a serem realizados para a resina Sikadur-52®, com as dimensões indicadas na Figura 3.19. Na medida em que se está perante um material isotrópico serão necessários 5 provetes de cada resina indicada sendo que as medidas sugeridas pela norma foram todas alteradas de $12,7 \times 12,7 \times 25,4$ mm³ para $15 \times 15 \times 30$ mm³, mantendo a relação entre as diferentes medidas para facilitar o fabrico dos moldes.

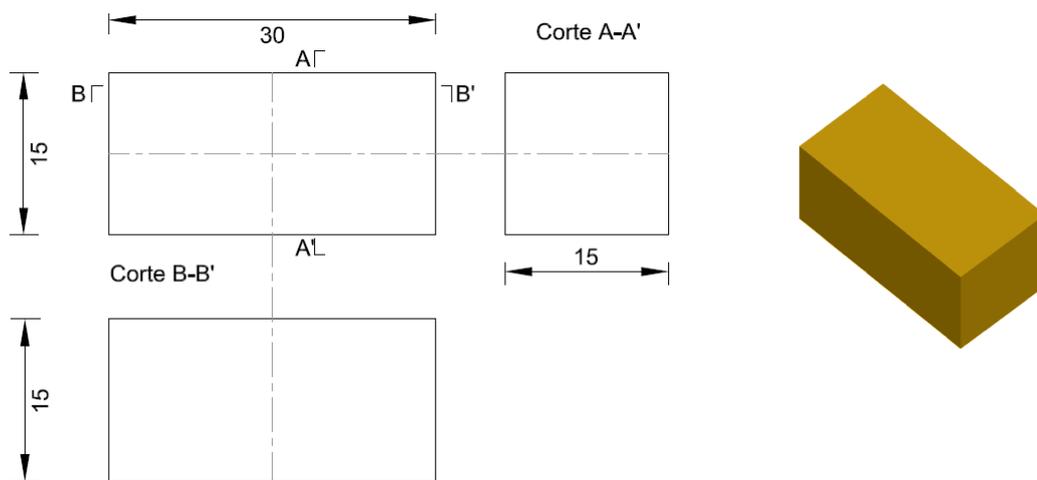


Figura 3.19 – Provede a ser moldado para a realização do ensaio de compressão segundo a norma ASTM D695



a)



b)

Figura 3.20 – Provetes moldados em forma de prisma: a) resina Sikadur-52®; b) resina Sikadur-30®

3.3.2.2. DIMENSÕES DOS PROVETES MOLDADOS

A norma ASTM D695 indica que é necessário medir o comprimento, largura e a espessura dos provetes recorrendo ao uso de um paquímetro com uma aproximação de 0.5 mm e, por conseguinte, registar o valor mínimo da área da seção transversal. Na Tabela 3.8 é possível encontrar toda a informação recolhida durante as medições efetuadas.

Tabela 3.8 – Dimensões dos provetes a ser ensaiados segundo a norma ASTM D695

	Nº do provete	Compr. (mm)	Larg. (mm)	Esp. (mm)
Sikadur-52®	C1	30	15	13
	C2	30	15	11
	C3	30	15	13.5
	C4	30	15	11
	C5	30	15	9.5
Sikadur-30®	C1	30	15	14
	C2	30	15	12.2
	C3	30	15	12.8
	C4	30	15	15
	C5	30	15	15

As grandes diferenças nas espessuras dos diversos provetes da mesma resina são devidas a problemas com a selagem dos moldes devidas essencialmente à grande fluidez da resina Sikadur-52®, assim, para a injeção desta resina em ligações aparafusadas é necessário ter em atenção à completa selagem do parafuso para que não ocorram perdas. Por outro lado, a dificuldade em trabalhar as superfícies dos provetes de resina Sikadur-30® faz com que os mesmos tenham uma espessura maior e com uma superfície mais rugosa.

3.3.2.3. SETUP EXPERIMENTAL

O Setup experimental a que se recorreu para a realização dos ensaios à compressão pode ser observado nas Figuras 3.21 e 3.22. Conforme foi verificado nos ensaios de tração, a máquina de ensaios usada foi a servo-hidráulica Instron 8801, utilizando também o sistema de correlação de imagem com vista à obtenção do coeficiente de Poisson e do módulo de elasticidade.



Figura 3.21 – Máquina de ensaios INSTRON 8801: ensaio à compressão



Figura 3.22 – Sistema de correlação digital de imagem: ensaio à compressão

Os ensaios à compressão iniciaram-se com os provetes de resina Sikaur-52®, sendo que a velocidade de ensaio utilizado para o provete 52_T1 foi 0,25 mm/min. Observando-se que era uma velocidade de ensaio relativamente baixa, subiu-se para 1,6 mm/min para o provete seguinte. Como esta resina se adapta às condições de ensaio durante o carregamento a que está sujeito, os restantes provetes foram ensaiados a uma velocidade de 2 mm/min, com o objetivo de verificar possíveis alterações na resposta dos mesmos. Para a resina Sikadur-52® acredita-se que a velocidade poderá ter alguma influência nos resultados obtidos, na medida em que o material em questão tem uma grande capacidade de deformação. Por outro lado, os provetes de resina Sikadur-30® foram ensaiados a uma velocidade de 1 mm/min.

3.3.3. ENSAIOS DE FLEXÃO

Os ensaios de flexão foram executados de acordo com a norma ASTM D790, tem como objetivo a determinação de propriedades de flexão das resinas estruturais objeto de estudo. Normalmente, esta norma é usada para materiais rígidos e semirrígidos.

3.3.3.1. PROVETES A ENSAIAR

Segundo a norma, devem ser ensaiados 5 provetes de cada resina em estudo, Sikadur-30® e Sikadur-52®. A geometria tipo dos provetes a serem usados nos ensaios de flexão está indicada na Figura 3.23 (medidas em milímetros). É importante salientar que a espessura de 3,2 mm proposta pela norma em causa foi alterada para 5 mm com a finalidade de facilitar o processo de fabrico dos moldes, tendo em consideração que as geometrias das chapas comerciais.

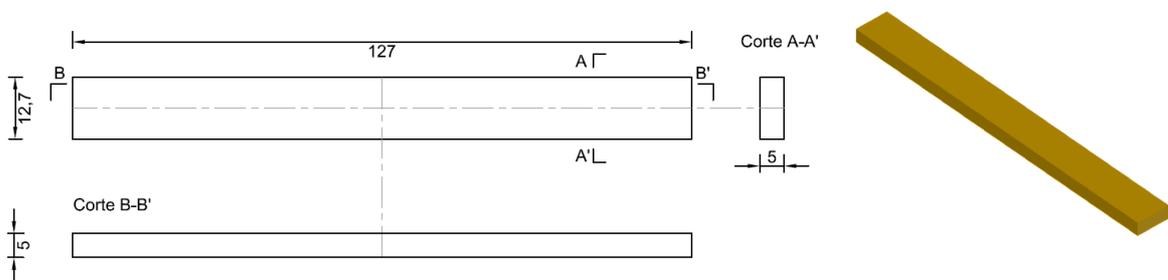


Figura 3.23 – Geometria do provete a ser usado nos ensaios de flexão segundo a norma ASTM D790



Figura 3.24 – Fotografia dos provetes moldados em barra retangular de resina Sikadur-52®



Figura 3.25 – Fotografia dos provetes moldados em barra retangular de resina Sikadur-30®

3.3.3.2. DIMENSÕES DOS PROVETES MOLDADOS

De acordo com as indicações que a norma sugere é necessário registrar a largura e a espessura a meio vão do provete com o auxílio de um paquímetro com uma aproximação de 0.5 mm. As dimensões obtidas estão registadas na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Dimensões dos provetes a ser ensaiados segundo a norma ASTM D790

	Nº do provete	Compr. (mm)	Larg. a meio vão (mm)	Esp. a meio vão (mm)
Sikadur-52®	52_F1	127	12	4.2
	52_F2	127	12.8	4.1
	52_F3	127	12.9	4
	52_F4	127	12.9	4.4
	52_F5	127	13	4
Sikadur-30®	30_F1	127	12.9	5
	30_F2	106	13	5.1
	30_F3	105.5	13	5.1
	30_F4	106.5	13	5.1
	30_F5	127	13	5.2

Como foi referido na secção 3.2.3.4., a descofragem dos provetes Sikadur-30®, conduziu à fissuração de alguns provetes numa zona perto da extremidade. Deste modo, optou-se por tornar três dos provetes, identificados como F2, F3 e F4, com um comprimento de aproximadamente 106 mm.

3.3.3.3. SETUP EXPERIMENTAL

O ensaio de flexão em três pontos consiste na utilização de uma barra com secção transversal retangular simplesmente apoiada que é carregada na secção intermédia que se encontra entre dois apoios. A distância entre os apoios foi de 70 mm para todos os provetes facilitando assim a uniformidades dos ensaios. Deste modo, os provetes são carregados até a rotura ocorrer na face externa do mesmo ou até ser atingir um máximo de deformação imposto pela norma.

Para melhor esclarecimento do setup experimental recorre-se à Figura 3.26 onde é possível identificar a máquina servo-elétrica INSTRON 5484 MicroTester usada nos ensaios de flexão em três pontos. Para que a carga fosse aplicada a meio vão, traçaram-se linhas médias nos provetes para facilitar concretização dos ensaios (ver Figura 3.27).



Figura 3.26 – Máquina de ensaios INSTRON 5484 MicroTester



Figura 3.27 – Linhas médias traçadas nos provetes de resina Sikadur-52® e Sikadur-30®

A aplicação da carga nos provetes Sikadur-30® foi feita a uma velocidade de ensaio de 1 mm/min. O resultado experimental do provete identificado como 30_F2 não foi considerado válido, na medida em que, tinha uma fissura não visível a “olho nu” e logo após o início do ensaio este fraturou na seção intermédia. O resultado experimental do provete 30_F5 não pode ser considerado válido para a caracterização do material visto que ocorreu um erro no manuseamento da máquina de ensaio.

Na execução dos ensaios de flexão em três pontos para os provetes Sikadur-52® utilizou-se uma velocidade de ensaio de 1 mm/min, sendo que posteriormente, esta velocidade de ensaio foi alterada para 2 mm/min.

3.3.4. CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGEM (CDI)

A CDI é uma técnica ótica de campo completo em que os deslocamentos em pontos discretos de dados são fornecidos pela correlação de imagens em diferentes configurações mecânicas. A deformação do material é avaliada por meio da deformação de um padrão texturado, assumido perfeitamente ligado à superfície do objeto.

O recurso a esta técnica tem vindo a desenvolver-se nas últimas décadas, e está gradualmente a tornar-se numa ferramenta muito utilizada na mecânica experimental. A resolução espacial e a precisão da técnica podem ser ajustadas pelos componentes óticos utilizados na formação da imagem e no tamanho e passo das janelas de correlação, para abordar as aplicações de engenharia que podem ser dimensionadas de níveis estruturais para micro.

À escala macro, a superfície natural da resina não fornece um padrão speckle necessário para as medidas CDI. Um padrão de salpicos foi então pintado sobre uma região de interesse situado na zona média dos provetes, por meio de um aerógrafo (ver Figura 3.28), para garantir o tamanho, o contraste e a isotropia adequados na escala de observação. Na Figura 3.29 é possível observar o aspeto dos provetes após a criação do padrão necessário.



Figura 3.28 – Tintas a que se recorre para criar um padrão speckle



a)



b)



c)



d)

Figura 3.29: Pintura dos provetes para CDI: a) Provede a ser usado no ensaio de tração de resina Sikadur-52; b) Provede a ser usado no ensaio de tração de resina Sikadur-30; d) Provedes a serem usados nos ensaios de compressão de resina Sikadur-52; d) Provedes a serem usados nos ensaios de compressão de resina Sikadur-30.

O software a que se recorre para tratamento de dados foi o MatchID. Uma câmara digital acoplada (CCD) com uma lente telecêntrica foi usada para a obtenção das imagens.

De acordo com o tamanho típico do padrão de salpico pintado, um tamanho de subconjunto de 41×21 pixels² foi escolhido. Normalmente, os campos de ruído são obtidos a partir da correlação da imagem, que pode ser modelada como um sinal de ruído gaussiano branco. Portanto, o desvio padrão foi definido como uma estimativa da precisão global associada às medições óticas.

A sequência de imagens da deformação ao longo de um ensaio foi adquirida à frequência de 1Hz, em sincronia com a força aplicada ao provede. O sistema ótico empregue na aquisição das imagens inclui uma câmara Manta G-505 acoplada a uma lente telecêntrica TC 23 36. As características da CCD e da lente a que se recorre podem ser identificadas na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 – Características dos componentes óticos utilizados na CDI

CDC	
Modelo	Manta G-505
Resolução	2452 x 2056 pixels
Tamanho da célula (μm x μm)	3.45 x 3.45
ADC (bit)	14
Montagem da lente	C-Mount
Frequência de aquisição (Hz)	1
Lentes	
Modelo	Opto Engineering Telecentric lens TC 23 36
Ampliação (%)	0,243 +/- 3%
Campo de visão (2/3") (mm x mm)	36,2 x 27,1
Distancia (mm)	103,5 +/- 3
F-number	8
Campo de profundidade (mm)	11
Distorção (%)	< 0,10
Comprimento (mm)	164.9
Diametro externo (mm)	61,0
Peso (g)	520
Iluminação	Lighting Raylux 25 white-light LED

3.4. ENSAIOS DE FADIGA

Para a caracterização da resistência à fadiga foi usada a norma ASTM D7791-12. Esta norma tem por objetivo a determinação de propriedades de fadiga dinâmica em plásticos rígidos e semirrígidos em condições de carregamento uniaxiais

Esta norma prevê a aplicação de dois procedimentos de ensaio: o procedimento A para a realização de ensaios de fadiga de tração-tração; e procedimento B para a realização de ensaios de fadiga tração-compressão.

3.4.1.1. PROVETES A ENSAIAR

Os ensaios de resistência à fadiga das resinas em estudo foram executados de acordo com o procedimento A preconizado na norma D7791-12. A norma indica que deverão ser testados um número de 15 provetes para os ensaios de fadiga tração-tração. Nas Figuras 3.31 e 3.32 é possível observar o panorama do programa experimental de fadiga dos provetes fabricados a serem testados para as resinas estruturais SIKADUR-52® e SIKADUR-30®, respectivamente.

A norma D7791-12 sugere que as dimensões dos provetes a fabricar sejam de acordo com a norma D638. Assim, como foi referido na secção 3.3.1.1, a espessura de 3.5 mm proposta pela norma não foi levada em consideração, devido a razões de ordem económica, tendo sido adotado o valor de 5 mm, conforme pode ser visto na Figura 3.30.

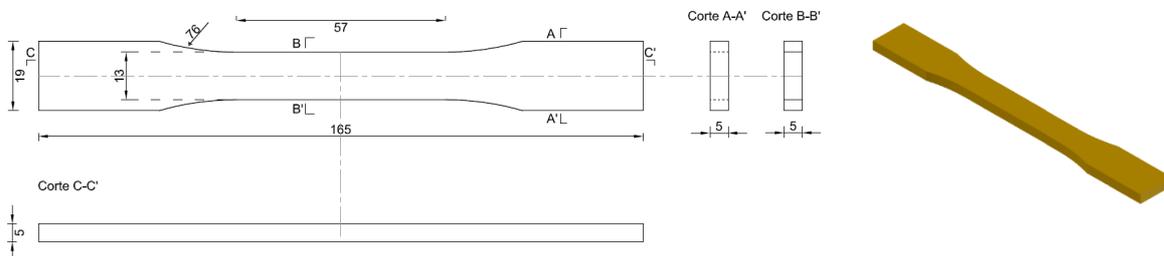


Figura 3.30 – Provette a ser moldado para a realização do ensaio de resistência à fadiga segundo a norma ASTM D7791-12



Figura 3.31 – Fotografia dos provetes moldados em forma de “osso de cão” para a resina Sikadur-52®



Figura 3.32 – Fotografia dos provetes moldados em forma de “osso de cão” para a resina Sikadur-30®

3.4.1.2. DIMENSÕES DOS PROVETES MOLDADOS

Segundo a norma ASTM D7791-12 é necessário registrar a largura e a espessura dos provetes com paquímetro com uma aproximação de 0.5 mm sabendo que as dimensões mínimas registradas serão utilizadas para a obtenção da respectiva área da secção transversal de cada provete. Na Tabela 3.11 é possível consultar as medições efetuadas para cada um dos provetes.

Tabela 3.11 – Dimensões dos provetes a ser testados segundo a norma ASTM D7791-12

	Provetes	Compr. (mm)	Larg. (mm)	Esp. (mm)
Sikadur-52®	52_1	165	13.5	4.9
	52_2	165	13.2	4.1
	52_3	165	13	3.9
	52_4	165	13	4.1
	52_5	165	13.7	4.2
	52_6	165	13.5	4.1
	52_7	165	13.5	4.5
	52_8	165	13.5	4.1
	52_9	165	13.7	4.5
	52_10	165	13.1	5
	52_11	165	13.1	4.2
	52_12	165	13.5	4.2
	52_13	165	13.5	4.2
Sikadur-30®	30_1	165	13	5.2
	30_2	165	13.5	6
	30_3	165	13.5	6
	30_4	165	13.5	5.2
	30_5	165	13.5	5.1
	30_6	165	13.5	6
	30_7	165	13.5	5.8
	30_8	165	13.5	6
	30_9	165	13	5.3
	30_10	165	13.5	5.9
	30_11	165	13.5	5.5
	30_12	165	13	5.5
	30_13	165	13	5.1

3.4.1.3. SETUP EXPERIMENTAL

Os ensaios de resistência à fadiga serão realizados usando máquinas de ensaios dinâmicos e de fadiga. Segundo a norma, a curva de resistência à fadiga pode variar com o tamanho do provete, bem como com a frequência de ensaio. A influência desses dois parâmetros será levada em consideração neste estudo.

Na preparação do ensaio é preciso ter em consideração os limites de resistência monotónico de cedência e de rotura do material. A carga associada a um determinado nível de tensão pode ser determinada pela seguinte relação:

$$P = \sigma \cdot A \quad (3.1)$$

A frequência de ensaio proposta pela norma varia de 1-25Hz, mas recomenda-se que seja utilizada uma frequência de 5 Hz, ou então um valor inferior a este último. Assim, para as resinas Sikadur-52® e Sikadur-30® adotaram-se uma frequência de 5 Hz e 2.5Hz, respetivamente.

O provete é colocado na máquina de ensaio alinhando a sua linha média com o eixo da amarra do atuador, e por seguinte, é aplicado um carregamento dinâmico de amplitude constante, em controlo de carga (tensão), durante o ensaio.

É necessária a colagem de umas placas de material acrílico nas zonas da amarra do provete, para reforçar esta região sujeita a um aperto inicial e evitar que a rotura se dê na amarra. A Figura 3.33 indica os locais a onde foram colocadas as placas acrílicas nos provetes de resina Sikadur-30®. Na Figura 3.34 é possível observar os locais a onde foram colocadas placas de alumínio nos provetes de resina Sikadur-52®.



Figura 3.33 – Aplicação de placas acrílicas em provetes Sikadur-30®



Figura 3.34 – Aplicação de placas metálicas em provetes Sikadur-52®

As máquinas de ensaio utilizadas para cada uma das resinas são distintas. Assim, os ensaios de fadiga para a resina Sikadur-30® foram realizados na máquina de ensaios servo-hidráulica INSTRON 8801 com uma célula de carga de 100kN, disponível no laboratório de ensaios mecânicos na Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD). Para a resina Sikadur-52®, os ensaios de fadiga foram realizados na máquina de ensaios MTS Bionix com célula de carga de 5kN no

Laboratório de Resistência de Materiais da Universidade de Oviedo. As Figuras 3.35 e 3.36 apresentam um panorama da máquina de ensaios e um provete de Sikadur-30® instalado na máquina de ensaios, respetivamente, usados para a caracterização da resistência à fadiga. Na Figura 3.37 é exibida a máquina de ensaios usada na caracterização da resistência à fadiga da resina estrutural Sikadur-52®.



Figura 3.35 – Máquina de ensaio INSTRON 8801: ensaio à fadiga

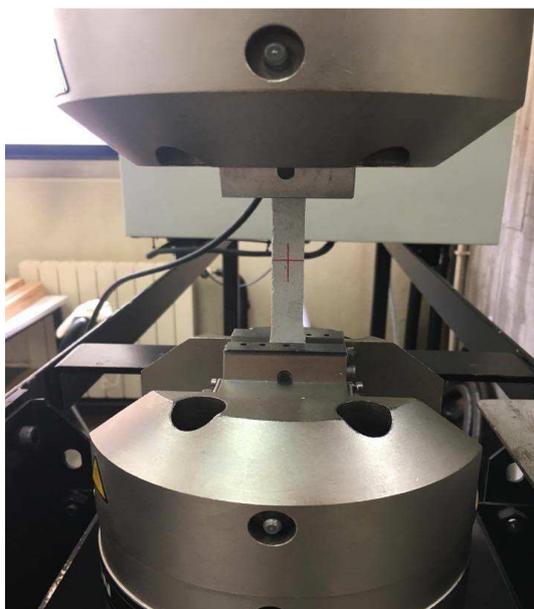


Figura 3.36 – Pormenor da colocação do provete para o ensaio de fadiga



Figura 3.37 – Máquina de ensaios dinâmicos e de fadiga MTS Bionix

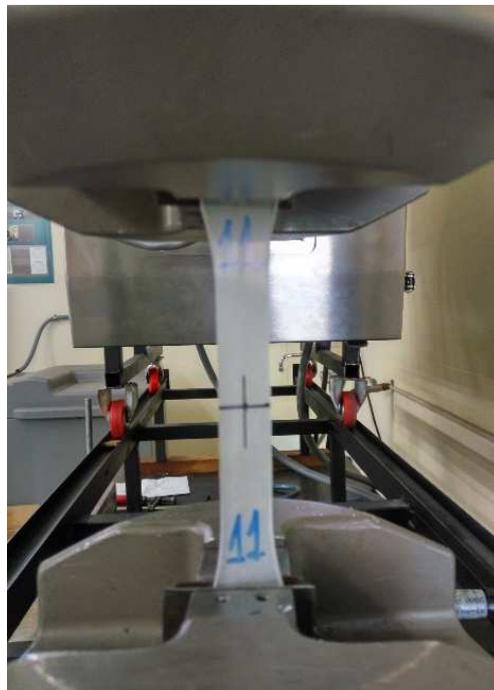


Figura 3.38 – Pormenor da colocação do provete para o ensaio de fadiga

4

ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentada uma análise dos resultados dos ensaios monotónicos realizados comparando-os com as propriedades fornecidas pela empresa, bem como, o resultado dos ensaios para avaliação da resistência à fadiga das resinas estruturais consideradas neste estudo (Sikadur-30 e Sikadur-52).

Para os ensaios monotónicos efetuados à compressão e à tração, usando as normas ASTM D695 e D638, respetivamente, são apresentados os gráficos tensão-deslocamento sendo que através do uso da correlação digital de imagem (CDI) foi possível obter o módulo de elasticidade, E , e o coeficiente de Poisson. Por outro lado, apresentam-se ainda os gráficos tensão-deformação para as duas resinas relativos aos ensaios de flexão obtidos através de procedimentos propostos na norma ASTM D790.

São descritas as expressões, procedimentos e cálculos utilizados para a determinação de cada uma das curvas. Todos estes processos terão como base o proposto pelas normas ASTM que foram mencionadas no capítulo anterior.

Do mesmo modo, também é apresentado os resultados experimentais de fadiga realizados para as duas resinas em estudo, usados para obtenção das curvas S-N de projeto a serem propostas. Os ensaios de fadiga foram realizados usando solicitações dinâmicas com amplitude constante para uma razão de tensões igual a 0.0.

4.2. ENSAIOS MONOTÓNICOS

4.2.1. ENSAIO DE TRAÇÃO

Os ensaios monotónicos para obtenção da resistência à tração foram realizados segundo a norma americana ASTM D638, tendo sido preparados 5 provetes segundo indicações referidas na norma.

A resistência à tração calcula-se dividindo a carga máxima obtida, P , pela área mínima da secção transversal do provete, A :

$$\sigma_t = P/A \quad (4.1)$$

De seguida, nas Figuras 4.1 e 4.2, é possível identificar a zona de rotura dos provetes das duas resinas em estudos, Sikadur-52 e Sikadur 30, respetivamente, após solicitação sob condições de carregamento à tração.



Figura 4.1 - Apresentação dos provetes usados nos ensaios de tração de resina Sikadur-52® após a rotura



Figura 4.2 - Apresentação dos provetes usados nos ensaios de tração de resina Sikadur-30® após a rotura.

Para se dar início ao tratamento de dados é necessário ter em atenção aos resultados que podem ser considerados válidos para a caracterização correta do material. Assim, no caso dos provetes realizados à tração consideram-se válidos, aqueles em que a fratura ocorre na zona de seção mínima, conforme de pode observar na Tabela 4.1. É de notar que, o provete identificado como 52_T1

fraturou imediatamente após a sua colocação nas amarras da máquina de ensaio e, deste modo, o resultado proveniente deste provete não pode ser considerado válido.

Tabela 4.1 – Validação dos provetes testados nos ensaios à tração

	Nº do provete	Zona de rotura	Válido / Não válido
Sikadur-52®	52_T1	Seção mínima	Não válido
	52_T2	Amarras	Não válido
	52_T3	Seção mínima	Válido
	52_T4	Seção mínima	Válido
	52_T5	Seção mínima	Válido
Sikadur-30®	30_T1	Seção mínima	Válido
	30_T2	Seção mínima	Válido
	30_T3	Seção mínima	Válido
	30_T4	Seção mínima/Amarras	Válido
	30_T5	Seção mínima	Válido

Os resultados obtidos relativos à resina Sikadur-52®, após tratados, foram colocados num gráfico tensão-deformação, Figura 4.3, para que o seu comportamento à tração possa ser identificado mais facilmente.

Verifica-se que este tipo de resina apresenta um comportamento dúctil à tração sendo que quando ocorre a rotura dos provetes, estes atingem um deslocamento, em média, de aproximadamente 15 mm e tensões de rotura que variam entre 8.5 e 10 MPa.

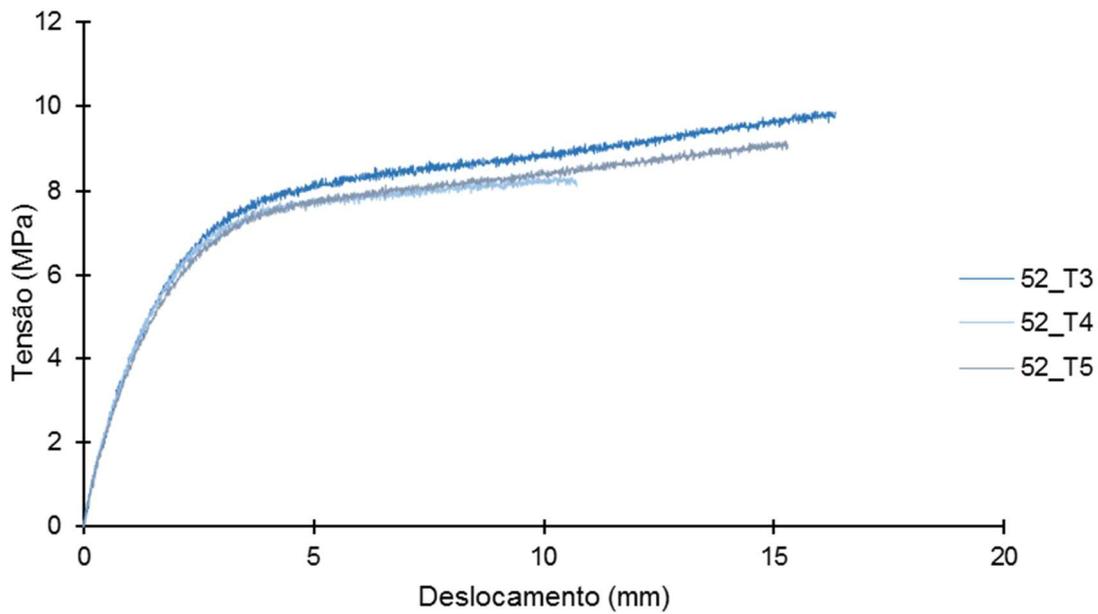


Figura 4.3 – Gráfico tensão-deformação: Ensaio à Tração da resina Sikadur-52®

Na Tabela 4.2 são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à tração da resina Sikadur-52®, bem como, o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson obtidos usando a correlação digital de imagem.

Tabela 4.2 – Resumo dos resultados obtidos para os ensaios de tração para a resina Sikadur-52

Provete	σ (MPa)	$\bar{\sigma}$ (MPa)	E (GPa)	\bar{E} (GPa)	s (GPa)	CV (%)	ν	$\bar{\nu}$	s	CV (%)
52_T3	9.89		0.41				0.47			
52_T4	8.37	9.15	0.57	0.46	0.083	18.07	0.46	0.46	0.01	1.51%
52_T5	9.19		0.37				0.46			

Comparando os resultados obtidos com aqueles que são disponibilizados pela ficha técnica é de notar alguma discrepância. A variabilidade de resultados poderá ser explicada pelo facto de ser uma resina sensível às condições em a mistura é realizada, ou seja, temperatura, humidade, entre outros.

Relativamente aos ensaios de tração realizados para a resina Sikadur-30® estes apresentam um comportamento frágil até à rotura, conforme se pode observar na Figura 4.4.

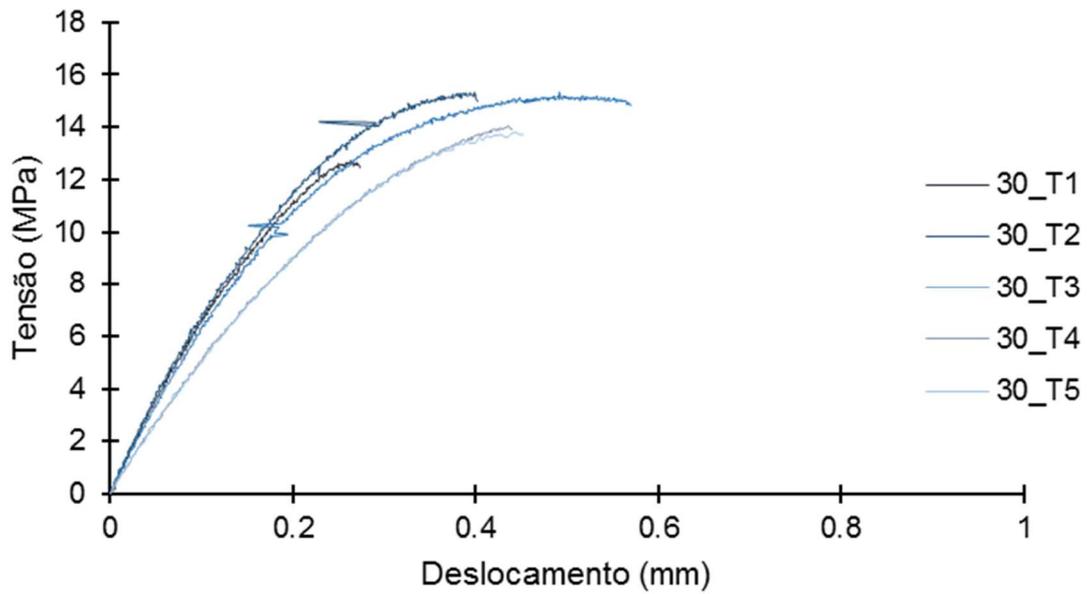


Figura 4.4 – Gráfico tensão-deslocamento: ensaio à tração da resina Sikadur-30®

Na Tabela 4.3 são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à tração da resina Sikadur-30, bem como, o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson obtidos usando a correlação digital de imagem.

Tabela 4.3 – Resumo dos resultados obtidos para os ensaios de tração para a resina Sikadur-30®

Provete	σ (MPa)	$\bar{\sigma}$ (MPa)	E (GPa)	\bar{E} (GPa)	s (GPa)	CV (%)	ν	$\bar{\nu}$	s	CV (%)
30_T1	12.74		5.02				0.28			
30_T2	15.32		5.68				0.14			
30_T3	15.35	14.24	4.78	5.78	0.83	14	0.27	0.21	0.06	29
30_T4	14.04		7.02				0.21			
30_T5	13.76		6.38				0.13			

Por comparação com os dados já conhecidos do material à tração, salienta-se o facto de o material apesar apenas um regime elástico, isto é, não existe uma zona de plastificação. Atingiram-se valores menores aos propostos que variam entre 26 e 31 MPa. Este facto pode ser explicado pelo facto de uma das faces do provete não se apresentar totalmente regularizada.

4.2.2. ENSAIOS DE COMPRESSÃO

Os ensaios monotónicos para a obtenção da resistência à compressão das resinas estruturais em estudo, foram realizados segundo as recomendações apresentadas na norma americana ASTM D695.

A resistência à compressão é calculada dividindo a carga última a que o provete está sujeita, P , pela área mínima da seção transversal do provete, A :

$$\sigma_c = P/A \quad (4.2)$$

Nas Figuras 4.5 e 4.6, é possível identificar a zona de rotura dos provetes das duas resinas em estudos após terem sido solicitados com um carregamento de compressão.



Figura 4.5 – Apresentação dos provetes usados nos ensaios de compressão da resina Sikadur-52®



Figura 4.6 – Apresentação dos provetes usados nos ensaios de compressão da resina Sikadur-30®

Na Tabela 4.4 estão identificados os provetes que foram utilizados para a caracterização da resistência à compressão das resinas estruturais em estudo.

Tabela 4.4 – Validação dos provetes testados nos ensaios à compressão

	Nº do provete	Zona de rotura	Válido / Não válido
Sikadur-52®	52_C1	Não rompeu	Não válido
	52_C2	Aumento da seção	Válido
	52_C3	Aumento da seção	Válido
	52_C4	Aumento da seção	Válido
	52_C5	Aumento da seção	Válido
Sikadur-30®	30_C1	45º com a face inferior	Válido
	30_C2	45º com a face inferior	Válido
	30_C3	45º com a face inferior	Válido
	30_C4	45º com a face inferior	Válido
	30_C5	45º com a face inferior	Válido

Para análise relativamente ao aspeto final após a rotura para as duas resinas em estudo são apresentadas as Figuras 4.7 e 4.8, respetivamente, para os provetes de Sikadur-52® e Sikadur-30®.

No caso da resina Sikadur-52® verifica-se um aumento da seção transversal e consequente diminuição da altura do provete sendo que a rotura do provete ocorreu devido a grandes fendas longitudinais.

Por outro lado, na resina Sikadur-30® identificam-se fendas que efetuam um ângulo de 45º com a base do provete sendo que este facto por ser explicado devido à grande concentração de tensões nessas regiões.

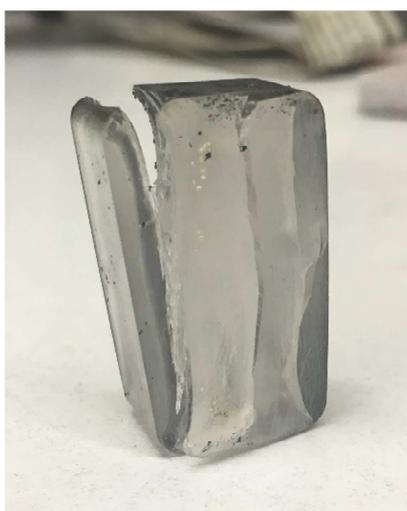


Figura 4.7 – Pormenor da rotura do provete de resina Sikadur-52®



Figura 4.8 – Pormenor da rotura do provete de resina Sikadur-30®

Analisando os resultados obtidos à compressão de resina Sikadur-52® onde se admitem valores consideráveis de deformação, excluindo o caso do provete 52_C2 onde se terminou o ensaio antes de se atingir a rotura, em que segue um comportamento de rigidez infinita sendo que o provete se vai adequando às condições de carga, isto é, aumenta a sua secção transversal, é ainda possível verificar que o material poderá seguir uma lei de endurecimento infinito, Figura 4.9.

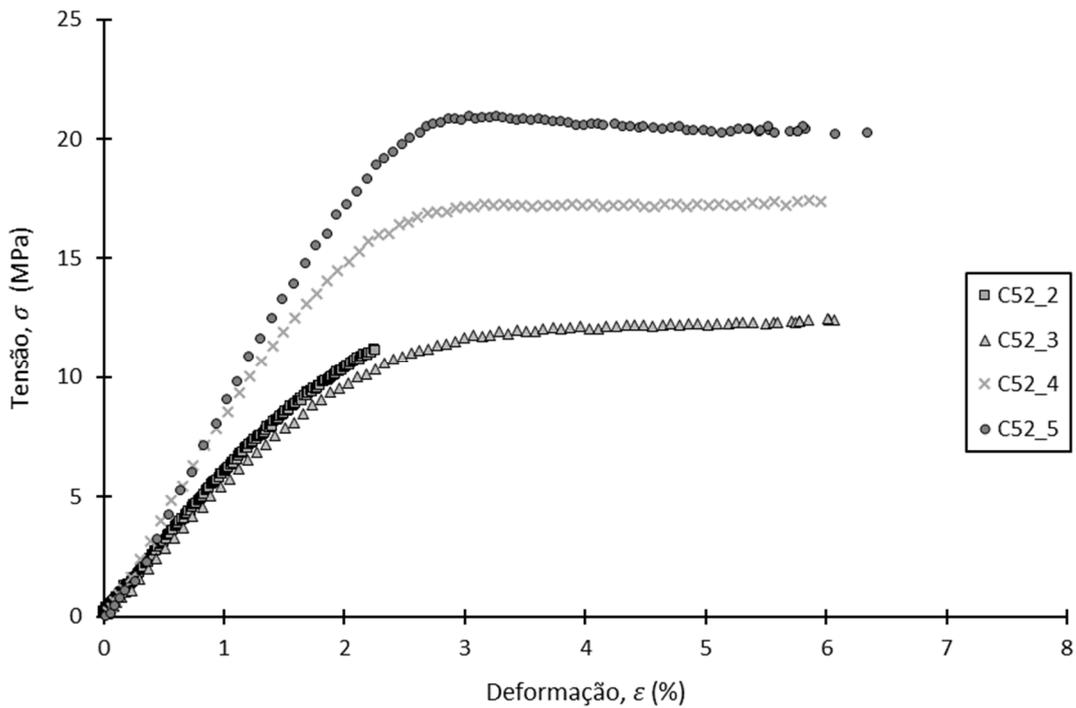


Figura 4.9 – Gráfico tensão-deformação: ensaio à compressão da resina Sikadur-52®

Na Tabela 4.5 são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão da resina Sikdaur-52®, bem como, o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson obtidos usando a correlação digital de imagem.

Tabela 4.5 – Resumo dos resultados obtidos para os ensaios de compressão para a resina Sikadur-52®

Provete	σ (MPa)	$\bar{\sigma}$ (MPa)	E (GPa)	\bar{E} (GPa)	s (GPa)	CV (%)	ν	$\bar{\nu}$	s	CV (%)
52_C2	11.19		0.59				0.54			
52_C3	12.47	15.51	0.52	0.71	0.16	22.70	0.55	0.54	0.01	1.51
52_C4	17.42		0.78				0.54			
52_C5	20.95		0.93				0.52			

Tendo em conta os resultados obtidos admite-se que estes foram bastante inferiores aos indicados na ficha técnica na medida em que apresenta valores de resistência à compressão de 34 MPa. Este material apresenta um regime plástico que surge cedo e de duração alargada.

Por outro lado, a partir dos resultados obtidos para a resina Sikadur-30® é possível observar um comportamento mais frágil do que a resina Sikadur-52®, conforme se pode observar na Figura 4.10. A curva da resistência à compressão do provete 30_C5 exibe valores mais baixos que os restantes provetes, podendo ser explicado com o facto de ter uma superfície mais irregular que os restantes provetes.

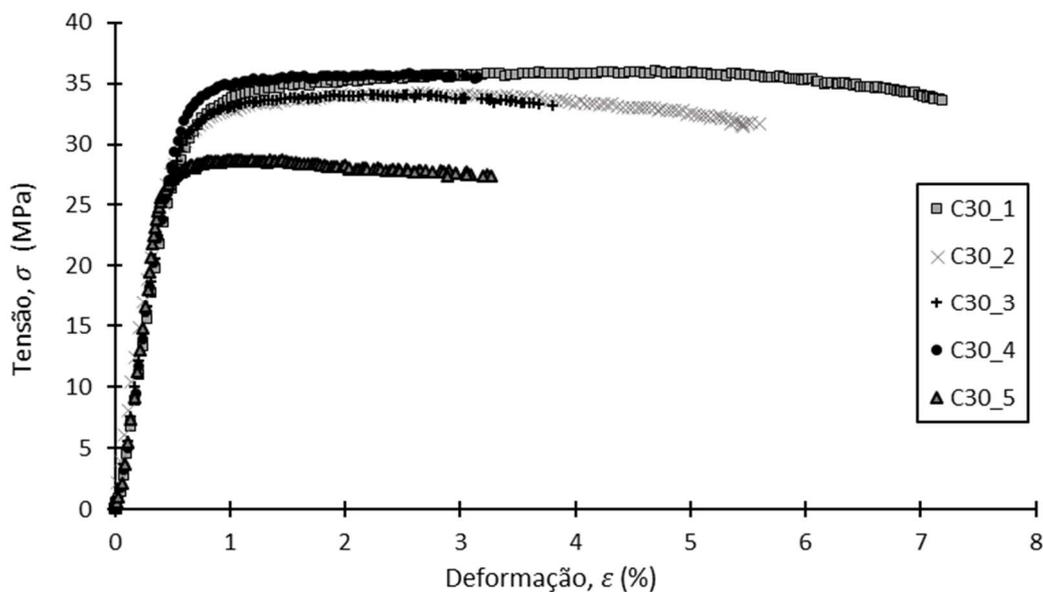


Figura 4.10 – Gráfico tensão-deformação: ensaio à compressão da resina Sikadur-30®

Na Tabela 4.6 são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão da resina Sikdaur-30®, bem como, o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson obtidos usando a correlação digital de imagem.

Tabela 4.6 – Resumo dos resultados obtidos para os ensaios de compressão para a resina Sikadur-30®

Provete	σ (MPa)	$\bar{\sigma}$ (MPa)	E (GPa)	\bar{E} (GPa)	s (GPa)	CV (%)	ν	$\bar{\nu}$	s	CV (%)
30_C1	35.98		5.77				0.32			
30_C2	33.02		5.79				0.29			
30_C3	34.37	33.57	6.10	6.22	0.55	8.81	0.31	0.31	0.01	3.70
30_C4	35.83		6.15				0.32			
30_C5	28.67		7.27				0.32			

Os valores de resistência à compressão situam-se bastante abaixo dos resultados propostos pela ficha de produto, isto é, valores que variam entre 85 e 95 MPa, sendo que, uma das explicações possíveis poderá estar relacionada com irregularidades que existem numa das faces dos provetes.

4.2.3. ENSAIO DE FLEXÃO

Os ensaios experimentais para a obtenção da resistência à flexão das resinas estruturais objeto de estudo foram conduzidos de acordo com a norma americana ASTM D790.

Para materiais elásticos homogêneos a tensão de flexão é obtida para provetes simplesmente apoiados (flexão em três pontos) e carregados no ponto médio. Nestes casos, a rotura à flexão é obtida usando a seguinte expressão:

$$\sigma_f = 3PL/(2bd^2) \quad (4.3)$$

onde, P é a carga aplicada, b é o comprimento da secção transversal da viga, d é a profundidade da secção transversal da viga, e L é o vão entre os suportes.

Esta expressão aplica-se estritamente aos materiais para os quais a tensão é linearmente proporcional à deformação até ao ponto de rutura e para o qual as deformações são pequenas. Por outro lado, esta expressão não é válida para casos em que não se está perante materiais que sigam a Lei Hooke, bem como, nos casos em que o provete escorrega entre os apoios. Assim, pode-se recorrer a esta equação apenas quando a deformação do provete na fibra mais extrema não atinja 5%.

Caso se esteja perante deformações com desvios superiores a 10% a meio vão relativamente à distância entre apoios, a tensão na fibra mais extrema dos provetes deve ser calculada a partir da seguinte equação:

$$\sigma_f = (3PL/(2bd^2)) \cdot [1 + 6 \cdot (D/L)^2 - 4 \cdot (d/L) \cdot (D/L)] \quad (4.4)$$

onde, P é a carga aplicada, D é o deslocamento máximo do centro da viga, b é o c da secção transversal da viga, d é a espessura da secção transversal da viga, e L é o vão entre os suportes.

Neste caso, está-se perante grandes relações de extensão-deformação onde são desenvolvidas forças finais significativas nos suporte que afetarão o momento. Deste modo, a equação inclui termos adicionais que são um fator de correção aproximado para a influência dessas forças.

Após a correta análise das expressões a utilizar em cada um dos tipos de material admite-se então que a equação (4.3) será utilizada para o caso de resina Sikadur-30, na medida em que os

deslocamentos que ocorrem na seção a meio vão são muito pequenos, aproximadamente 2 %. Recorre-se também à equação para caracterizar a resistência à flexão da resina Sikadur-52 para posteriormente ser efetuada uma comparação entre os resultados obtidos pelas equações (4.3) e (4.4). Em seguida, recorre-se à equação (4.5) para a caracterização da curva tensão-deformação à flexão da resina Sikadur-52®.

Com o objetivo de obter os gráficos tensão-deformação das duas resinas em estudo é necessário recorrer à equação (4.5) com o intuito de obter os dados da deformação à flexão, ε_f , dos provetes ao longo do ensaio, na medida em que o software utilizado regista apenas a carga e o deslocamento que ocorre:

$$\varepsilon_f = 6Dd/L^2 \quad (4.5)$$

onde, D é o deslocamento máximo do centro da viga, d é a espessura da secção transversal da viga, e L é o vão entre os suportes.

Com efeito, a norma ASTM D790 é possível a caracterização das curvas tensão-deformação em 3 tipos: a curva a diz respeito a um material que rompe antes de plastificar; a curva b que representa um material que primeiramente cede, mas não atinge o limite de deformação de 5%; e por fim, a curva c descreve o comportamento do material que não plastifica nem rompe no limite de deformação referido anteriormente. Estas curvas podem ser visualizadas na Figura 4.11.

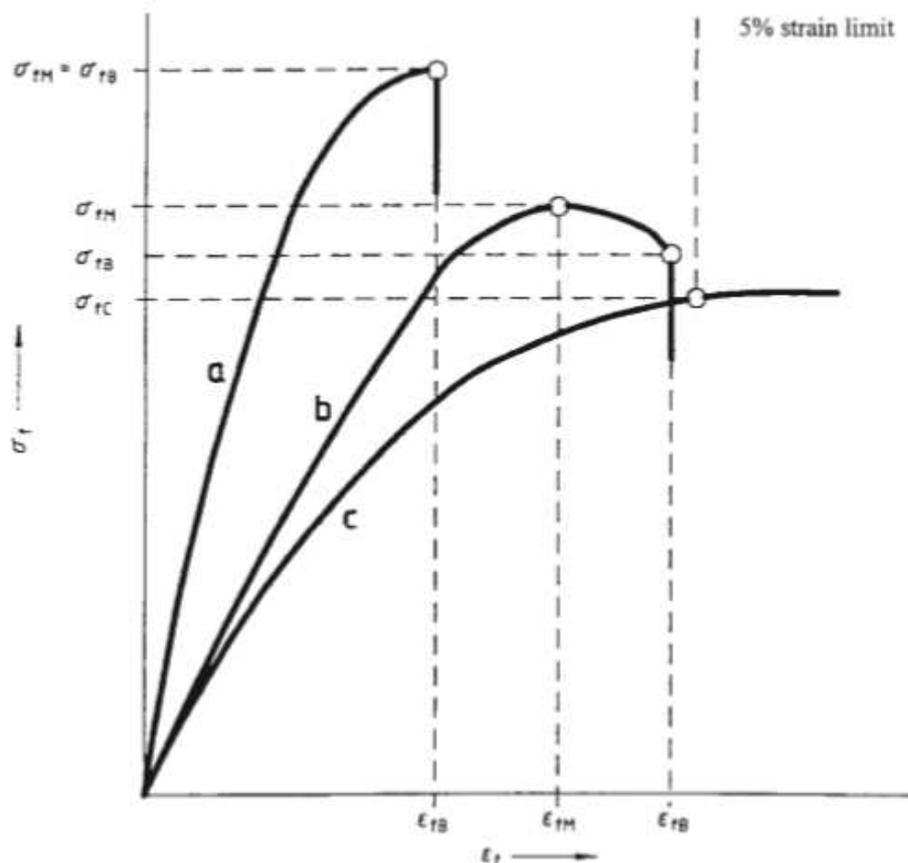


Figura 4.11 – Curvas tensão-deformação propostas pela norma ASTM D790

É de notar que os resultados da resistência à flexão obtidos para a resina Sikadur-30® enquadram-se no comportamento similar ao da curva a, sendo que, os resultados da resistência à compressão da resina Sikadu-52® têm um aspeto similar ao da curva c.

Por fim, o módulo de elasticidade à flexão, E_B , pode ser obtido usando a seguinte equação:

$$E_B = L^3 m / 4bd^3 \quad (4.6)$$

onde, m é o declive da tangente à porção inicial da linha reta da curva carga-deslocamento, b é o comprimento da secção transversal da viga, d é a profundidade da secção transversal da viga, e L é o vão entre os suportes.

Nas Figura 4.12 e 4.13 são apresentados os provetes de resina Sikadur-52® e Sikadur-30®, respetivamente, após dar-se o término dos ensaios experimentais.

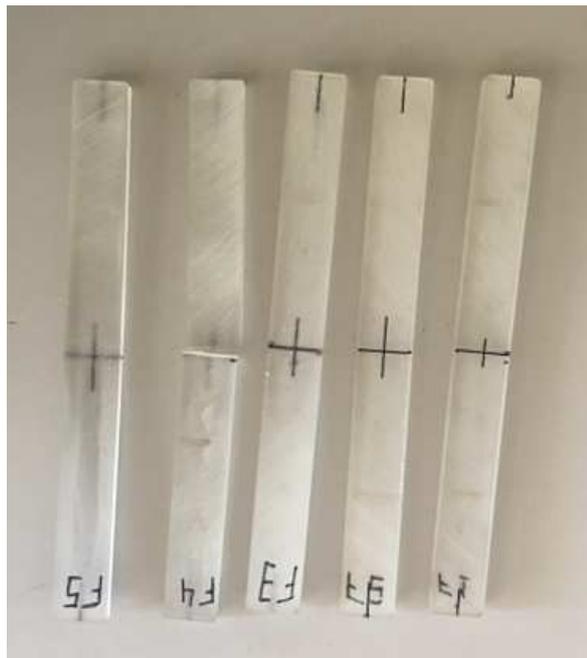


Figura 4.12 – Apresentação dos provetes usados nos ensaios de flexão para a resina Sikadur-52® após a rotura.

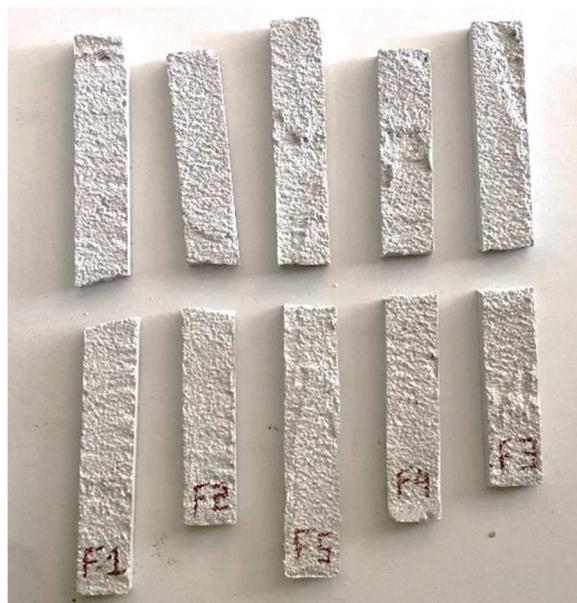


Figura 4.13 – Apresentação dos provetes usados nos ensaios de flexão para a resina Sikadur-30® após rotura.

Para que a análise dos resultados ocorra consoante o previsto, é necessário confirmar a validade dos provetes ensaiados, que podem ser consultados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Validação dos provetes realizados à flexão

	Nº do provete	Zona de rotura	Válido / Não válido
Sikadur-52	52_F1	Não rompeu	Válido
	52_F2	Não rompeu	Não válido
	52_F3	Não rompeu	Válido
	52_F4	Não rompeu	Válido
	52_F5	Não rompeu	Não válido
Sikadur-30	30_F1	Meio-vão	Válido
	30_F2	Meio-vão	Válido
	30_F3	Meio-vão	Válido
	30_F4	Meio-vão	Válido
	30_F5	Meio-vão	Válido

É de notar que, em nenhum provete de resina Sikadur-52® se atingiu a rotura, tendo sido terminado quando o provete atingiu uma elevada deformação, conforme se pode verificar na Figura 4.14. Conclui-se que o material apresenta um comportamento bastante dúctil à flexão.



Figura 4.14 – Término do ensaio à flexão após grande deformação do provete

De acordo com a norma ASTM D790, a curva apresentada enquadra-se na *curva c* que a mesma propõe. Assim, segundo as indicações da norma, a tensão de cedência máxima é obtida para a deformação de 5%. Nas Figuras 4.15 e 4.16 são apresentadas as curvas tensão-deformação à flexão para a resina Sikadur-52 usando as equações (4.3) e (4.4), respectivamente.

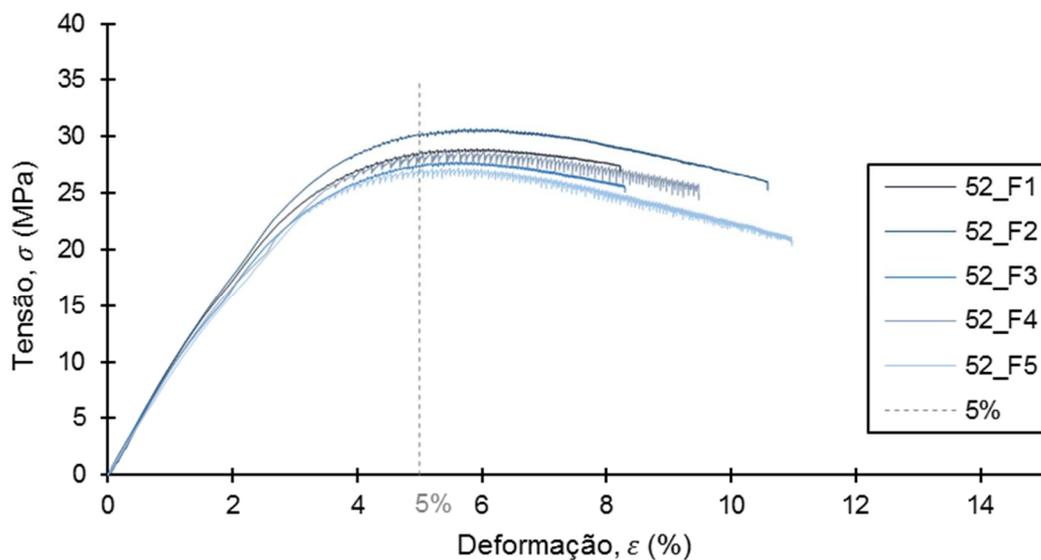


Figura 4.15 – Gráfico da curva tensão-deformação: ensaio à flexão da resina Sikadur-52®, Eq. (4.3)

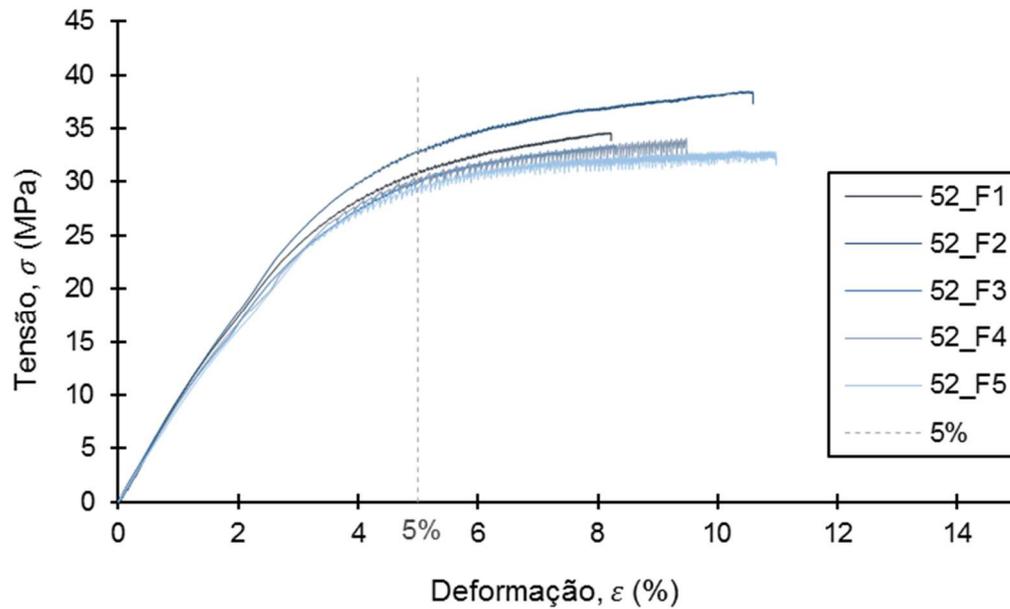


Figura 4.16 – Gráfico da curva tensão-deformação: ensaio à flexão da resina Sikadur-52®, Eq. (4.4)

Na Tabela 4.8 são apresentados os resultados que correspondem aos ensaios de resistência à flexão da resina Sikadur-52®, bem como, o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson obtidos usando as expressões preconizadas na norma americana ASTM D790.

Tabela 4.8 – Resumo dos resultados obtidos para os ensaios de flexão para a resina Sikadur-52®

Provete	σ (MPa)	$\bar{\sigma}$ (MPa)	E (GPa)	\bar{E} (GPa)	s (GPa)	CV (%)
52_F1	34.62		0.97			
52_F2	38.50		0.84			
52_F3	33.42	34.72	0.98	0.93	0.05	18.61%
52_F4	34.12		0.94			
52_F5	32.95		0.92			

Tendo em conta a resistência à flexão que é indicada na ficha de produto, 41 MPa, esta não varia quando comparada com a obtida pelos ensaios experimentais. Os bons resultados obtidos podem ser explicados pela boa qualidade das superfícies dos provetes em forma prismática.

Relativamente aos ensaios de flexão efetuados para a resina Sikadur-30® em que se determinou a tensão de rotura à flexão em MPa tendo em conta os resultados obtidos que estavam em função da força aplicada e do deslocamento. Este resultado não pode ser alvo de comparação com os valores da ficha técnica na medida em que este não foi disponibilizado.

O material em estudo para grandes carregamentos apresenta valores baixos deformações, admitiu-se neste caso que tem um comportamento frágil à flexão.

Alguma discrepância entre os valores obtidos pode estar relacionada com o facto de os provetes não terem uma superfície completamente lisa e regular devido há pouco fluidez da mistura no processo de moldagem.

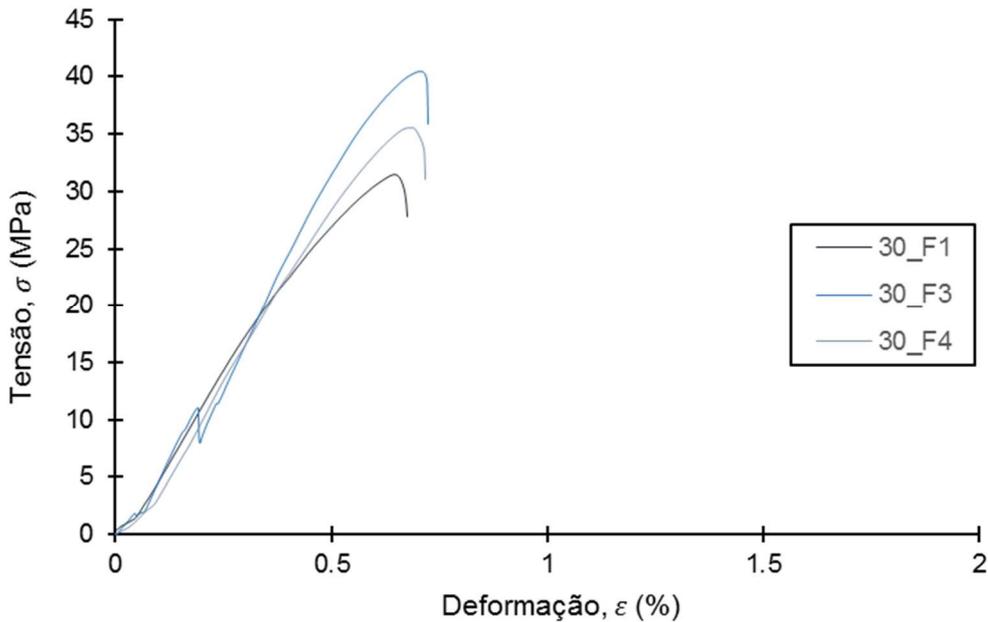


Figura 4.17 – Gráfico da curva tensão-deformação: ensaio à flexão da resina Sikadur-30®

Na Tabela 4.9 são apresentados os resultados que correspondem aos ensaios de resistência à flexão da resina Sikadur-30®.

Tabela 4.9 – Resumo dos resultados obtidos para os ensaios de flexão para a resina Sikadur-30®

Proвете	σ (MPa)	$\bar{\sigma}$ (MPa)	E (GPa)	\bar{E} (GPa)	s (GPa)	CV (%)
30_F1	31.14		6.27			
30_F3	40.44	35.71	4.27	5.41	0.84	6,43%
30_F4	35.54		5.70			

As propriedades para a resistência à flexão não podem ser comparadas com os valores apresentados nas fichas técnicas da resina estrutural em estudo, pelo facto de a mesma não exibir estas propriedades. É de realçar, o facto deste material não apresentar um limite de elasticidade bem definido e claro, visto que, este material apresenta um comportamento frágil, quando comparado com o comportamento à flexão da resina Sikadur-52®.

4.3. ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À FADIGA

4.3.1. ENSAIO DE FADIGA

Os ensaios de fadiga servem para a caracterização da resistência à fadiga de materiais estruturais. As curvas S-N de projeto são apresentadas na forma da Equação (2.2) e com a configuração apresentada na Figura 2.5, detalhado na secção 2.1.5. Os ensaios para a avaliação da resistência à fadiga foram executados de acordo com a norma americana ASTM D7791.

Os resultados dos ensaios de fadiga foram tratados estatisticamente conforme descrito na norma ASTM E739-91.

Os resultados dos ensaios de resistência à fadiga são geralmente apresentados sob a forma de curvas S-N que ilustram o relacionamento entre uma determinada gama de tensão aplicada, $\Delta\sigma$, e o número correspondente de ciclos até à rotura, N_f . Para representar esse comportamento, adota-se um modelo de regressão linear para a curva S-N média, dada pela seguinte equação:

$$Y = A + B * X \quad (4.7)$$

Com a variável dependente Y , e independente X , definida da seguinte forma:

$$X = \log \Delta\sigma ; Y = \log N_f \quad (4.8)$$

onde $\Delta\sigma$ corresponde à gama de tensão, sendo que, N_f é o numero de ciclos até à rotura.

Assim, com base nas equações indicadas anteriormente, 4.7 e 4.8, é possível reescrever as relações que representam as curvas S-N:

$$\log N_f = A + B * \log \Delta\sigma \quad (4.9)$$

ou

$$\log \Delta\sigma = -\frac{A}{B} + \frac{1}{B} * \log N_f \quad (4.10)$$

Tendo conhecimento que m e C representam as constantes que podem ser calculadas a partir dos parâmetros A e B da regressão linear, podemos obter as seguintes relações:

$$C = 10^A ; m = -B \quad (4.11)$$

Os parâmetros A e B podem ser determinados de acordo com as equações seguintes:

$$A = \bar{Y} - B * \bar{X} \quad (4.12)$$

$$B = \frac{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2} \quad (4.13)$$

X e Y representam os valores médios obtidos experimentalmente $X_i = \log \Delta\sigma_i$ e $Y_i = \log \Delta\sigma_i$, respetivamente, e k o numero de amostras que conduzem à rotura.

Por outro lado, foram definidas ainda bandas de confiança retilíneas para as curvas S-N, na medida em que, são comuns de serem apresentadas em códigos de projeto:

$$Y = A + B * X \pm \alpha * S = (A \pm \alpha * S) + B * X \quad (4.14)$$

α é um parâmetro que define as curvas de probabilidade de rotura, sendo que neste caso $\alpha = 2$ corresponderá a 95% e $\alpha = 3$ a 99% de probabilidade de rotura, e S é o desvio-padrão.

Nas Figuras 4.18 e 4.19 é possível observar o aspeto final dos provetes de resina Sikadur-52 e Sikadur-30, respetivamente, após a finalização dos ensaios com o objetivo de obter o comportamento dos materiais à fadiga.

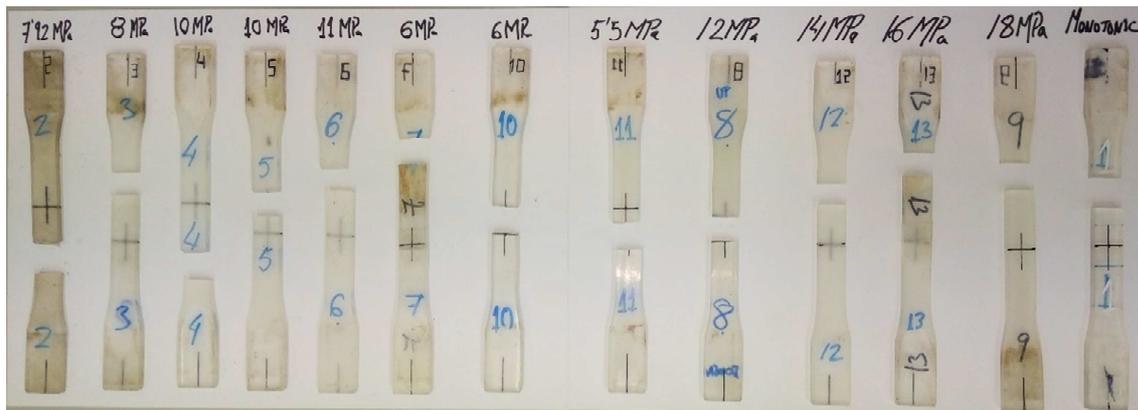


Figura 4.18 – Apresentação dos provetes dos ensaios de fadiga para a resina Sikadur-52®



Figura 4.19 – Apresentação dos provetes dos ensaios de fadiga para a resina Sikadur-30®

Assim, para executar uma correta análise dos resultados obtidos tendo em conta o material Sikadur-30®, não foram considerados os provetes identificados como 30_1 e 30_6, na medida em que ao apertar as amarras da máquina após a colocação dos provetes estes fraturaram na região próxima do aperto.

Relativamente aos provetes Sikadur-52®, o provete identificado como 52_1 foi utilizado para obter uma curva tipo tensão-deformação que representasse o material submetendo-o a um ensaio de tração para que a partir desses dados fosse possível selecionar os níveis de tensão aos quais os provetes iriam ser submetidos. Do mesmo modo, os resultados obtidos através dos provetes 52_4 e 52_2 não vão ter tomados em conta devido à presença de bolhas.

Para comprovar a existência de bolhas nos provetes excluídos recorreu-se à fratógrafia, sendo que esta ferramenta permite identificar os eventos ocorridos durante o processo de fratura como também os defeitos do material e outras anomalias que contribuem para o crescimento e término da rotura final. Assim, através das Figuras 4.20 e 4.21, identificam-se as bolhas presentes nos provetes 52_2 e 52_4, respetivamente.

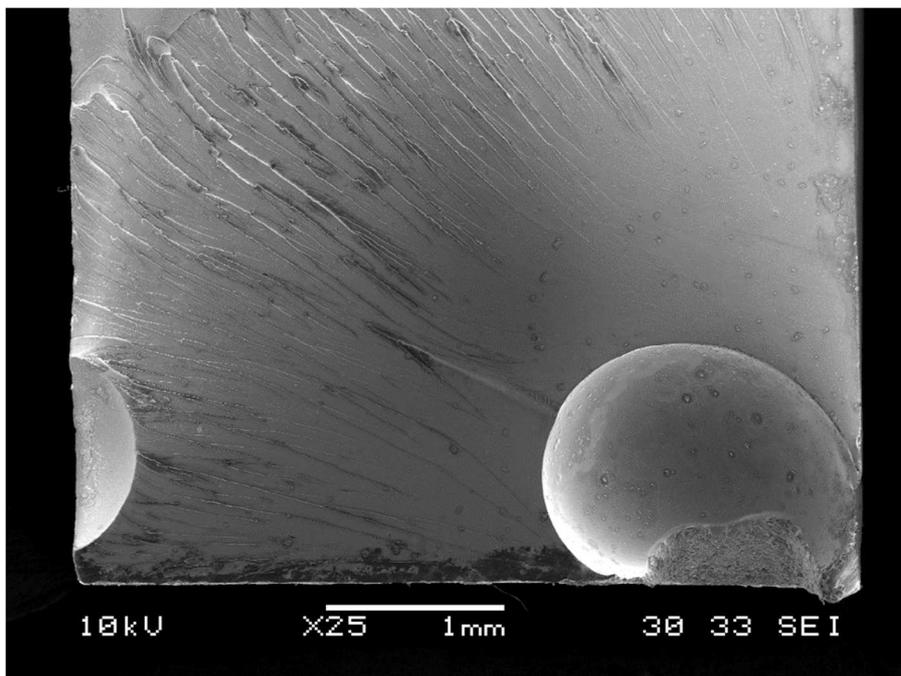


Figura 4.20 – Imagem fratógrafa da secção a onde ocorre a rotura para o provete 52_2

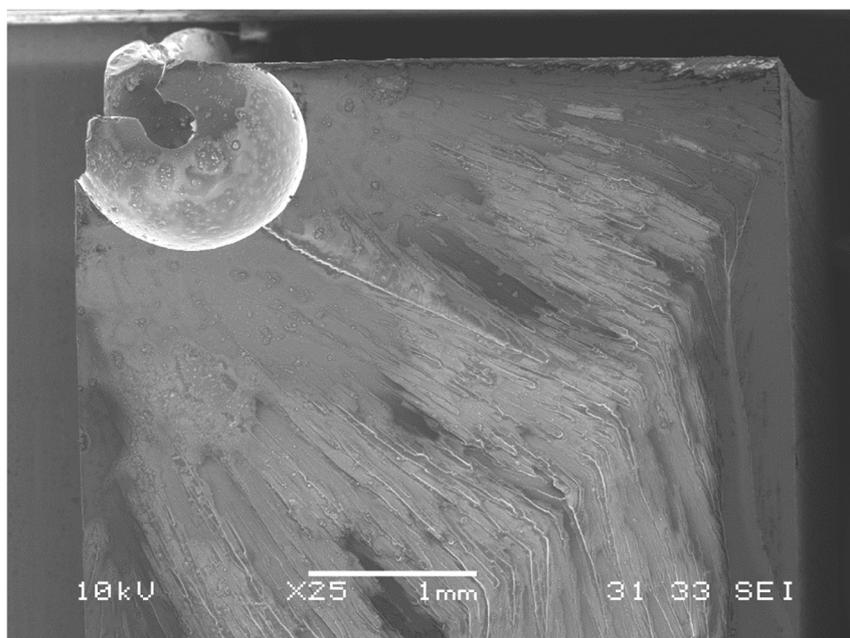


Figura 4.21 – Imagem fratógrafa da secção a onde ocorre a rotura para o provete 52_4

Nas Tabelas 4.10 e 4.11 são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à fadiga das resinas estruturais em estudo.

Tabela 4.10 – Resumo dos resultados obtidos para os ensaios de fadiga para a resina Sikadur-52®

Provete	R_σ	$F_{\text{máx}}$ (kN)	Amplitude, $\Delta F/2$ (kN)	ΔF (kN)	f (Hz)	σ_{max} (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	N_f
52-1		1.1000	0.5445	1.0890		16.629	-	-
52_2		0.4330	0.2143	0.4286		8.000	7.92	-
52_3		0.4097	0.2028	0.4056		8.081	8.00	49252
52_4		0.5384	0.2665	0.5330		10.101	10.00	-
52_5		0.5812	0.2877	0.5754		10.101	10.00	14866
52_6		0.6150	0.3044	0.6089		11.111	11.00	6151
52_7	0.01	0.3682	0.1823	0.3645	5	6.061	6.00	58684
52_8		0.6709	0.3321	0.6642		12.121	12.00	7174
52_9		1.1208	0.5548	1.1096		18.180	18.00	155
52_10		0.3970	0.1965	0.3930		6.061	6.00	330523
52_11		0.3057	0.1513	0.3026		5.556	5.50	383926
52_12		0.8018	0.3969	0.7938		14.141	14.00	5139
52_13		0.9164	0.4536	0.9072		16.162	16.00	2154

Tabela 4.11 – Resumo dos resultados obtidos para os ensaios de fadiga para a resina Sikadur-30®

Provete	R_σ	$F_{m\acute{a}x}$ (kN)	Amplitude, $\Delta F/2$ (kN)	ΔF (kN)	f (Hz)	σ_{max} (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	N_f
30_2	0.01	0.9901	0.4901	0.9802	2.5	14.65	14.50	575
30_3		0.8182	0.4050	0.8100		10.10	10.00	5088
30_4		0.7091	0.3510	0.7020		10.10	10.00	11418
30_5		0.6955	0.3443	0.6885		10.10	10.00	17978
30_6		1.1864	0.5873	1.1745		14.65	14.50	-
30_7		1.1468	0.5677	1.1354		14.65	14.50	107
30_8		1.1864	0.5873	1.1745		14.65	14.50	100
30_9		0.5568	0.2756	0.5512		8.08	8.00	113167
30_10		0.6436	0.3186	0.6372		8.08	8.00	35229
30_11		0.6000	0.2970	0.5940		8.08	8.00	292643
30_12		0.9028	0.4469	0.8938		12.63	12.050	-
30_13		0.8371	0.4144	0.8288		12.63	12.50	-

As curvas de percentis probabilísticos correspondentes a probabilidades de rotura de 1%, 5%, 50%, 95% e 99% ($p = 0,01$, $p = 0,05$, $p = 0,50$, $p = 0,95$ e $p = 0,99$) estão representadas nas Figuras 4.22 e 4.24 para as resinas Sikadur-52 e Sikadur-30, respetivamente. Os parâmetros da curva S-N deste modelo são obtidos para a curva percentil correspondendo a probabilidades de falha de 5%.

As curvas de percentis probabilísticos foram obtidas através de uma análise estatística, de acordo com o proposto pela norma ASTM E739-91. Com base nesta norma determinaram-se os parâmetros A e B , o desvio-padrão, S . Por conseguinte, foi possível obter as constantes das curvas S-N de projeto, C e m , para $\alpha = 2$. Os parâmetros e coeficientes indicados podem ser encontrados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Parâmetros das curvas S-N de projeto para a resina Sikadur-52®

A	B	S	$C (\alpha = 2)$	$m (\alpha = 2)$
*	*	*	MPa	-
1.7067	-0.1716	0.0616	38.32	5.83

* Resultados obtidos usando uma escala logarítmica

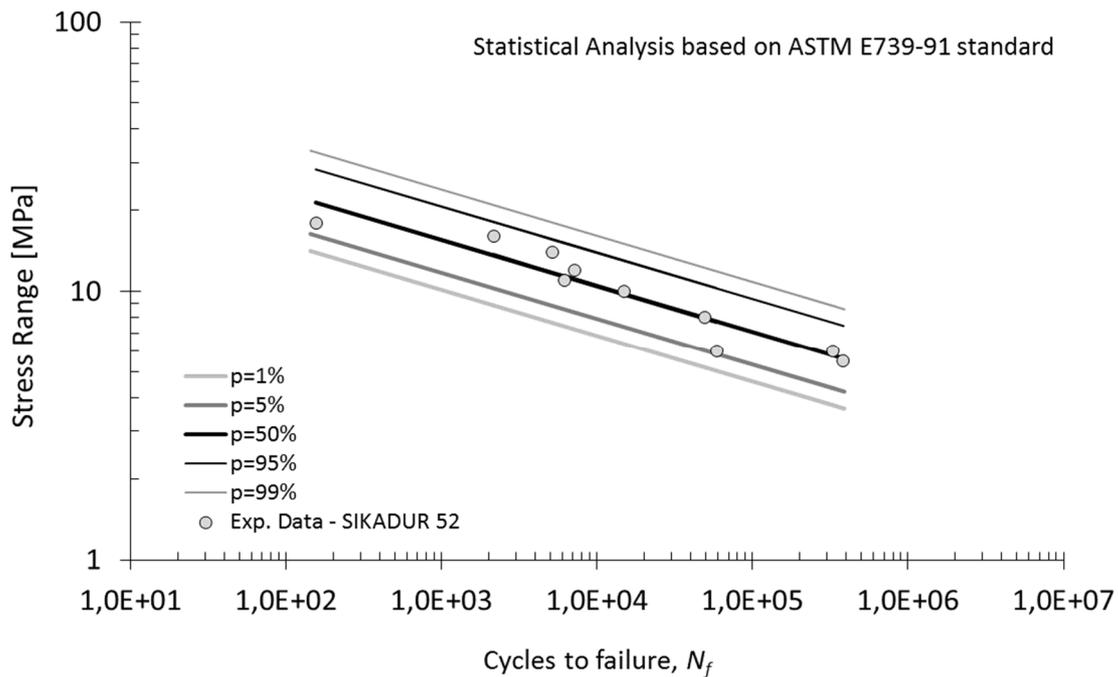


Figura 4.22 – Curvas de percentis probabilísticos correspondentes a diversas probabilidades de rotura para a resina Sikadur-52®

Uma vez determinadas as constantes C e m é possível determinar o valor correspondente para o limite de fadiga, $\Delta\sigma_0$. Para o número de ciclos até à rotura, N_f , igual a 2×10^6 é obtido a tensão limite de fadiga, $\Delta\sigma_0$, igual a 3 MPa.

Desta forma, a curva S-N de projeto que caracteriza o comportamento à fadiga do material Sikadur-52® é obtida. As expressões que descrevem a curva S-N de projeto, apresentada na Figura 4.23, é dada pelas seguintes equações:

$$y = 1.7067 - 0.1716 * x \quad (4.15)$$

$$\Delta\sigma^6 \cdot N_f = 38.32 \quad (4.16)$$

Na Figura 4.23 é apresentada a curva S-N de projeto e os resultados experimentais de fadiga para a resina Sikadur-52®, verificando-se que a curva de projeto proposta é representativa de todos os dados experimentais de fadiga.

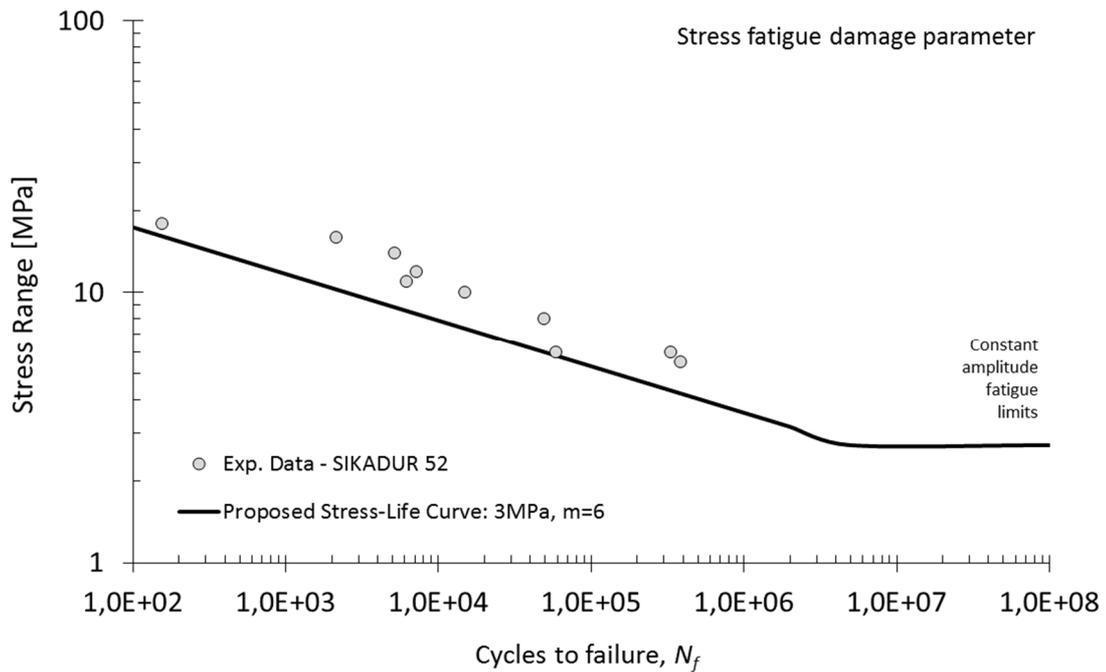


Figura 4.23 – Curva S-N obtida através de bandas de confiança retilíneas para a resina Sikadur-52®

Do mesmo modo, são obtidas as propriedades da análise estatística efetuada segundo as prescrições da norma americana ASTM E739-12, para os resultados experimentais de fadiga da resina Sikadur-30®. Os parâmetros A e B , bem como o desvio-padrão, S , e as constantes C e m , para $\alpha = 2$, são apresentadas na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Parâmetros das curvas S-N de projeto para a resina Sikadur-30®

A	B	S	C ($\alpha = 2.$)	m ($\alpha = 2.$)
*	*	*	MPa	-
1,3469	-0.0865	0.0331	19.09	11.56

* Resultados obtidos usando uma escala logarítmica.

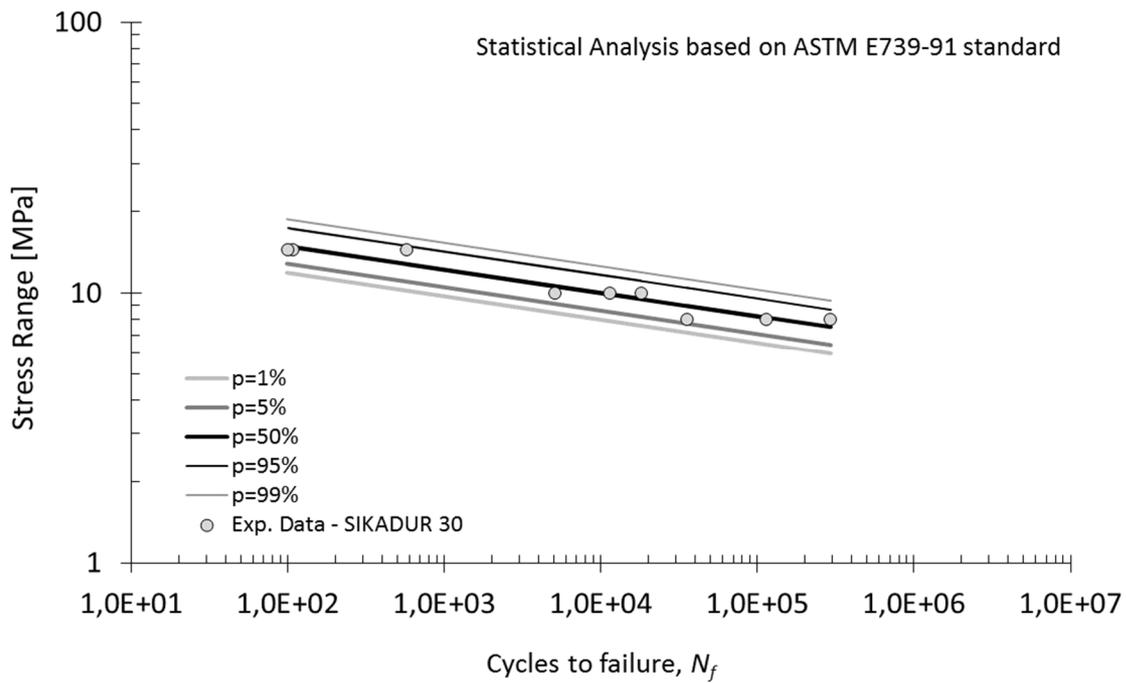


Figura 4.24 – Curvas de percentil correspondentes a diversas probabilidades de rotura para a resina Sikadur-30®

Como referido anteriormente, o limite de fadiga, $\Delta\sigma_0$, é representado por assíntota horizontal, e obtido considerando o numero de ciclos até à rotura igual a 2×10^6 . Para a resina Sikadur-30, a tensão limite de fadiga obtida corresponde ao valor de 5.5 MPa.

Deste modo, a curva S-N de fadiga proposta para o material Sikadur-30®, identificada na Figura 4.24, é dada pelas seguintes relações:

$$y = 1.3469 - 0.0865 * x \quad (4.17)$$

$$\Delta\sigma^{11} \cdot N_f = 19.1 \quad (4.18)$$

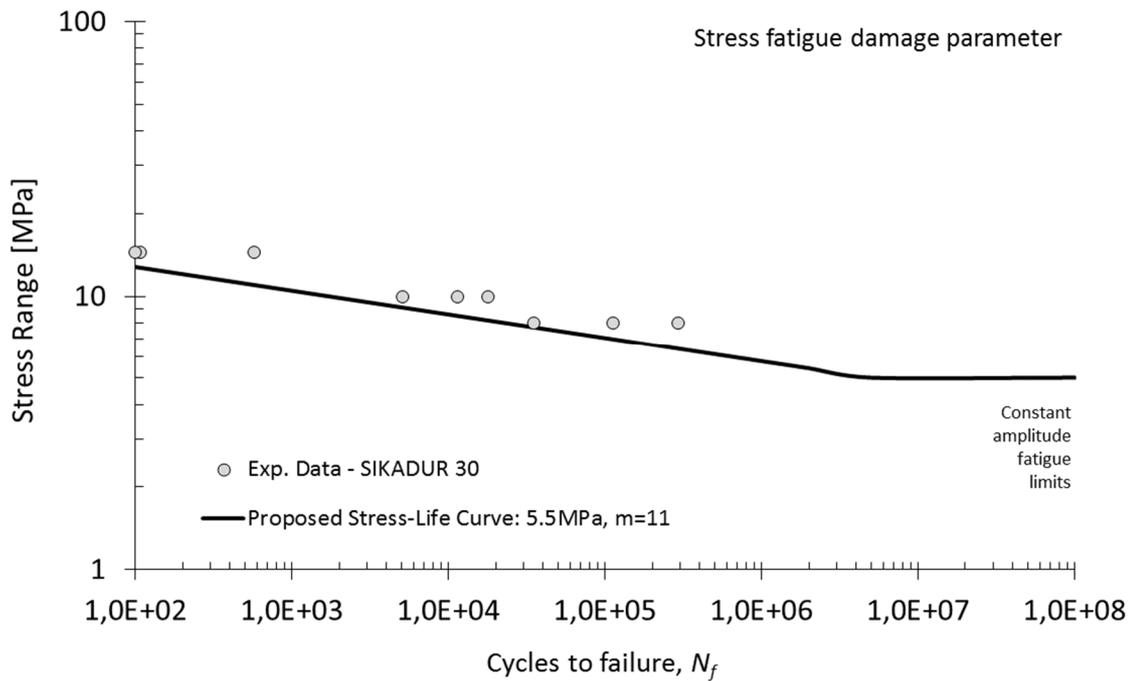


Figura 4.31 – Curva S-N de projeto proposta obtida através de bandas de confiança retílineas para a resina Sikadur-52®

As categorias de fadiga para os materiais Sikadur-52 e Sikadur-30 são obtidas considerando $N_f = 1 \times 10^6$, nas equações (4.16) e (4.18), resultando em valores de 3MPa e 5.5MPa, respetivamente.

Na Figura 4.32 estão apresentadas as duas curvas S-N médias para as resinas consideradas neste estudo. A resina Sikadur-52® apresenta um comportamento em regime de pequenos ciclos de fadiga melhor quando comparado com os resultados de fadiga obtidos para a resina Sikadur-30®. Por outro lado, quando se está perante o regime de elevado ciclos de fadiga a resina Sikadur-30® apresenta valores da gama de tensão mais elevados para os mesmos ciclos de rotura quando comparado com os resultados da resina Sikadur-52®.

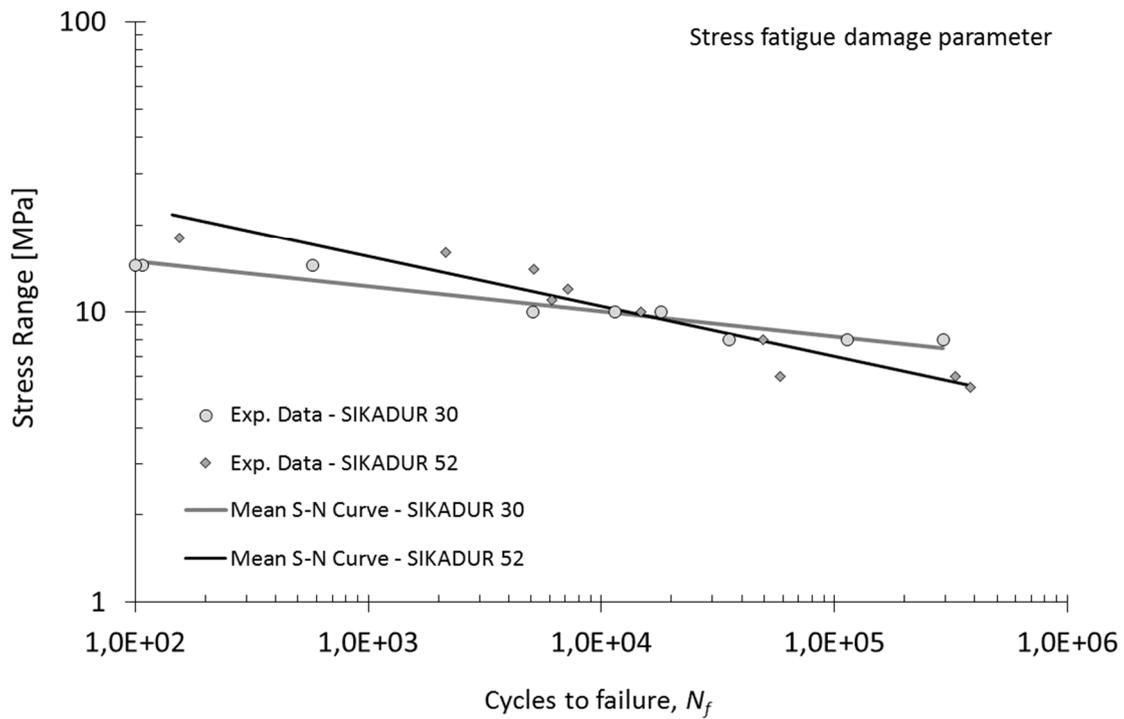


Figura 4.32 – Comparação das curvas S-N médias para as resinas Sikadur-52® e Sikadur-30®

4.4. RESUMO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA RESINA SIKADUR-52® E SIKADUR-30®

Na tabela 4.14 apresentam-se os resultados obtidos experimentalmente e os valores teóricos das características mecânicas da resina Sikadur52® e Sikadur-30®. É de notar que todos os valores obtidos através de ensaios experimentais presentes na tabela se referem aos percentis de 5% da distribuição estatística da lei normal.

Tabela 4.14 – Resumo das propriedades mecânicas da resina Sikadur-52® e Sikadur-30®

	Sikadur-52® (experimentais)	Sikadur-52® (teórico)	Sikadur-30® (experimentais)	Sikadur-30® (teórico)
σ_c (MPa)	11.38	34	29.54	85 – 95
σ_f (MPa)	33.04	41	31.58	26 – 31
σ_t (MPa)	8.45	24	12.94	-----
E_c (GPa)	0.53	-----	5.77	9.6
E_f (GPa)	0.86	-----	4.41	-----
E_t (GPa)	0.34	-----	4.23	11.2
ν_c	0.52	-----	0.29	-----
ν_f	-----	-----	-----	-----
ν_t	0.46	-----	0.13	-----

5

CONCLUSÕES

5.1. INTRODUÇÃO

Na presente dissertação foi realizada a caracterização do comportamento estático e à fadiga de duas resinas estruturais usadas em ligações aparafusadas com injeção de resina. Estas ligações são comumente utilizadas na substituição de ligações existentes de pontes metálicas antigas, em fase de reabilitação, bem como, em novas estruturas de engenharia.

Foram apresentados os resultados experimentais monotônicos e de fadiga dos dois materiais (Sikadur-30 e Sikadur-52) foram apresentados, bem como, a comparação com os valores de resistência das fichas técnicas dos produtos foi realizada. Para além disso, foram apresentadas as limitações encontradas no decurso do trabalho, bem como sugestões de melhoria para trabalhos futuros.

As conclusões são apresentadas na secção seguinte do presente capítulo, seguido de algumas propostas de trabalhos futuros possíveis de serem realizadas no âmbito de uma continuidade ao trabalho realizado nesta dissertação.

5.2. CONCLUSÕES FINAIS

A resina Sikadur-52® apresenta um comportamento dúctil a solicitações de tração, flexão, como também à compressão. É um material que adquire bastante capacidade de adaptação às condições decorrentes do decurso dos ensaios, de tal forma, que apresenta sempre elevada deformação a solicitações de flexão com capacidade resistente moderada.

Por outro lado, a resina Sikadur-30® apresenta um comportamento frágil quando é sujeita a solicitações de flexão e tração, isto é, com uma capacidade reduzida de se deformar, mas com capacidades resistentes elevadas.

Uma das principais conclusões que se retira após a comparação dos resultados monotônicos obtidos experimentalmente com os que são disponibilizados pela ficha técnica do produto, é que o material é sensível ao utilizador, ou seja, as características resistentes dependem das condições a que os materiais tiveram sujeitos durante a sua obtenção. Deste modo, para a sua utilização em obra é necessário efetuar alguns provetes para realizar ensaios em laboratório e se necessário reformular o projeto em fase de execução.

Relativamente aos ensaios de fadiga realizados, conclui-se que a resina Sikadur-52® apresenta melhores resultados para o regime de fadiga de baixo número de ciclos quando comparado com os

resultados de fadiga da resina Sikadur-30®. No entanto, para o regime de fadiga de elevado número de ciclos esse facto já não se verifica, pelo que a resina Sikadur-30 apresenta melhores resultados quando comparado com os resultados experimentais à fadiga da resina Sikadur-52.

Em suma, após a análise e comparação dos resultados obtidos experimentalmente das duas resinas em estudo conclui-se então que, provavelmente, a resina Sikadur-52 seria mais adequada para a sua utilização em parafusos de injeção e por outro lado, a resina Sikadur-30 para a aplicação de reforços.

5.3. PROPOSTAS DE MELHORIAS E TRABALHOS FUTUROS

Após a finalização deste trabalho podemos referenciar alguns aspetos que podem ser melhorados em trabalhos futuros a serem realizados. Deste modo, os moldes em alumínio produzidos são adequados para a resina Sikadur-52® visto tratar-se de uma resina com alguma capacidade de plastificação, o que facilita na descofragem dos provetes. Mas, por outro lado, para a resina Sikadur-30®, os moldes em alumínio não são uma solução muito viável pois trata-se de uma resina que ao secar torna-se muito dura (isto é, frágil) o que dificulta imenso a retirada dos provetes. Assim, para a moldagem de provetes de Sikadur-30 seria mais adequado a utilização de moldes em silicone de cofragem perdida.

É de notar também a dificuldade da criação de uma superfície completamente lisa nos provetes de Sikadur-30 criando muitas anormalidades ao longo do mesmo. Deste modo, uma solução provável seria a construção de moldes com entrada de resina pela zona lateral ficando deste modo apenas uma pequena face em contacto com o exterior.

Por fim, moldar um número maior de provetes do que o indicado pelas normas para fazer face a anormalidades que possam ocorrer durante o decurso dos ensaios experimentais.

Relativamente à continuidade que pode ser feita dos trabalhos de estudo do comportamento estático e à fadiga de resina a utilizar numa ligação aparafusada com injeção de resina sugerem-se os seguintes desenvolvimentos futuros:

- Realizar ensaios monotónicos de corte e de aderência das resinas a elementos metálicos;
- Efetuar novos ensaios experimentais à fadiga tendo em conta outras razões de tensão, bem como, efetuar ensaios de fadiga em controlo de deformação com o objetivo de obter curvas $r-N$ que relacionam os níveis de deformação máximos com o número de ciclos até à rotura;
- Analisar a influência do número de parafusos de ligações metálicas com parafusos injetados na vida total à fadiga;
- Estudar outros tipos de resina a utilizar em parafusos injetados;
- Estudar e calibrar a aderência e a adesibilidade entre a resina e o material metálico, através da realização de ensaios experimentais entre chapas metálicas e adesivo estrutural introduzido entre chapas.

6

REFERÊNCIAS

- Abdullah, N.N, Correia, J.F.O., de Jesus, A.M.P., Hafezi, M.H., Abdullah, S. “Assessment of fatigue crack growth data available for materials from Portuguese bridges based on UniGrow model”. *Procedia Eng* 10 (2011) 971–976.
- Albrecht P., Sahli A., Crute D., Albrecht Ph. and Evans B. (1984) “Application of Adhesives to Steel Bridges. Report No. FHWA/RD-84/073, Federal Highway Administration, McLean, Va., USA.
- Akesson, B. (1994). “Fatigue Life of Riveted Railway Bridges”. PhD Thesis, Chalmers University of Technology, Sweden.
- AASHTO. AASHTO LRFD: bridge design specification; 1995.
- ASTM (1972) “Standard definitions of terms relating to fatigue testing and stastical Analysis of Data”, E 1823. Annual Book of ASTM Standards, pgs. 72-206.
- ASTM (2002). “Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics” D695-02, USA.
- ASTM (2004). “Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (e-N) Fatigue Data” E739-91, USA.
- ASTM (2003). “Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Material” D790-03, USA.
- ASTM (2002). “Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics” D698-02a, USA.
- ASTM (2012). “Standard Test Method for Uniaxial Fatigue Properties of Plastics” D7791-12, USA.
- Coffin, L. (1954). “A Study of the Effects of the Thermal Stresses on a Ductile Metal”. *Translations of the ASME*, Vol. 76, pp. 931-950.
- British Standards Institution. BS 5400:– Steel, concrete and composite bridges: Part 10: Code of practice for fatigue. London: BSI. 1980.
- Correia, J. (2014). “An Integral Probabilistic Approach for Fatigue Lifetime Prediction of Mechanical and Structural Components”. PhD Thesis, Faculty of Engineering of the University of Porto, Porto.
- Correia, J.A.F.O., De Jesus, A.M.P., Fernández-Canteli, A. “A procedure to derive probabilistic fatigue crack propagation data”. *Int J Struct Integr* 3 (2) (2012) 158–183.
- Correia, J.A.F.O., De Jesus, A.M.P., Fernández-Canteli, A. “Local unified probabilistic model for fatigue crack initiation and propagation: Application to a notched geometry”. *Eng Struct* 52 (2013) 394–407.

- Correia, J.A.F.O., de Jesus, A.M.P., Fernández-Canteli, A., Calçada, R.A.B. “Modelling probabilistic fatigue crack propagation rates for a mild structural steel”. *Frattura ed Integrità Strutturale*, Volume 31, 1 January 2015, Pages 80-96.
- Correia J.A.F.O., De Jesus A.M.P., Pinto J.C.M., Calçada R.A.B., Pedrosa B., Rebelo C., Gervásio H., Simões da Silva L. “Fatigue behaviour of single and double shear connections with resin-Injected preloaded bolts”. 19th IABSE Congress, Stockholm, Sweden, September 21-23, 2016.
- Correia, J.A.F.O., De Jesus, A.M.P., Silva, A.L.L., Pedrosa, B., Rebelo, C., Calçada, R. “FE simulation of S-N curves for a riveted connection using two-stage fatigue models”. *Advances in Computational Design*, An International Journal, 2017, in press.
- Correia, J.A.F.O., Raposo, P., Muniz-Calvente, M., Blasón, S., Lesiuk, G., De Jesus, A.M.P., Moreira, P.M.G.P., Calçada, R.A.B., Fernández-Canteli, A. “A generalization of the fatigue Kohout-Véchet model for several fatigue damage parameters”. *Engineering Fracture Mechanics*, 2017, in press.
- Correia, J.A.F.O., Pedrosa, B., Raposo, P., De Jesus, A.M.P., Rebelo, C., Gervásio, H., Calçada, R., Simões da Silva, L. “Fatigue strength evaluation of resin-injected bolts connections using statistical analysis”. *Engineering*, 2017, in press.
- De Jesus, A.M.P., Correia, J.A.F.O. “Critical assessment of a local strain-based fatigue crack growth model using experimental data available for the P355NL1 steel”. *J Pressure Vessel Technol* 135 (1) (2013). 011404–1–0114041-9.
- De Jesus, A., Silva, J., Figueiredo, M., Ribeiro, A., Fernandes, A. and Correia, J. (2010). “Fatigue Behaviour of Resin-Injected Bolts: An Experimental Approach”. *Iberian Conference on Fracture and Structural Integrity*, Porto.
- European Committee for Standardisation, Eurocode 3: Design of steel structures. EN 2003-1-9: fatigue, Brussels, Belgium, 2003.
- ECCS (1994). “European Recommendations for Bolted Connections with Injection Bolts”. Publicação nº 79.
- Fernandes, A., De Jesus, A., Silva, A. and Correia, J. (2012). “Retrofitting of Old Riveted Portuguese Bridges. Past and Current Remnant Life Assessment Research”. 15th International Conference on Experimental Mechanics, Porto
- Gallegos Mayorga L., Sire S., Correia J.A.F.O., De Jesus A.M.P., Valente I., Rebelo C., Fernández-Canteli A., Ragueneau M., Plu B. “Design S-N Curves for Old Portuguese and French Riveted Bridges Connection Based on Statistical Analyses”. *Procedia Engineering*, Volume 160, 2016, Pages 77-84.
- Gallegos Mayorga L., Sire S., Correia J.A.F.O., De Jesus A.M.P., Rebelo C., Fernández-Canteli A., Ragueneau M., Plu B. “Statistical evaluation of fatigue strength of double shear riveted connections and crack growth rates of materials from old bridges”. *Engineering Fracture Mechanics*, 2017, in press.
- Gresnigt, A., Sedlacek, G. and Paschen, M. (2000). “Injection bolts to repair old bridges” (https://www.researchgate.net/publication/237456449_INJECTION_BOLTS_TO_REPAIR_OLD_BRIDGES) (2 de Junho, 2017).
- Hafezi, M.H., Abdullah, N.N., Correia, J.F.O., de Jesus, A.M.P. “An assessment of a strain-life approach for fatigue crack growth”. *Int J Struct Integr* 3 (4) (2012) 344–376.
- Hartshorn, S. R. (1986). *Structural adhesives: chemistry and technology*. Plenum Press, Universidade de Michigan

Huffman, P.J. “A strain energy based damage model for fatigue crack initiation and growth”. *International Journal of Fatigue* 88 (2016) 197–204.

Huffman, P., Correia, J.A.F.O., Mikheevskiy, S., De Jesus, A.M.P., Cicero, S., Fernández-Canteli, A., Berto, F., Glinka, G. “Fatigue evaluation of notched details based on unified local probabilistic approaches”. *International Symposium on Notch Fracture (ISNF2017)*, March 29th to 31st, 2017, Santander, Spain.

Huffman, P., Ferreira, J., Correia, J.A.F.O., De Jesus, A.M.P., Lesiuk, G., Berto, F., Fernández-Canteli, A., Glinka, G. “Fatigue Crack Propagation Prediction of a Pressure Vessel Mild Steel Based on a Strain Energy Density Model”. *Frattura ed Integrità Strutturale*, (2017), in press.

Kortiš J. (2011). “The Numerical Solution of the Bolted Connection with the Low-quality Injected Bolts”. *Proceedings of the 9th International Conference on New Trends in Statics and Dynamics of Buildings*. Bratislava, Slovakia.

Lockite Frekote PMC™. Ficha de produto. [https://tds.us.henkel.com/NA/UT/HNAUTTDS.nsf/web/068BE424DF089A188525715C001BD4C3/\\$File/FREKPMC-EN.pdf](https://tds.us.henkel.com/NA/UT/HNAUTTDS.nsf/web/068BE424DF089A188525715C001BD4C3/$File/FREKPMC-EN.pdf). (2 de Junho, 2017)

Lockite Frekote B-15™. Ficha de produto. [https://tds.us.henkel.com/NA/UT/HNAUTTDS.nsf/web/1CADBA14148320868525715C001BD3BD/\\$File/FREK%20B15-EN.pdf](https://tds.us.henkel.com/NA/UT/HNAUTTDS.nsf/web/1CADBA14148320868525715C001BD3BD/$File/FREK%20B15-EN.pdf). (2 de Junho, 2017)

Lockite Frekote 770-NC™. Ficha de produto. [https://tds.us.henkel.com/NA/UT/HNAUTTDS.nsf/web/3E88F872DD67B87A8525715C001BD4D5/\\$File/FREKOTE%20770-NC-EN.pdf](https://tds.us.henkel.com/NA/UT/HNAUTTDS.nsf/web/3E88F872DD67B87A8525715C001BD4D5/$File/FREKOTE%20770-NC-EN.pdf). (2 de Junho, 2017)

Manson, S. (1954). “Behaviour of Materials Under Conditions of Thermal Stress”, NACA, Technical Note No. 2933, National Advisory Committee for Aeronautics.

Mattes, J. (2007). “Substituição de Rebites por Parafusos Injectados com Resina”. Tese de Mestrado, 180 pag., IST/UTL, Lisboa

Miravalles, M. (2007). “The creep behaviour of adhesives”. Master’s Thesis. Chalmers University of Technology, Sweden

Nikolovski, T. (2009) “Technical information 01: Injection Bolts” <https://issuu.com/fakom/docs/ti-01-injectbolts-eng> (June 25th, 2016).

Noroozi, A.H., Glinka, G., Lambert, S. “A two parameter driving force for fatigue crack growth analysis”. *International Journal of Fatigue* 2005; 27: 1277-1296.

Pedrosa, P. “Fatigue Analysis of Bolted Connections with Adhesives”. MSc. Thesis, University of Coimbra, Portugal, 2016, p. 73.

Qureshi, J. and Mottram, J. (2012) “Resin injected bolted connections: A step towards achieving slip-resistant joints in FRP bridge engineering” *FRP Bridges 2012 Net Composites*. Raposo, P., Correia, J.A.F.O., De Jesus, A.M.P., Calçada, R.A.B., Lesiuk, G., Hebdon, M., Fernández-Canteli, A. “Probabilistic fatigue S-N curves derivation for notched components”. *Frattura ed Integrità Strutturale*, (2017), in press.

Ribeiro, A., Correia, J., Silva, A. and De Jesus, A. (2011). “Evolution of Fatigue History”. 21st Brazilian Congress of Mechanical, Natal.

Sampayo, L.M.C.M.V., Monteiro, P.M.F., Correia, J.A.F.O., Xavier, J.M.C., De Jesus, A.M.P., Fernández-Canteli, A., Calçada, R.A.B. “Probabilistic S-N field assessment for a notched plate made of puddle iron from the Eiffel bridge with an elliptical hole”. *Procedia Eng* 114 (2015) 691–698.

- Schijve, J. (2004). “Fatigue of Structures and Materials”. Kluwer Academic Publishers, New York.
- Sikadur®-30. Ficha de Produto. <http://prt.sika.com/dms/getredirect.get/pt01.webdms.sika.com/130> (2 de Junho, 2017).
- Sikadur®-52. Ficha de Produto. https://prt.sika.com/dms/...get/.../76.%20Sikadur%2052%20Injection_07.608.pd (2 de Junho, 2017).
- Silva, J. (2009). “Comparação Entre o Comportamento à Fadiga de Ligações Rebitadas e Aparafusadas” Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharias da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real.
- Xavier, J., Fernandes, A., Frazão, O., Morais, J. (2015). “Measuring mode I cohesive law of wood bonded joints based on digital image correlation and fibre Bragg grating sensors”. *Composite Structures*.
- Zarafi, B., Qureshi, J., Mottram, J. and Rusev, R. (2016). “Static and Fatigue Performance of Resin Injected Bolts for a Slip and Fatigue Resistant Connection in FRP Bridge Engineering” *Structures*, ISSN.