CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL NA RESISTÊNCIA À FADIGA DE JUNTAS METÁLICAS COLADAS

Alencar José Bernardino

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Orientadores:

Paulo Pedro Kenedi

Silvio Romero de Barros

Rio de Janeiro

Dezembro, 2015

INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL NA RESISTÊNCIA À FADIGA DE JUNTAS METÁLICAS COLADAS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Alencar José Bernardino

Aprovada por:

Prof. Paulo Pedro Kenedi, D.Sc. (Orientador)

Prof. Silvio Romero de Barros, D.Sc.(Corientador)

Prof. Hector Reynaldo Meneses Costa, D. Sc

Prof. Daniel Alves Castello, D. Sc. (UFRJ)

Rio de Janeiro

Dezembro, 2015

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

B523 Bernardino, Alencar José
Influência da rugosidade superficial na resistência à fadiga de juntas metálicas coladas / Alencar José Bernardino.—2015.
xii, 64f. + apêndices e anexo : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2015.
Bibliografia : f. 62-64
Orientadores : Paulo Pedro Kenedi
Silvio Romero de Barros

1. Engenharia mecânica. 2. Juntas adesivas. 3. Juntas adesivas – Fadiga. 4. Aspereza de superfície. 5. Resistência de materiais. I. Kenedi, Paulo Pedro (Orient.). II. Barros, Silvio Romero de (Orient.). III. Título.

CDD 668.3

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meus pais,

Edson e Sueli, que sempre me apoiaram,

e à minha esposa Tatiane e ao nosso filho Caio,

que nascerá em breve.

AGRADECIMENTOS

Agradecer primeiramente a Deus por me permitir o aperfeiçoamento pessoal e profissional.

À minha família, meus pais e minha esposa Tatiane, que sempre me motivaram e me ensinaram a nunca desistir dos meus objetivos.

Ao professor Kenedi pela orientação do meu trabalho e todo o incentivo à conclusão do mesmo.

Ao professor Sílvio pela orientação e apoio na realização dos ensaios experimentais.

Ao professor Luís Felipe, pela realização dos ensaios no laboratório.

Ao técnico de laboratório Hiron e Marcelo pela dedicação na execução dos ensaios

Ao Cefet-RJ por ter me proporcionado realizar este curso de Mestrado e minha graduação em Engenharia Mecânica.

Aos meus amigos Diego Meireles, Bruno Cavalcante e Bruno Lobão, que sempre me apoiaram para que eu não desistisse nas horas difíceis.

Ao laboratório de Adesão e Aderência da Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ) no campus de Nova Friburgo, pela confecção dos corpos de provas.

RESUMO

INFLUÊNCIA DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL NA RESISTÊNCIA À FADIGA DE JUNTAS METÁLICAS COLADAS

Alencar José Bernardino

Orientadores:

Paulo Pedro Kenedi

Sílvio Romero de Barros

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Os tratamentos superficiais aplicados aos substratos metálicos são importantes na determinação da qualidade de juntas coladas. A rugosidade resultante de tais tratamentos, em especial tratamentos mecânicos como o jateamento, têm influência direta na resistência mecânica da junta. Os efeitos dessa rugosidade superficial no comportamento da junta colada sobre carregamento estático já foram largamente estudados e vários resultados podem ser encontrados na literatura. Por outro lado, efeito da rugosidade no comportamento em fadiga desse tipo de união ainda merece investigações adicionais. Neste trabalho são apresentados resultados de ensaios de fadiga em juntas de aço coladas. Diferentes tipos de tratamento do substrato foram usados, com o objetivo de relacionar os parâmetros de rugosidade resultantes do tratamento mecânico com a resistência em fadiga da junta. O corpos de prova tratados com areia apresentaram o melhor desempenho em fadiga, porém, este tipo de tratamento está em desuso devido a danos à saúde. Os corpos de prova tratados com granalha também tiveram bom desempenho sem os problemas ambientais do tratamento por areia. Os corpos de prova tratados com MBX tiveram desempenho insatisfatório. Foi feito ainda um estudo da relação entre a variação de rigidez do corpo de prova e o aumento de tamanho de trinca do mesmo, buscando um modelo matemático de estimativa do tamanho da trinca ao longo de sua propagação.

Palavras-chave:

Juntas coladas; Resistência à fadiga; Tratamentos superficiais

Rio de Janeiro

Dezembro, 2015

ABSTRACT

ROUGHNESS SURFACE INFLUENCE ON FATIGUE RESISTANCE OF METAL BONDED JOINTS

Alencar José Bernardino

Advisors:

Paulo Pedro Kenedi

Sílvio Romero de Barros

Abstract of dissertation submitted to the Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais of Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET-RJ, as partial fulfillment of the requirements for the Master's degree in Mechanical Engineering and Materials Technology.

The surface treatments applied to metal substrates are important in determining the quality of bonded joints. The resulting roughness of such treatments, particularly mechanical treatments like sandblasting, directly influences the mechanical strength of the joint. The effects of surface roughness on the behavior of the bonded joint on static loading have been widely studied and various results can be found in the literature. Moreover, the effect of surface roughness in the fatigue behavior of this type of union deserves further investigation. In this paper results are presented of fatigue tests on steel bonded joints. Different types of treatment of the substrate were used, in order to relate the roughness parameters resulting from the mechanical treatment with the joint fatigue resistance. The sand-treated specimens showed the best performance in fatigue, however, this type of treatment is becoming in disuse to damage to health. The specimens treated with grit also performed well without the environmental problems of the treatment by sand. The specimens treated with MBX had poor performance. It was also made a study of the relationship between the variation of specimen stiffness and the crack size increase, seeking a mathematical model to estimate the size of the crack during propagation.

Keywords:

Bonded joints; Fatigue resistance; Surficial treatment

Rio de Janeiro

December, 2015

SUMÁRIO

Capítulo I - Introdução 1
I.1 Motivação 1
I.2 Objetivo 2
I.3 Organização do texto 3
Capítulo II – Revisão Bibliográfica 4
II.1 Vantagens da utilização de juntas adesivas 4
II.2 Desvantagens da utilização de juntas adesivas 5
II.3 Definições sobre uniões adesivas 5
II.4 Tratamentos superficiais 6
II.4.1 Tratamentos superficiais químicos 7
II.4.2 Tratamentos superficiais mecânicos 7
II.5 Fadiga e Mecânica da Fratura 7
II.5.1 Mecanismo de propagação de trinca de fadiga 8
II.6 Tipos de falhas em juntas coladas 8
II.7 Rugosidade 9
Capítulo III - Conceitos Básicos 11
III.1 Rigidez e Flexibilidade 11
III.2 Fadiga 12
III.3 Mecânica da Fratura 13
Capítulo IV – Materiais e Métodos 17
IV.1 Material dos c.p.s 17
IV.2 Adesivo 17
IV.3 A máquina de ensaios mecânicos 18
IV.4 Preparação dos c.p.s 19
IV.4.1 Jateamento com granalha 20
IV.4.2 Jateamento com Areia 21
IV.4.3 Escova rotativa MBX 22
Capítulo V – Modelos Analíticos 23
V.1 Modelos analíticos de força máxima 23
V.2 Modelos analíticos de estimativa de comprimento de trinca 25
V.2.1 Modelo analítico do método da linha elástica 26
V.2.2 Modelo analítico do método da viga conjugada 29
V.3 Comparação dos modelos analíticos de estimativa de comprimento de trinca em função da variação da rigidez com um software de Elementos Finitos 30
Capítulo VI - Resultados 32
VI.1 Resultados de Fadiga 32
VI.1.1 Estudo da rigidez experimental 33

VI.1.1.1 Variação da Rigidez dos c.p.s tratados com granalha..... 34
VI.1.1.2 Variação da Rigidez dos c.p.s tratados com areia 36
VI.1.1.3 Variação da Rigidez dos c.p.s tratados com escova rotativa MBX..... 38
VI.1.2 Comparativo de flexibilidade dos c.p.s entre faixas..... 40
VI.1.3 Curvas de Fadiga 45
VI.2 Resultados de Fratura 47
VI.2.1 Análise do comprimento das trincas..... 47
VI.2.2 Análise da fratura..... 50
VI.2.2.1 Corpos de provas tratados com granalha 51
VI.2.2.2 Corpos de prova tratados com areia..... 54
VI.2.2.3 Corpos de provas tratados com escova rotativa MBX..... 57
Capítulo VII – Conclusões..... 60
Sugestão para trabalhos futuros..... 61
Referências Bibliográficas..... 62
APÊNDICE A – Modelo em elementos finitos..... 65
APÊNDICE B – Método da linha elástica..... 68
APÊNDICE C – Método da viga conjugada..... 71
APÊNDICE D – Ensaio Estático..... 73
APÊNDICE E – Modelo de G..... 76
ANEXO A – Tabelas do software Wave Matrix..... 77

LISTA DE FIGURAS

Figura I.1: Exemplo de estrutura de fuselagem convencional reforçada por 'doubler'. (CIÊNCIA HOJE, 2014) 1

Figura I.2: Alguns pontos estruturais na lataria de automóveis onde se aplicam adesivos para aumentar a resistência. (NETO, 2010) 2

Figura I.3: - Visão geral dos reforços estruturais na lataria de automóveis. (NETO, 2010) 2

Figura II.1: União: (a) por rebites e (b) por adesivo estrutural. (DA SILVA, 2007) 4

Figura II.2: Variação das tensões ao longo de uma junta soldada. (DA SILVA, 2007) 4

Figura II.3: Força de corte em junta colada. (EDNESAJJAD, 2008) 5

Figura II.4: Forças de arrancamento e de clivagem. (EDNESAJJAD, 2008) 5

Figura II.5: Terminologia das partes de uma junta adesiva estrutural. (DE BARROS, 2014) 6

Figura II.6: Em uma junta ideal, espera-se que a fratura ocorra no adesivo.(DA SILVA, 2007) .. 6

Figura II.7: Falha (a) coesiva e (b) adesiva. Adaptado de (AFENDI, 2008) 9

Figura II.8: Rugosidade média (Ra). (AGOSTINHO, 1977) 9

Figura II.9: Rugosidade total (Rt). (AGOSTINHO, 1977) 10

Figura III.1: Gráficos esquemáticos de: (a) Rigidez e (b) Flexibilidade. 11

Figura III.2: Parâmetros do ensaio de fadiga. 12

Figura III.3: Viga bi-apoiada submetida a flexão de 3 pontos. (DE BARROS, 2005) 13

Figura III.4: Modelo de barra colada com trinca inicial. (DE BARROS, 2005). 14

Figura III.5: Ensaio em Modo I, com c.p. tipo DCB. (LADEVÈZE, 1995) 15

Figura III.6: Ensaio em modo II, ou com c.p. tipo ENF. (LADEVÈZE, 1995) 15

Figura III.7: Ensaio em modo misto, ou MMF. (DE BARROS, 2005) 16

Figura IV.1: Servo-hidráulica Instron 8801 18

Figura IV.2: Ilustração do c.p. em aço A36. (ADAPTADO DE: CHAVES, 2013) 19

Figura IV.3: Imagem real do c.p. em aço A36. 19

Figura IV.4: Perfis de rugosidade. (CATÁLOGO TUPY, 2015) 21

Figura IV.5: (a) Rugosímetro portátil e (b) perfil da chapa tratada. 21

Figura IV.6: (a) Processo de jateamento abrasivo com areia e (b) jateamento com escova rotativa. 22
Figura V.1: Modelo de viga não trincada. (ADAPTADO DE: CHAVES, 2013) 23
Figura V.2: Modelo de viga trincada. (ADAPTADO DE: CHAVES, 2013) 24
Figura V.3: Configuração proposta por RUSSELL (37). (ADAPTADO DE: CHAVES, 2013)..... 25
Figura V.4: Modelo de viga em modo ENF para o Método da linha elástica. 26
Figura V.5: Deflexões para a =: (a) 0 mm, (b) 20 mm, (c) 40 mm, (d) 60 mm e (e) 80 mm. 27
Figura V.6: Modelo de viga para um c.p. tipo ENF para o método da viga conjugada. 29
Figura V.7: Resultados de rigidez e tamanho de trinca no c.p, de E.F..... 30
Figura VI.1: Capturas dos ciclos iniciais e finais dos c.p.s tratados com granalha nos diferentes níveis de tensão. 35
Figura VI.2: Capturas dos ciclos iniciais e finais dos c.p.s tratados com granalha nos diferentes níveis de tensão. 37
Figura VI.3: Capturas dos ciclos iniciais e finais dos c.p.s tratados com escova rotativa nos diferentes níveis de tensão..... 39
Figura VI.4: Flexibilidade versus nº de ciclos para a faixa 5. 40
Figura VI.5: Flexibilidade versus nº de ciclos para a faixa 6. 41
Figura VI.6: Flexibilidade versus nº de ciclos para a faixa 7. 41
Figura VI.7: Flexibilidade versus nº de ciclos para a faixa 8. 42
Figura VI.8 Variação da rigidez em uma curva carga x deslocamento em um mesmo ciclo. 44
Figura VI.9: Gráfico percentual de carga versus número de ciclos para c.p.s com três acabamentos superficiais distintos. 45
Figura VI.10: Exemplo de medição das trincas..... 47
Figura VI.11: Tamanhos de trinca propagados em cada tipo de tratamento. 48
Figura VI.12: Número de ciclos desenvolvido por percentual de carga para cada tipo de tratamento. 49
Figura VI.13: Subdivisões da fratura no c.p. tratados com: (a) granalha, (b) areia e (c) escova rotativa. 50

Figura VI.14: Imagem de fratura e curva de carga x deslocamento do c.p. nº 2 da faixa 7. 52

Figura VI.15: Imagem de fratura e curva de carga x deslocamento do c.p. nº 4 da faixa 8. 53

Figura VI.16: Ampliação da região 2 do c.p. nº 4 da faixa 8..... 54

Figura VI.17: “Dente” formado durante a propagação da trinca. 544

Figura VI.18: Imagem de fratura e curva de carga x deslocamento do c.p. nº 3 da faixa 6. 55

Figura VI.19: Imagem de fratura e curva de carga x deslocamento de c.p. nº 3 da faixa 7. 56

Figura VI.20: Imagem de fratura e curva de carga x deslocamento de c.p. nº 1 da faixa 5. 57

Figura VI.21: Imagem de fratura e curva de carga x deslocamento de c.p. nº 2 da faixa 7. 58

Figura VI.22: Imagem de fratura e curva de carga x deslocamento de c.p. nº 3 da faixa 8. 60

LISTA DE TABELAS

Tabela IV.1: Composição química do aço A36. 17

Tabela IV.2: Propriedades Mecânicas do aço A36. 17

Tabela IV.3: Propriedades do Material Curado. (NOVATEC)..... 18

Tabela IV.4 – Valores de rugosidades medidos 22

Tabela V.2: Relação de rigidezes por tamanho de trinca no modelo em E.F. 31

Tabela VI.1: Dados obtidos dos ensaios de fadiga em c.p.s tratados com granalha (A), areia (B) e escova rotativa (C). 32

Tabela VI.2a: Rigidezes e tamanhos de trinca na faixa 5. 42

Tabela VI.2b: Rigidezes e tamanhos de trinca na faixa 6. 43

Tabela VI.2c: Rigidezes e tamanhos de trinca na faixa 7. 43

Tabela VI.2d: Rigidezes e tamanhos de trinca na faixa 8. 43

Tabela VI.3: Comprimento de propagação de trincas. 47

Capítulo I - Introdução

I.1 Motivação

A tecnologia de ligação por adesivos estruturais constitui em uma abordagem emergente que permite solucionar muitos problemas associados às técnicas tradicionais de ligação, como parafusos, rebites e soldagem. A indústria aeronáutica tem sido pioneira no estudo e desenvolvimento de juntas coladas, pois as mesmas produzem uma redução de peso considerável em relação aos métodos tradicionais. Isso pode levar a economia de combustível, que por sua vez pode baratear o custo de uma passagem aérea, por exemplo, gerando assim um grande impacto nos custos operacionais. Aliado a isso, pode-se obter maiores resistências mecânicas e a fadiga com esse método de união. CIÊNCIA HOJE (2014)

ADAMS (2006) apontou em seus estudos características como flexibilidade no design de peças, alta resistência a variação de tensões e excelente resistência a fadiga em relação aos métodos tradicionais.

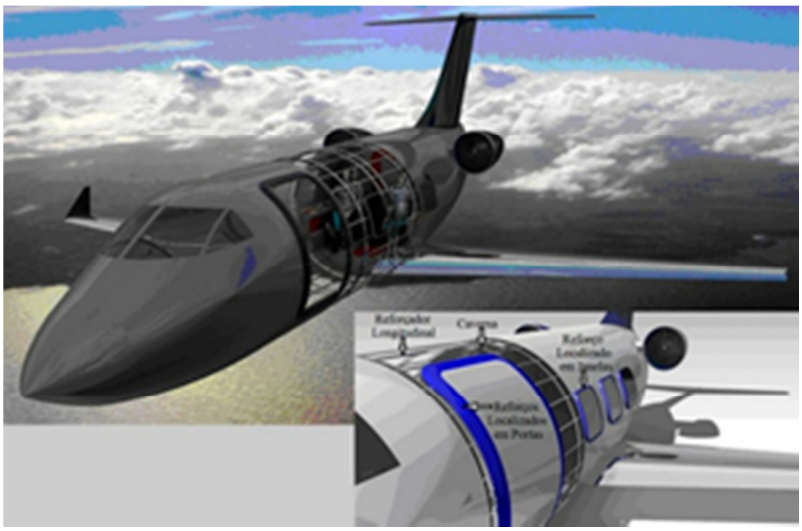


Figura I.1: Exemplo de estrutura de fuselagem convencional reforçada por '*doubler*'. (CIÊNCIA HOJE, 2014)

A indústria automobilística também têm utilizado com frequência juntas adesivas na união de chaparias e materiais poliméricos, visando também a redução de peso e a otimização da produção. As Figuras I.2 e I.3 ilustram partes da lataria de automóveis onde é possível fazer o uso de colagem.



Figura I.2: Alguns pontos estruturais na lataria de automóveis onde se aplicam adesivos para aumentar a resistência. (NETO, 2010)

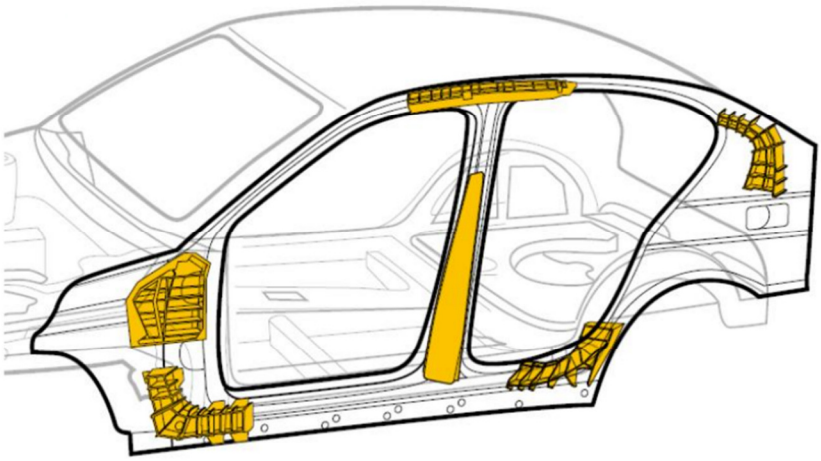


Figura I.3: - Visão geral dos reforços estruturais na lataria de automóveis. (NETO, 2010)

I.2 Objetivo

O objetivo deste trabalho é realizar estudos em juntas coladas com adesivo epóxi tratadas superficialmente por três diferentes tipos de processos, de forma a avaliar o desempenho em fadiga das juntas coladas.

Na literatura já existem trabalhos que abordam essa questão do comportamento de juntas coladas submetidas a carregamento estático, porém para carregamento de fadiga, ainda muito pouco foi explorado.

Os materiais utilizados nesta dissertação já são amplamente utilizados na indústria, o que reforça a importância de se explorar a fundo a utilização destes materiais com carregamento de fadiga.

I.3 Organização do texto

O texto desta dissertação divide-se da seguinte forma:

O Capítulo I faz uma breve introdução ao tema do trabalho.

O Capítulo II faz uma breve revisão bibliográfica, explanação dos termos e definições usados em colagem industrial, citando vantagens e desvantagens em se utilizar adesivos, abordando a temática dos tratamentos superficiais, rugosidade e tipos de fratura de peças coladas.

O Capítulo III aborda conceitos básicos de rigidez, flexibilidade, fadiga e mecânica da fratura.

O Capítulo IV aborda os materiais usados como substrato e adesivo, a máquina de ensaios mecânicos utilizada e os diversos tipos de jateamento utilizados nos corpos de prova (c.p.s).

O Capítulo V apresenta alguns modelos analíticos.

O Capítulo VI apresenta os resultados dos testes de fadiga nos c.p.s e são apresentados e comentados as superfícies geradas pela fratura dos c.p.s.

O Capítulo VII trata das conclusões.

Por último, são sugeridos temas para trabalhos futuros.

Capítulo II – Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são apresentadas as principais características de juntas adesivas e a nomenclatura utilizada pela área.

II.1 Vantagens da utilização de juntas adesivas

As principais vantagens das uniões adesivas estruturais são:

A distribuição uniforme de tensões ao longo da área ligada, uma vez que o adesivo abrange uma grande área da peça a ser colada, ao contrário da união por parafusos e rebites, onde as forças ficam concentradas nas pequenas áreas destes, como mostrado na Fig. II.1.

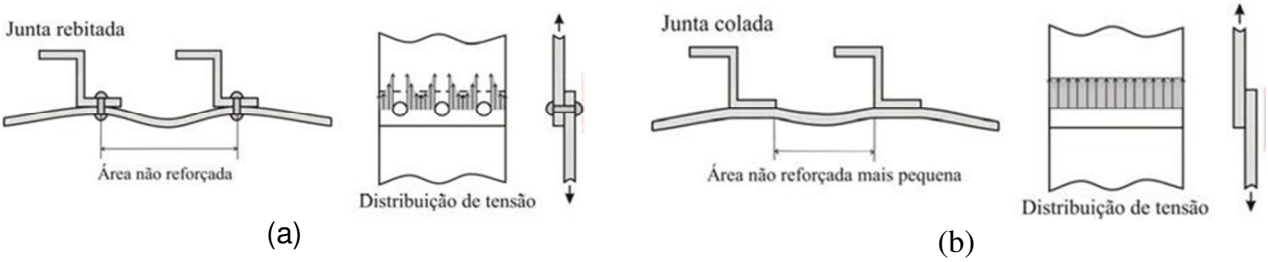


Figura II.1: União: (a) por rebites e (b) por adesivo estrutural. (DA SILVA, 2007)

Não há formação de ZTA, uma vez que as temperaturas de trabalho não atingem a temperatura de austenitização do material. Também não há riscos de trincamentos da peça, já que não há mudança na microestrutura da peça, como ocorre em união por soldagem, conforme a Fig. II.2.

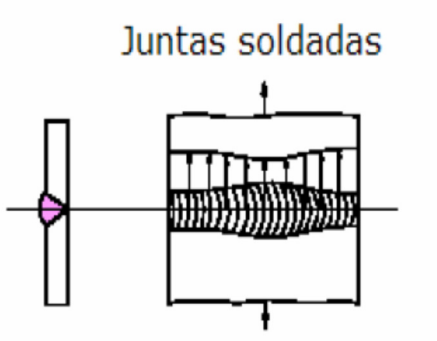


Figura II.2: Variação das tensões ao longo de uma junta soldada. (DA SILVA, 2007)

As juntas adesivas estruturais possibilitam o amortecimento de vibrações, o que permite que tensões sejam parcialmente absorvidas, melhorando assim a resistência à fadiga dos componentes ligados.

São possíveis a ligação de materiais diferentes, inclusive materiais não metálicos.

Ótima resistência às forças de cisalhamento (ou corte), como ilustra a Fig. II.3.



Figura II.3: Força de corte em junta colada. (EDNESAJJAD, 2008)

II.2 Desvantagens da utilização de juntas adesivas

As principais desvantagens das uniões adesivas são:

Baixa resistência às forças de arrancamento, clivagem e impacto, como ilustra a Fig. II.4. Quando um dos materiais não é rígido, a união colada fica sujeita a forças de arrancamento. Quando são rígidos, a ligação fica sujeita a forças de clivagem.



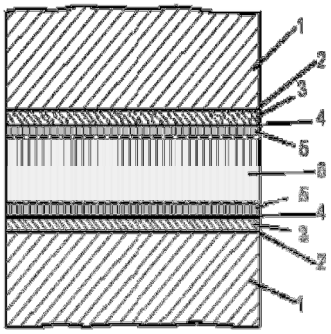
Figura II.4: Forças de arrancamento e de clivagem. (EDNESAJJAD, 2008)

Condições extremas como calor e umidade podem comprometer a união adesiva, como estudado por ASP (1997) e KINLOCH (1996).

É necessário tratamento superficial cuidadoso antes da junção das superfícies aderentes, para que haja melhor aderência entre as superfícies.

II.3 Definições sobre uniões adesivas

A união adesiva é formada basicamente por dois componentes: o substrato ou aderente; e o adesivo. O substrato é o material a ser colado, e o adesivo é o material que fará a ligação entre os mesmos. Entre o adesivo e o aderente existem ainda outros dois componentes, são eles: o óxido, que é formado na superfície da peça e a interface óxido/aderente, conforme a Fig. II.5.



1 Aderente
2 Interface aderente/óxido
3 Óxido
4 Interface óxido/adesivo
5 Adesivo próximo da interface
6 Adesivo

Figura II.5: Terminologia das partes de uma junta adesiva estrutural. (DE BARROS, 2014)

A existência de óxidos na superfície do aderente reforça a necessidade de tratamento superficial prévio para garantir uma melhor penetração do adesivo na superfície dos mesmos.

II.4 Tratamentos superficiais

Os tratamentos superficiais são geralmente necessários em juntas metálicas coladas, pois visam aumentar a aderência entre o adesivo e o aderente. São geralmente associados tratamentos superficiais mecânicos, onde há a remoção de material através de atrito mecânico, e tratamentos químicos, que visam a remoção de óxidos e outros tipos de camadas fracas.

Segundo estudos de UNDERHILL (2006), o desenvolvimento de tratamentos superficiais para colagem de estruturas aeronáuticas é de suma importância para se evitar o uso de componentes à base de cromo, que é altamente danoso ao meio ambiente. Estudos foram feitos comparando corpos de provas (c.p.s) em ambientes secos e em ambientes molhados e ficou provada a melhoria no desempenho à fadiga de juntas tratadas superficialmente. O principal objetivo da preparação superficial é garantir que a adesão seja feita de tal forma que o elo mais fraco da junta seja o adesivo, ou seja, que no caso de fratura, que esta ocorra no adesivo, como mostrado na Fig. II.6.

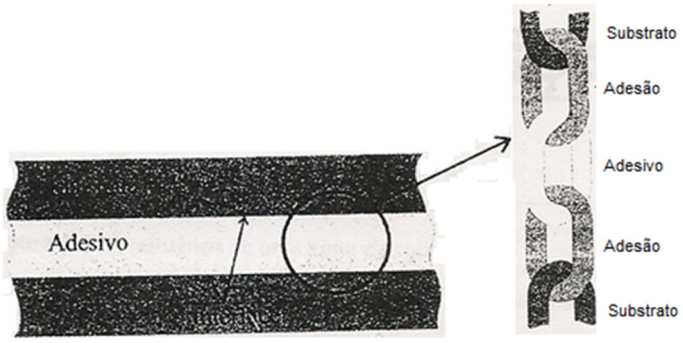


Figura II.6: Em uma junta ideal, espera-se que a fratura ocorra no adesivo.(DA SILVA, 2007)

II.4.1 Tratamentos superficiais químicos

Os tratamentos superficiais químicos são assim chamados, pois são procedimentos que não arrancam material da superfície, mas ainda assim podem alterar as características da mesma. Dentre um desses tratamentos, estão os à base de cromo, ou *chromic-acidetch* (CAE), conforme estudado por ADAMS (2006), que submeteu juntas do tipo *double cantilever beam* (DCB) a carregamento cíclico aplicando diferentes tratamentos superficiais em ambiente com alta e baixa umidade relativa, chegando a conclusão que as juntas tratadas quimicamente apresentaram melhor desempenho do que as demais juntas.

SALEEMA (2012) realizou estudos com placas coladas de alumínio com adesivo epóxi, submetidas a um ensaio de arrancamento, ou *single lap shear* (SLS) *test*, as quais sofreram tratamentos superficiais químicos com hidróxido de sódio (NaOH). O autor variou o tempo de exposição à solução em 5, 30 e 60 minutos, onde o mesmo pôde identificar o tempo ideal de tratamento foi de 30 minutos. PROLONGO *et al*. (2008) também realizaram relevantes estudos utilizando tratamentos superficiais químicos em c.p.s, provando uma melhor eficiência se comparado com aqueles apenas tratados mecanicamente.

Os tratamentos químicos também controlam e protegem os substratos antes da união e impedem a modificação da superfície após a junta ser posta em serviço.

II.4.2 Tratamentos superficiais mecânicos

Os tratamentos superficiais mecânicos trabalham com a remoção de material e alteração do relevo da superfície da junta. Os mais utilizados atualmente são o jateamento com areia e o jateamento com granalha, estando o primeiro em entrando em desuso devido a questões de saúde/ambientais. O tratamento com escova rotativa MBX também pode ser utilizado para esta finalidade. Esses tratamentos são geralmente seguidos por desengraxamento ou aplicação de acetona, os quais não se caracterizam como tratamentos químicos por não alterarem as propriedades da superfície da peça. Posteriormente é aplicada a camada de adesivo à peça.

II.5 Fadiga e Mecânica da Fratura

É conhecido o fato que um componente ou estrutura submetida a carregamentos repetidos ou flutuantes pode romper-se sob uma carga muito inferior àquela necessária para causar a sua falha estática. As falhas mecânicas decorrentes destas condições de carregamento são chamadas falhas por fadiga.

Fadiga corresponde a uma mudança estrutural progressiva, localizada e permanente que ocorre nos materiais sujeitos a tensões e deformações flutuantes, as quais resultam em trincas após um número suficiente de ciclos de carregamento.

A falha por fadiga é preocupante, pois pode provocar o colapso da estrutura sem qualquer aviso prévio facilmente reconhecível ou deformação plástica visível.

II.5.1 Mecanismo de propagação de trinca de fadiga

O mecanismo de fadiga envolve as seguintes fases sucessivas: nucleação da trinca de fadiga, que é tratada em Fadiga, e a propagação dessa trinca e ruptura final do componente, que são tratados em Mecânica da Fratura. É importante salientar que a presença de defeitos pode reduzir ou eliminar a fase de iniciação, a qual pode ocupar cerca de 90% da vida cíclica, prevista pelos ensaios clássicos realizados em c.p.s isentos de defeitos. Deste modo, na presença de defeitos, a vida útil é principalmente dependente da velocidade de propagação de trincas preexistentes e/ou do seu tamanho inicial.

A iniciação de uma trinca por fadiga ocorre para a maioria dos materiais, a partir de descontinuidades ou defeitos, que podem estar localizadas à superfície ou no interior do material. Numa peça desprovida de defeitos internos, a trinca de fadiga inicia-se preferencialmente na superfície da peça, num local onde a tensão seja máxima. A nucleação de trincas de fadiga à superfície é facilitada pelo fato da deformação plástica dos grãos cristalinos que se encontram à superfície, ser mais fácil que os localizados no interior, uma vez que os grãos superficiais, por se encontrarem na superfície livre, deformarem-se sem encontrar resistência. ROSA (2002)

II.6 Tipos de falhas em juntas coladas

Quando submetida a carregamentos, uma junta colada pode sofrer fratura de três tipos, são elas: coesiva, adesiva, também conhecida como interfacial; e mista, que é uma combinação das duas anteriores.

A fratura coesiva é caracterizada por se localizar no interior do adesivo, ou seja, é o rompimento das ligações atômicas do material da cola. Numa junta colada, esse é o tipo mais esperado de fratura, já que garante que não haverá rompimento do substrato da junta.

Já a fratura adesiva ou interfacial é caracterizada por uma má adesão do adesivo ao substrato. É caracterizada pelo descolamento do adesivo da peça à qual foi aplicado, como mostrado esquematicamente na Fig. II.7.

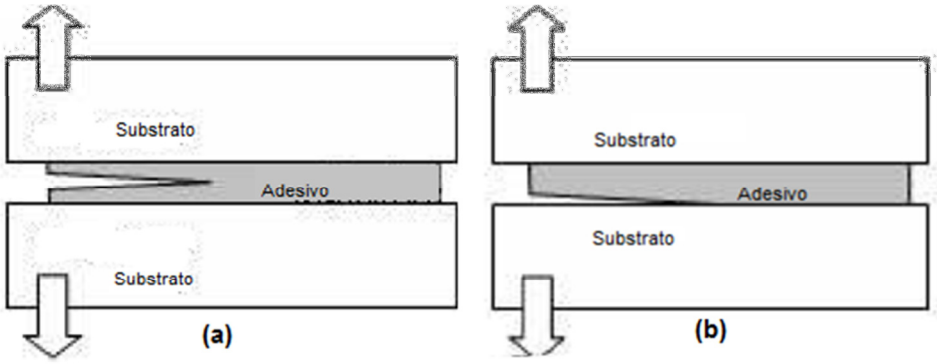


Figura II.7: Falha (a) coesiva e (b) adesiva. Adaptado de (AFENDI, 2008).

II.7 Rugosidade

A rugosidade é o conjunto de irregularidades, isto é, pequenas saliências (picos) e reentrâncias (vales) que caracterizam uma superfície. Essas irregularidades podem ser avaliadas com aparelhos de medição, como por exemplo, o rugosímetro. Desempenha um papel importante no comportamento dos componentes mecânicos, influindo, por exemplo, na resistência à corrosão e à fadiga e na qualidade da aderência de adesivos à superfície. (AGOSTINHO, 1977)

Os parâmetros de rugosidade utilizados neste trabalho serão a rugosidade média (Ra) e a rugosidade total (Rt), ambos medidos em micrometros (μm).

A rugosidade média é determinada em função da linha média (M) do perfil de rugosidade. Matematicamente é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (yi), dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição (lm). Essa grandeza pode corresponder à altura de um retângulo, cuja área é igual à soma absoluta das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e pela linha média, tendo por comprimento o percurso de medição (lm), como ilustra a Fig. II.8. (AGOSTINHO, 1977)

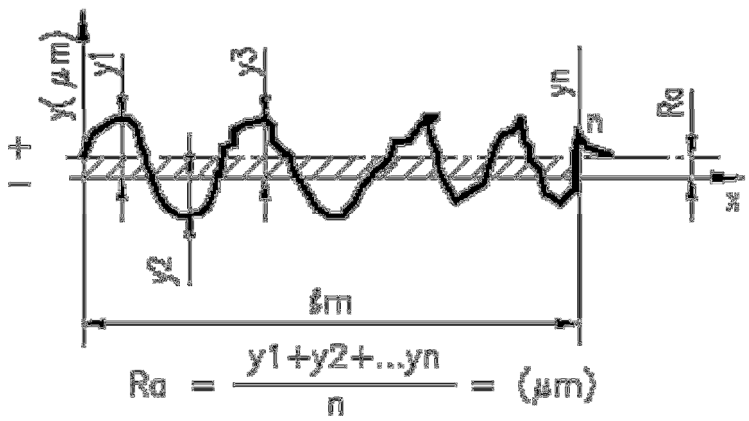


Figura II.8: Rugosidade média (Ra). (AGOSTINHO, 1977)

A rugosidade total corresponde à distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação (lm), independentemente dos valores de rugosidade parcial (Z_i). A Fig. II.9 ilustra este tipo de medição.

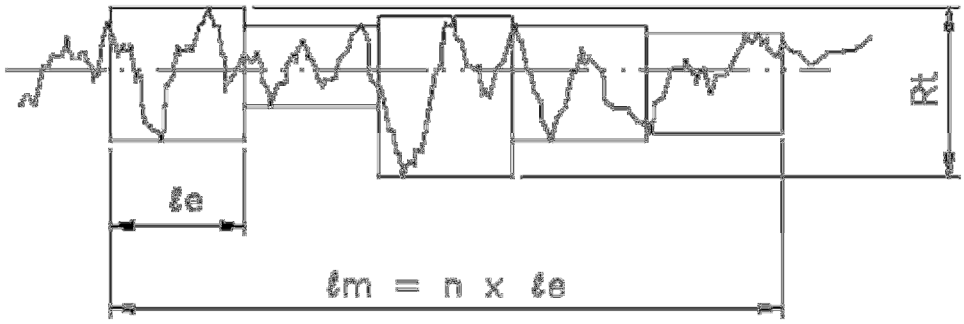


Figura II.9: Rugosidade total (Rt). (AGOSTINHO, 1977)

No próximo capítulo, de Conceitos Básicos, apresentam-se, preliminarmente, alguns tópicos importantes para o desenvolvimento deste trabalho.

Capítulo III - Conceitos Básicos

Para descrever o comportamento de uma trinca em uma junta adesiva estrutural se faz necessário utilizar alguns conceitos, que serão introduzidos neste capítulo. A rigidez e a flexibilidade serão utilizadas tanto como método indireto da medição de tamanho de trincas em c.p.s quanto como pré-requisito para abordagem de taxa de energia dissipada por unidade de área $\mathcal{G}$. Os conceitos de fadiga serão também introduzidos para entendimento dos parâmetros utilizados nos ensaios de fadiga realizados, bem como auxílio para análise dos resultados obtidos. A mecânica da fratura será introduzida apenas em uma de suas vertentes, a da taxa de energia dissipada por unidade de área $\mathcal{G}$, além de tipos de c.p.s usualmente utilizados na área de testes de juntas adesivas sob carregamento cíclico.

III.1 Rigidez e Flexibilidade

Neste trabalho, há a necessidade de estimar-se a rigidez dos c.p.s de juntas metálicas coladas durante os ensaios de fadiga por dois motivos. O primeiro motivo trata da relação da diminuição da rigidez dos c.p.s durante o ensaio de fadiga e a estimativa do aumento respectivo do tamanho de trinca. O segundo motivo é estimar, a partir da variação de rigidez de cada c.p. durante o ensaio de fadiga, a variação de flexibilidade do mesmo, que pode ser utilizada em uma futura abordagem de taxa de energia dissipada por unidade de área $\mathcal{G}$.

A Fig. III.1.a mostra, forma esquemática, a variação da rigidez K a medida que o ensaio de fadiga se desenvolve. O c.p. perde rigidez, indo de K_i a K_f, à medida que a trinca se propaga. A Fig. III.1.b mostra, forma esquemática, a variação da flexibilidade C a medida que o ensaio de fadiga se desenvolve, onde o c.p. ganha flexibilidade, indo de C_i a C_f, à medida que a trinca se propaga.

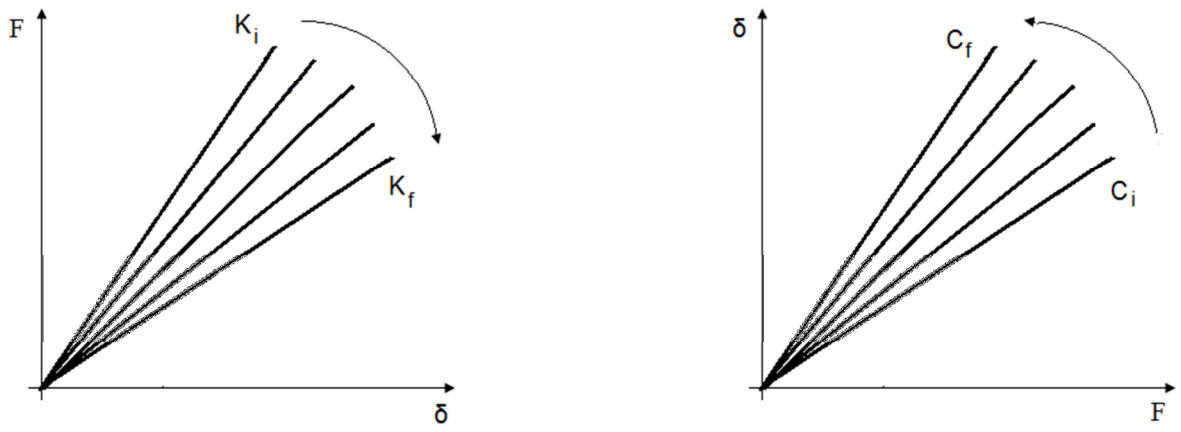


Figura III.1: Gráficos esquemáticos de: (a) Rigidez e (b) Flexibilidade.

A rigidez do c.p. ensaiado à fadiga pode ser estimada através da seguinte relação:

$$K = \frac{F}{\delta} \qquad \text{(III.1)}$$

No item V.2.1, a equação (V.14) mostra explicitamente a rigidez do c.p. *K* em função do tamanho da trinca *a*. De forma análoga a flexibilidade do c.p. ensaiado à fadiga pode ser estimada através da seguinte relação:

$$C = \frac{\delta}{F} \qquad \text{ou} \qquad C = K^{-1} \qquad \text{(III.2)}$$

Como será visto no Capítulo 6, de resultados, o software *Wave Matrix* da máquina de ensaios mecânicos servo-hidráulica *Instron* 8801 fornece os gráficos força versus deslocamento dos ciclos de carregamento aplicados a cada c.p. Estes gráficos serão utilizados para a medição experimental de *K* de cada c.p. durante o seu ensaio.

III.2 Fadiga

Este trabalho procura verificar o desempenho à fadiga de juntas metálicas coladas. Para tal c.p.s de substrato de aço e adesivo epóxi foram ensaiados à fadiga. O ensaio consiste em aplicar uma carga alternada em c.p.s em flexão de três pontos, onde os parâmetros de carga mínima ($F_{mín}$), carga máxima ($F_{máx}$), carga alternada (F_a) e carga média (F_m) são função da carga de referência do adesivo (F_R) obtida experimentalmente no ensaio estático.

Em princípio, foram programados dez faixas de ensaio, variando de 10% F_R a 95% F_R, porém, verificou-se experimentalmente que para percentuais de carga menores que 50% F_R, os c.p.s apresentaram vida infinita em fadiga, e a partir de 80% F_R os c.p's apresentaram falha em fadiga de baixo ciclo, logo, por conveniência, optou-se por trabalhar com apenas quatro faixas da carga de referência, porém manteve-se a nomenclatura original, enumerando as faixas de 5 a 8. A Fig. III.2 ilustra os parâmetros de fadiga considerados nos ensaios.

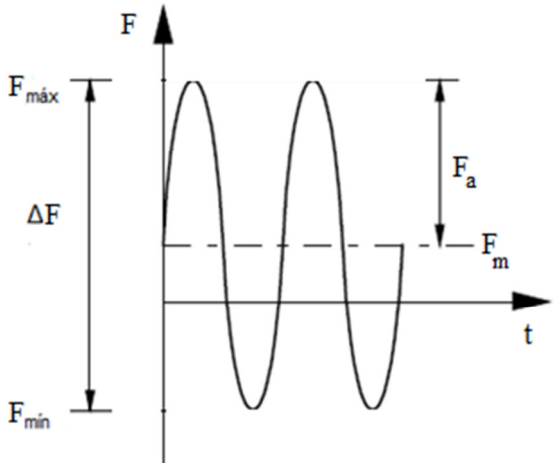


Figura III.2: Parâmetros do ensaio de fadiga.

Adotou-se a razão de tensões de R = 0,1, ou seja, a carga mínima aplicada, $F_{mín}$ ficou estabelecida em 10% de $F_{máx}$ e a calculou-se a carga máxima aplicada $F_{máx}$ em função de F_R, segundo cada faixa de carga previamente estabelecida. Adotou-se a frequência de 20 Hz na condução do ensaio. Foi observado por UNDERHILL (2006) que, para a faixa de frequência entre 10 Hz a 60 Hz, existe pouca ou nenhuma influência da frequência de carregamento no desempenho a fadiga da junta. Por conveniência, as cargas aplicadas aos c.p.s sempre mantiveram o c.p. sob carregamento, já que os mesmos estavam apenas apoiados em roletes de um dispositivo de flexão de três pontos.

III.3 Mecânica da Fratura

O principal parâmetro a ser avaliado quando do descolamento do c.p. é a energia necessária para se fazer uma trinca avançar, denominada por E_d, ou energia de deformação, que é calculada em função da força *F* e do deslocamento *u*. A Fig. III.3 ilustra a nomenclatura utilizada.

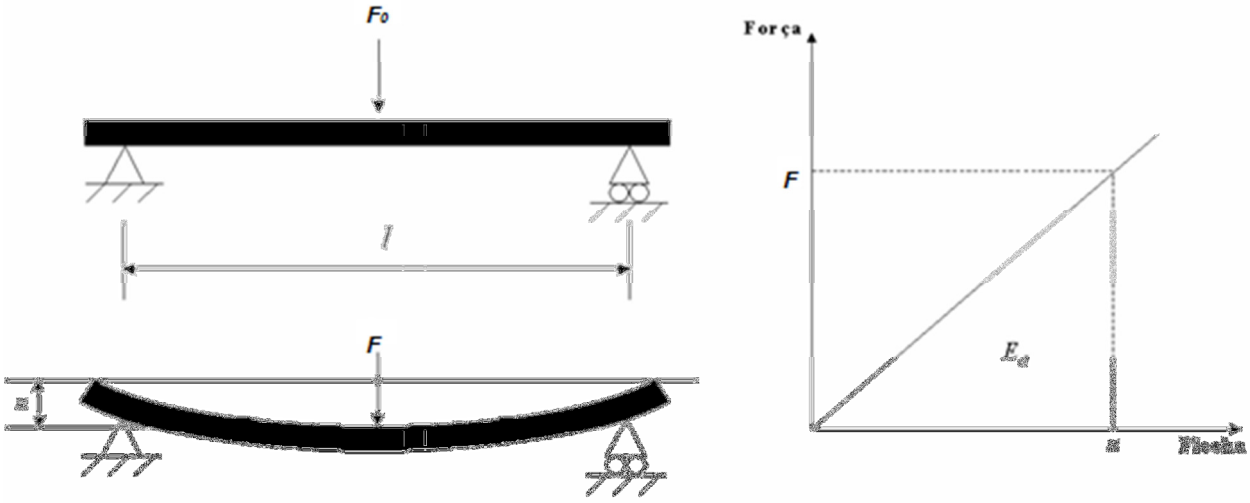


Figura III.3: Viga bi-apoiada submetida a flexão de 3 pontos. (DE BARROS, 2005)

A equação da energia de deformação é:

$$E_d = \frac{1}{2} Fu \qquad \text{(III.3)}$$

Onde se utilizando os conceitos de Métodos de Energia, pode-se apresentar a equação para energia de deformação causada por carregamento de flexão:

$$E_d = \frac{1}{2} \int_0^l \frac{M^2}{EI} dx \qquad \text{(III.4)}$$

Onde *M* é o momento fletor produzido pela carga *P*, *I* é o momento de inércia da barra e *E* é o módulo de elasticidade do material. Para o caso desta barra, ***I*** é definido por:

$$I = \frac{B(2h)^3}{12} \quad \text{(III.5)}$$

Onde *B* e 2*h* são, respectivamente, a largura e a altura do c.p.

A existência de uma trinca inicial faz com que deva-se analisar a barra em duas regiões, uma antes da trinca ***a*** e outra após a mesma, ou seja, as placas são consideradas separadas na região pré-trinca e juntas na região pós-trinca, como estudado por DE BARROS (2006) e ilustrado pela Fig. III.4.

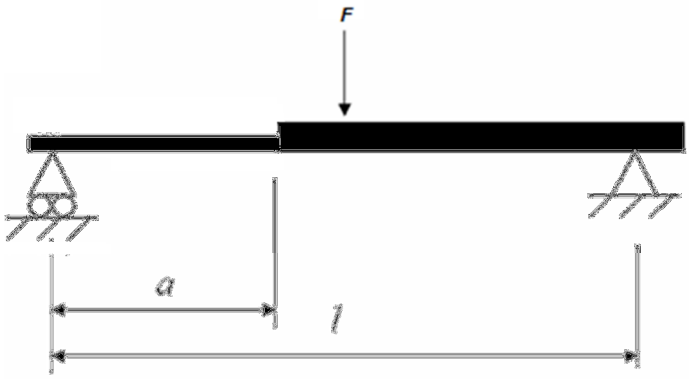


Figura III.4: Modelo de barra colada com trinca inicial. (DE BARROS, 2005)

A energia necessária para fazer-se avançar uma trinca de tamanho a_1 para uma de tamanho a_2, sendo $a_1 < a_2$, fica definida por $\mathcal{G}$, a taxa de energia dissipada por unidade de área, para trabalho nulo:

$$\mathcal{G} = -\frac{dE_d}{dS} = -\frac{1}{B}\frac{dE_d}{da} \quad \text{(III.6)}$$

Onde *S* é a superfície e *a* é o comprimento instantâneo da trinca

A taxa de energia dissipada por unidade de área pode ser também definida em função da flexibilidade da estrutura *C*. Deste modo:

$$\mathcal{G} = -\frac{F^2}{2B}\frac{dC}{da} \quad \text{(III.7)}$$

Segundo IRWIN (1954), uma trinca se propaga quando $\mathcal{G}$ chega ao valor crítico $\mathcal{G}_c$, que é um valor característico de cada colagem. Logo, se faz importante conhecer a curva que representa os pontos de propagação de uma trinca em função de *F* e *u* para um dado valor de $\mathcal{G}_c$.

Existem alguns c.p.s padrões para ensaio de juntas coladas. No ensaio em Modo I, também chamado de modo de tração, com a utilização de c.p. tipo DCB (*double cantilever beam*), o conjunto colado tem uma de suas extremidades fixadas à máquina de ensaios mecânicos, e a outra extremidade, onde localiza-se a pré-trinca, fica em balanço. Nesta mesma extremidade, são fixadas as garras em ambas as placas, carregando cada placa do c.p. em uma mesma direção e sentidos opostos. A Fig. III.5 mostra de forma esquemática a realização do ensaio.

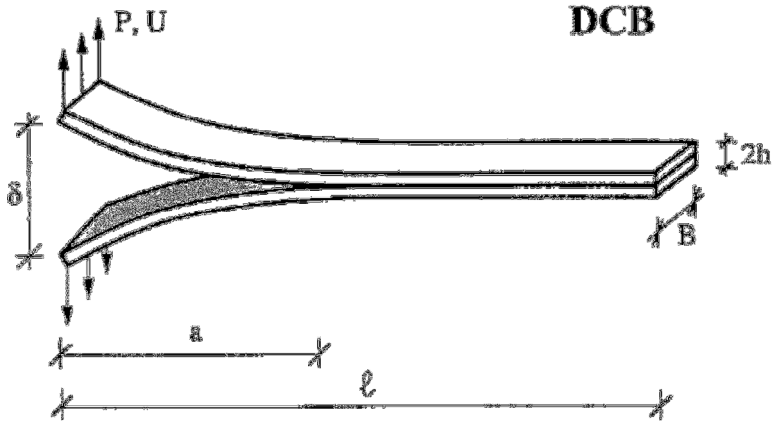


Figura III.5: Ensaio em Modo I, com c.p. tipo DCB. (LADEVÈZE, 1995)

No ensaio em modo II, também chamado de modo de cisalhamento, ou com c.p. tipo ENF (*end notched flexure*), o c.p. colado é submetido a uma flexão de três pontos ao ser colocado bi-apoiado sobre os roletes da máquina de ensaios mecânicos. É gerado um esforço de cisalhamento puro na linha neutra da viga, onde localiza-se o adesivo, o qual faz a trinca propagar-se ao longo do c.p. Como o ensaio com o método ENF será objeto deste trabalho, este será explorado com mais profundidade posteriormente. A Fig. III.6 ilustra de forma esquemática este ensaio.

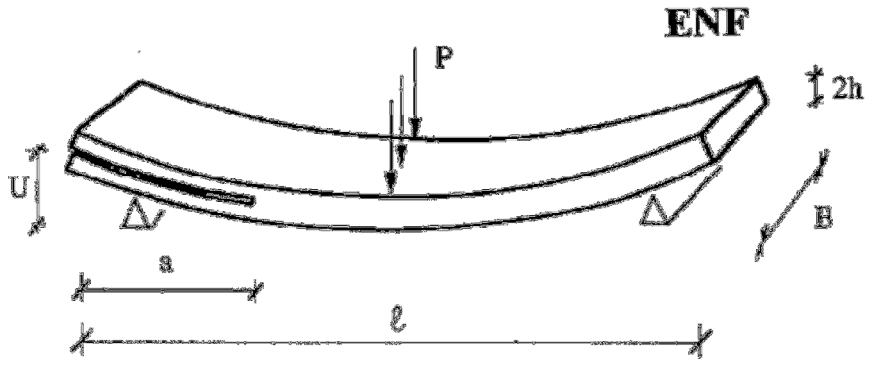


Figura III.6: Ensaio em modo II, ou com c.p. tipo ENF. (LADEVÈZE, 1995)

A configuração do ensaio em modo misto, ou com c.p. tipo MMF (*mixed mode flexure*) é bem semelhante ao ensaio ENF, com a exceção que em uma das extremidades a barra inferior não fica bi-apoiada em relação aos roletes da máquina de ensaios mecânicos, ocorrendo assim tensões de tração e de cisalhamento simultâneas. A Fig. III.7 ilustra esquematicamente o ensaio.

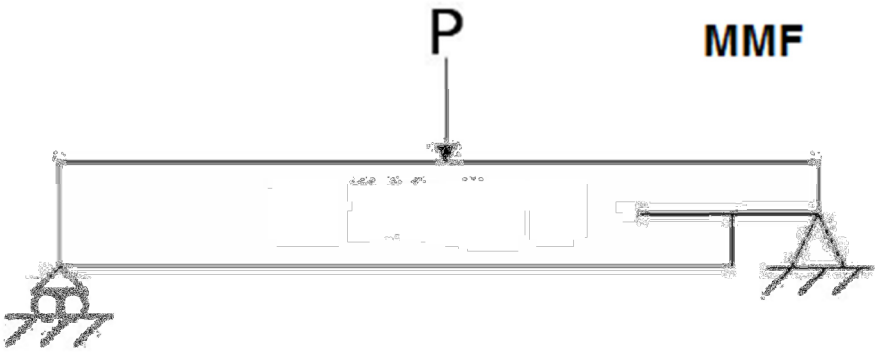


Figura III.7: Ensaio em modo misto, ou MMF. (DE BARROS, 2005)

A seguir será apresentado o capítulo de Materiais e Métodos.

Capítulo IV – Materiais e Métodos

Neste capítulo são apresentados os materiais utilizados para a fabricação dos c.p.s, o adesivo selecionado, a máquina de ensaios mecânicos e os tratamentos superficiais aplicados.

IV.1 Material dos c.p.s

Neste trabalho foram utilizados corpos de prova de aço A36 e submetidos a ensaios com c.p.s do tipo ENF (*end notched flexure*), ou modo de cisalhamento puro, onde o c.p. é submetido à flexão de três pontos aplicada no centro da viga, em uma direção normal à linha neutra. Esse tipo de carregamento assegura que o substrato da junta seja submetido a um carregamento de momento fletor, enquanto o adesivo seja submetido a um carregamento de cisalhamento puro. Conforme estudado por BUDZIK *et al.* (2012), devido à simplicidade de realização, este ensaio é o mais utilizado para caracterização de fraturas em modo II.

A Tabela IV.1 fornece a composição química e a Tabela IV.2 fornece as propriedades do material utilizado.

Tabela IV.1: Composição química do aço A36.

Composição química do aço A36 (%)					
C	Mn	S	Si	P	Outros
0,25 máx	-	0,05 máx	0,4 máx	0,04 máx	Cu 0,20 mín

Tabela IV.2: Propriedades mecânicas do aço A36.

Propriedades Mecânicas do aço A36							
Módulo de Elasticidade *E* (GPa)	Módulo de Elasticidade Transversal *G* (GPa)	Tensão de Escoamento (MPa)			Limite de Resistência (MPa)		
		Tração	**Compressão**	**Cisalhamento**	**Tração**	**Compressão**	**Cisalhamento**
200	75	250	250	-	400	400	-

IV.2 Adesivo

O adesivo utilizado foi o Primer Novatec NVT-1, adesivo semi-flexível de base epóxi que tem as características de alta resistência à abrasão, proteção anticorrosiva e alta adesão. Foi considerada uma espessura de aplicação de 0,5 mm ao longo do comprimento de cada c.p. A Tabela IV.3 fornece as propriedades do material curado.

Tabela IV.3: Propriedades do material curado. (NOVATEC)

Parâmetros	Valores
Tensão cisalhante máxima – ASTM D638 (MPa)	27
Dureza – ASTM D2240 (Shore D)	60

IV.3 A máquina de ensaios mecânicos

Utilizou-se a máquina de ensaios mecânicos servo-hidráulica Instron 8801, que realiza tanto testes estáticos, quantos testes dinâmicos, como são os de fadiga. Esta é indicada para testar-se materiais avançados, como compósitos, e muito utilizada para testes de fadiga de baixo ciclo, fadiga termo mecânica e mecânica da fratura. Sua capacidade de carga é de 100KN. A Fig. IV.1 mostra uma imagem da Instron 8801 do LAMAT.

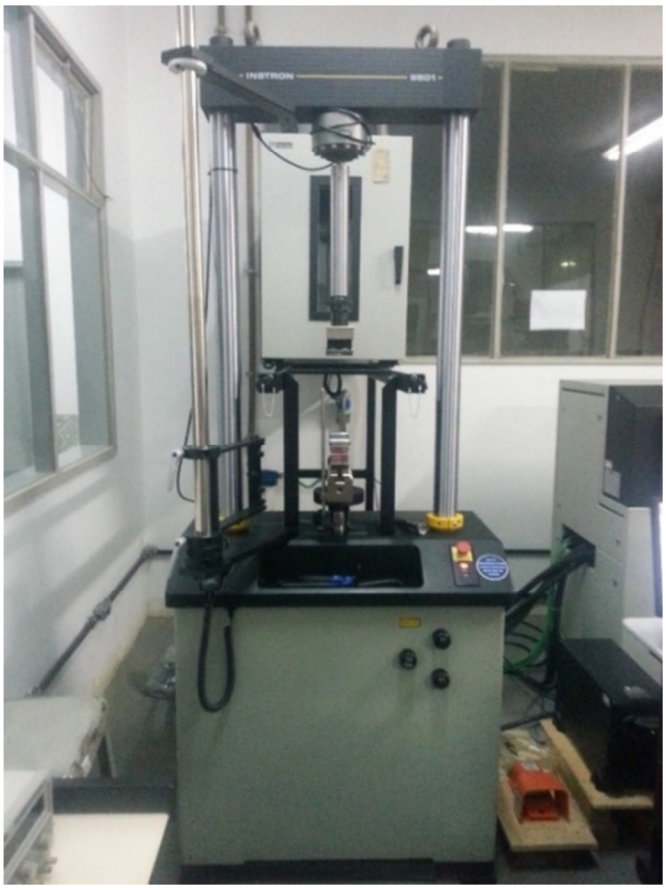


Figura IV.1: Máquina de ensaios mecânicos servo-hidráulica Instron 8801.

IV.4 Preparação dos c.p.s

Os c.p.s utilizados nos ensaios foram feitos de aço carbono A36 e têm as seguintes medidas: *L* = 160 mm, *m* = 15 mm, *h* = 6,35 mm, *B* = 25 mm e possui comprimento de pré-trinca *a* = 40 mm, correspondendo a 0,25L. O comprimento total colado é de 165 mm e o comprimento colado entre apoios é de 135 mm.

A espessura do adesivo foi definida em 0,5 mm, a qual foi obtida fazendo-se uso de espaçadores ao longo de seu comprimento para garantia da medida desejada. As diferentes rugosidades utilizadas no trabalho foram aplicadas antes do corte das chapas para fabricação dos c.p.s. O desenho do c.p. é ilustrado pelas Figuras IV.2 e IV.3.

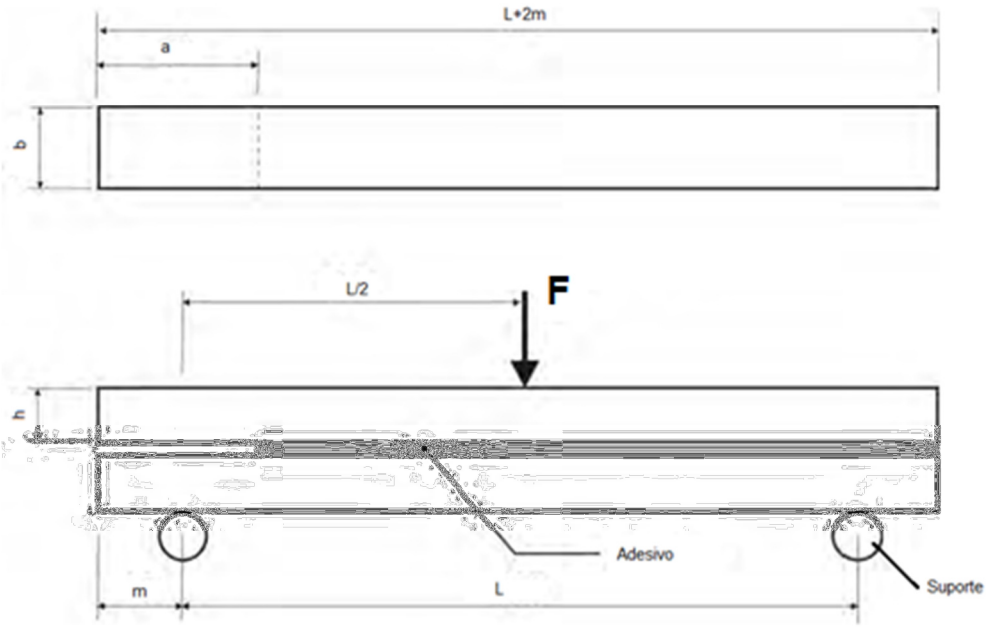


Figura IV.2: Ilustração do c.p. em aço A36. (ADAPTADO DE: CHAVES, 2013)

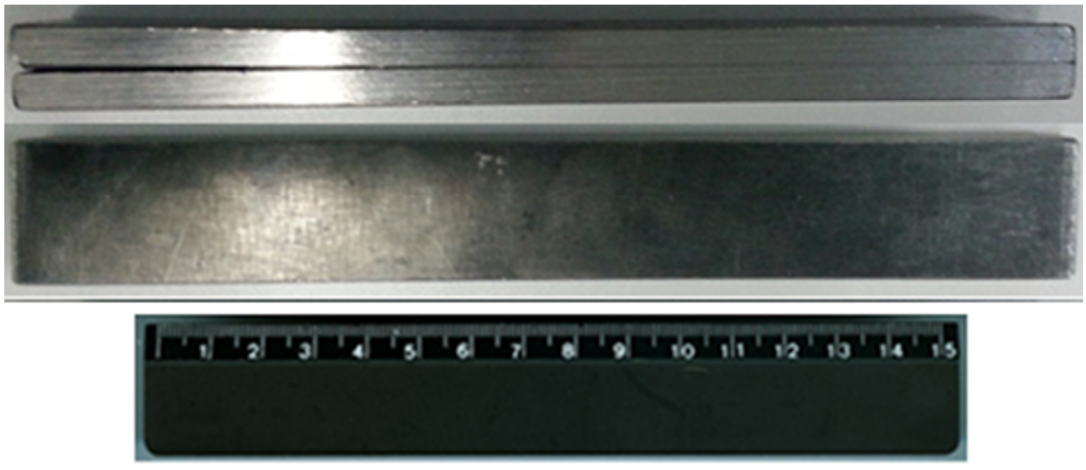


Figura IV.3: Imagem real do c.p. em aço A36.

Os c.p.s não sofreram tratamentos superficiais químicos ativos, apenas passivos, como o desengraxamento e a limpeza com acetona para remover possíveis vestígios oleosos. Inicialmente os c.p.s foram desengraxados com acetona, depois foram aplicados os tratamentos superficiais mecânicos e, posteriormente, foram limpos novamente com acetona antes da aplicação do adesivo.

As chapas de aço para fabricação dos c.p.s foram submetidas a tratamentos superficiais mecânicos de três tipos: jateamento com granalha, jateamento com areia e utilização de escova rotativa MBX. Posteriormente ao tratamento superficial e da limpeza da superfície, os c.p.s foram cortados nas medidas citadas anteriormente. Então, os componentes A e B do adesivo Primer Novatec NVT-1 (Nova Friburgo, Rio de Janeiro, RJ) foram misturados e aplicados com uma espátula na superfície da chapa de forma homogênea para evitar a retenção de bolhas no produto. As juntas foram fabricadas individualmente num molde e a espessura do adesivo foi controlada fazendo-se o uso de espaçadores, como abordado anteriormente. Este dispositivo garantiu a repetibilidade das dimensões de colagem dos c.p.s. Com uma temperatura ambiente de 25ºC, o tempo de aplicação durou em média 35 minutos, seguido do tempo de cura inicial de 120 minutos, e, posteriormente, de uma cura total de 24 horas, conforme recomendação do fabricante.

IV.4.1 Jateamento com granalha

A granalha utilizada foi a G-25, a qual possui perfil de rugosidade média é indicada para operações de remoção de carepa de chapas, de acordo com o fabricante. Foi indicada também por desenvolver uma superfície de reentrâncias consideráveis, que é a distância entre os picos e vales, na peça tratada, ideal para fixação do adesivo. CATÁLOGO TUPY (2015)

Deve-se cuidar, quando do tratamento superficial mecânico, para não promover perfis de rugosidade nem muito altos e tampouco muito baixos. Perfis muito altos podem ser prejudiciais já que a camada de adesivo pode não cobrir totalmente os picos da superfície. Já perfis muito baixos podem também ser prejudiciais por não garantirem uma perfeita ancoragem do adesivo na superfície tratada, segundo o fabricante CATÁLOGO TUPY (2015). A Fig. IV.4 ilustra essa explicação.

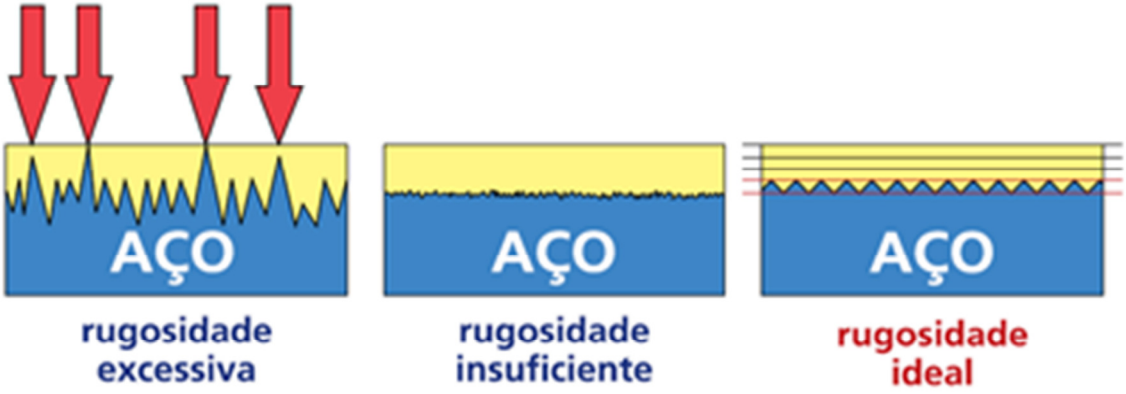
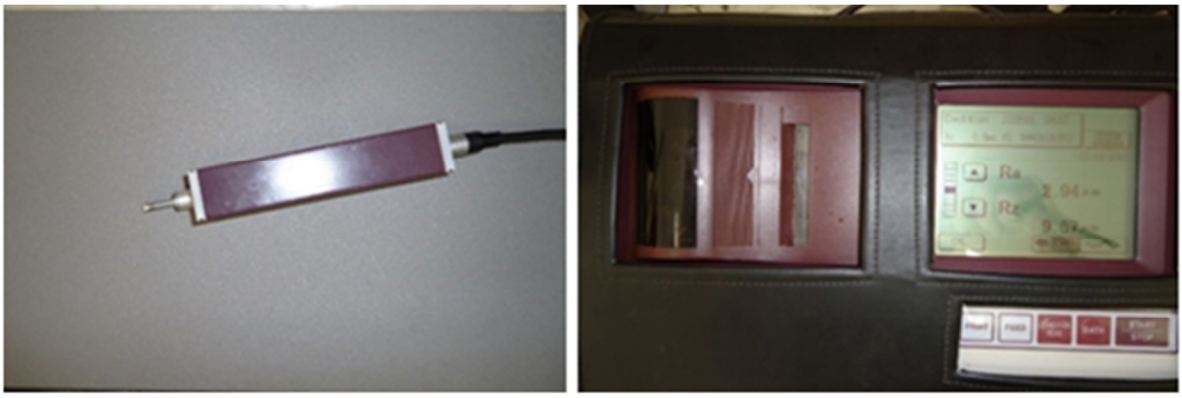


Figura IV.4: Perfis de rugosidade. (CATÁLOGO TUPY, 2015)

O rugosímetro utilizado e o perfil da chapa de aço tratada, pertencente ao Laboratório de Engenharia Mecânica da UERJ de Nova Friburgo, são ilustrados na Fig. IV.5.



(a) (b)

Figura IV.5: (a) Rugosímetro portátil e (b) perfil da chapa tratada.

IV.4.2 Jateamento com Areia

A areia utilizada no jateamento abrasivo deve atender os requisitos de granulometria tal que passe na peneira ABNT nº 12, abertura da malha de 1,7 mm e fique retida na peneira ABNT nº 40, abertura de malha 0,4 mm. A areia deve estar isenta de contaminantes como cloretos, poeira, cascalhos e quaisquer outros contaminantes que pudessem ficar impregnados na superfície a ser tratada GENTIL (2007). A areia utilizada neste trabalho é de granulometria 20/40. A Fig. IV.6a mostra um exemplo da execução deste tratamento.

IV.4.3 Escova rotativa MBX

A utilização da escova rotativa MBX promovem uma limpeza de superfície razoável e conseguem remover carepa, porém este processo tende a ser antieconômico, pois seu rendimento é, normalmente, muito baixo. No entanto, para a remoção de ferrugem e tintas velhas e criar uma rugosidade razoável, a lixa pode ser empregada e deve ser mantida em um ângulo de 15º sobre a peça a ser trabalhada, pressionando ligeiramente. Uma pressão excessiva provocará um rendimento baixo, além de desgastar rapidamente o disco, que é feito de cerdas de aço de alto carbono DE OLIVEIRA (2014), conforme mostrado na Fig. IV.6b.



(a) (b)

Figura IV.6: (a) Processo de jateamento abrasivo com areia e (b) jateamento com escova rotativa. (MANUTENÇÃO E SUPRIMENTOS, 2015)

A Tabela IV.4 fornece os valores de rugosidade média e total encontrados através de diversas medições efetuadas no laboratório com o rugosímetro portátil.

Tabela IV.4 – Valores de rugosidades medidos

Tipo de tratamento superficial	Ra (µm)	Rt (µm)
Aplicação de escova rotativa	3,97	28,77
Jateamento de areia	4,54	43,42
Jateamento com granalha (G25)	11,48	87,27

É notória a diferença existente nos valores dos parâmetros de rugosidade média entre os tratamentos aplicados. A utilização de escova rotativa forneceu os piores parâmetros de rugosidade para a junta. Os melhores parâmetros de rugosidade foram fornecidos pelo jateamento com granalha, cuja rugosidade média Ra foi mais que o dobro da desenvolvida pelo jateamento com areia e quase o triplo da aplicação de escova rotativa. Quanto a rugosidade total Rt, o jateamento com granalha resultou em valores que foram o triplo da aplicação de escova rotativa e o dobro do jateamento com areia. No próximo capítulo serão apresentados os modelos analíticos utilizados neste trabalho.

Capítulo V – Modelos Analíticos

Neste capítulo serão apresentados quatro modelos analíticos. Dois modelos para estimativa das forças máximas transversais nos c.p.s: para escoamento do substrato de aço e para ruptura do adesivo. Outros dois modelos para estimativa do comprimento de trincas nos c.p.s através da variação de sua rigidez utilizando: o método da linha elástica e o método da viga conjugada.

V.1 Modelos analíticos de força máxima

Conforme está abordado no apêndice D, nos testes estáticos houve o escoamento do aço antes da ruptura do adesivo. O primeiro modelo analítico desenvolvido é o de estimativa da força de escoamento um c.p. de aço com espessura *2h*, como reproduzido na Fig. V.1.

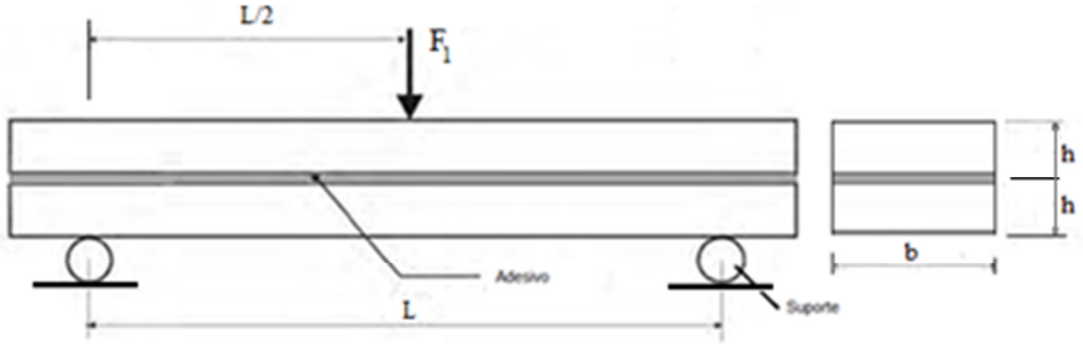


Figura V.1: Modelo de viga não trincada. (ADAPTADO DE: CHAVES, 2013)

O momento máximo é desenvolvido no centro da barra, em *L/2*:

$$M_{max} = \frac{F_1 L}{4} \quad \text{(V.1)}$$

Logo, a tensão máxima desenvolvida nas barras de aço do c.p. pode ser estimada em:

$$|\sigma_{max}| = \frac{Mc}{I} = \frac{3}{8}\frac{F_1 L}{bh^2} \quad \text{(V.2)}$$

onde $I = \frac{2}{3}bh^3$ e $c = h$ (considera-se em *h* a metade da espessura do adesivo)

O fator de segurança ao escoamento do aço:

$$n = \frac{S_{y_aço}}{\sigma_{máx}} \quad \text{(V.3)}$$

Para n = 1, estima-se a força transversal F_1 no início do escoamento das barras de aço:

$$F_1 = \frac{8}{3}\frac{bh^2}{L} S_{y_aço} \quad \text{(V.4)}$$

Utilizando o valor de $S_{y_aço}$ da Tabela IV.2 e as medidas da Fig. IV.2, estima-se um valor de força de 4538 N para o início do escoamento do aço nesta configuração de ensaio.

Para a estimativa da força de cisalhamento distribuida do adesivo F_H em função da força transversal F_2 outro modelo analítico foi elaborado, utilizando-se o conceito de fluxo de cisalhamento, como mostra a Fig. V.2.

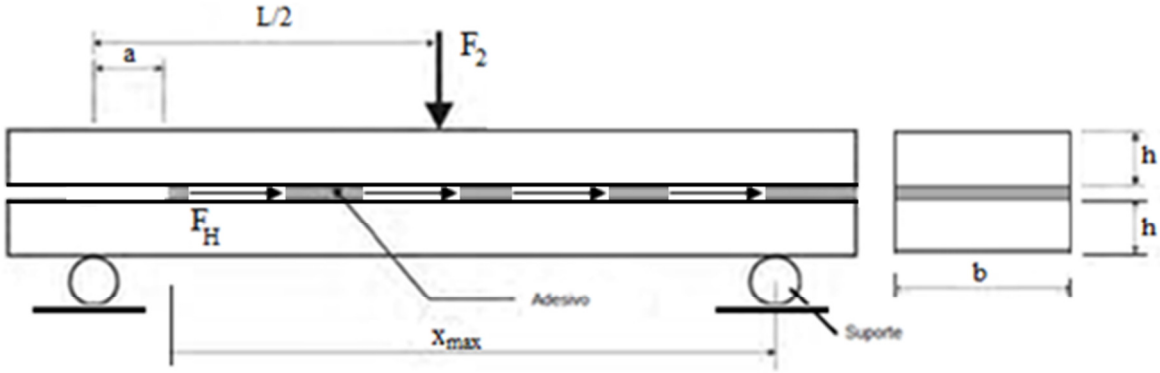


Figura V.2: Modelo de viga trincada. (ADAPTADO DE: CHAVES, 2013)

Quando aplicada uma força transversal F_2 na viga, há o surgimento de uma força de cisalhamento distribuida F_H na região colada, a qual é responsável pelo esforço de cisalhamento no adesivo. O fluxo de cisalhamento na região colada pode ser estimado como:

$$q = \frac{VQ}{I} = \frac{3}{8}\frac{F_2}{h} \quad \text{, onde} \quad V = \frac{F_2}{2} \quad \text{e} \quad Q = \bar{y}A = \frac{h}{2}(bh) = \frac{bh^2}{2} \tag{V.5}$$

A força de cisalhamento F_H pode ser estimada como:

$$\frac{F_H}{x} = q = \frac{3}{8}\frac{F_2}{h} \tag{V.6}$$

Portanto:

$$F_H = \frac{3}{8}\frac{F_2}{h}x \quad \text{, onde } \boldsymbol{x} \text{ é o comprimento da junta colada} \tag{V.7}$$

Tensão de cisalhamento da junta colada:

$$\tau = \frac{F_H}{b(L-a)} = \frac{3}{8}\frac{F_2}{bh}\frac{x}{(L-a)} \tag{V.8}$$

O fator de segurança ao cisalhamento do adesivo:

$$n = \frac{\tau_{rup_adesivo}}{\tau_{máx}} \tag{V.9}$$

Para n = 1 e $x = x_{max} = L - a$, estima-se a força transversal F_2 no cisalhamento do adesivo:

$$F_2 = \frac{8}{3}bh\tau_{rup_adesivo} \tag{V.10}$$

Utilizando-se valores de tensão de cisalhamento do adesivo $\tau_{rup_adesivo}$ e das medidas do c.p., estima-se o valor de força de ruptura do adesivo F_2 = 11430 N. Para simplificar a notação, à partir deste ponto (F_2) é renomeada como carga de referência analítica (F_{RA}).

Sugestões para a melhoria da configuração do c.p. para que o material do substrato não plastifique antes da ruptura do adesivo podem ser feitas. RUSSELL (1982) utilizou em seus estudos um modelo onde o primeiro rolete de apoio da máquina de ensaios mecânicos ficava levemente deslocado para a esquerda, aumentando o comprimento efetivo de pré-trinca, como ilustra a Fig. V.3.

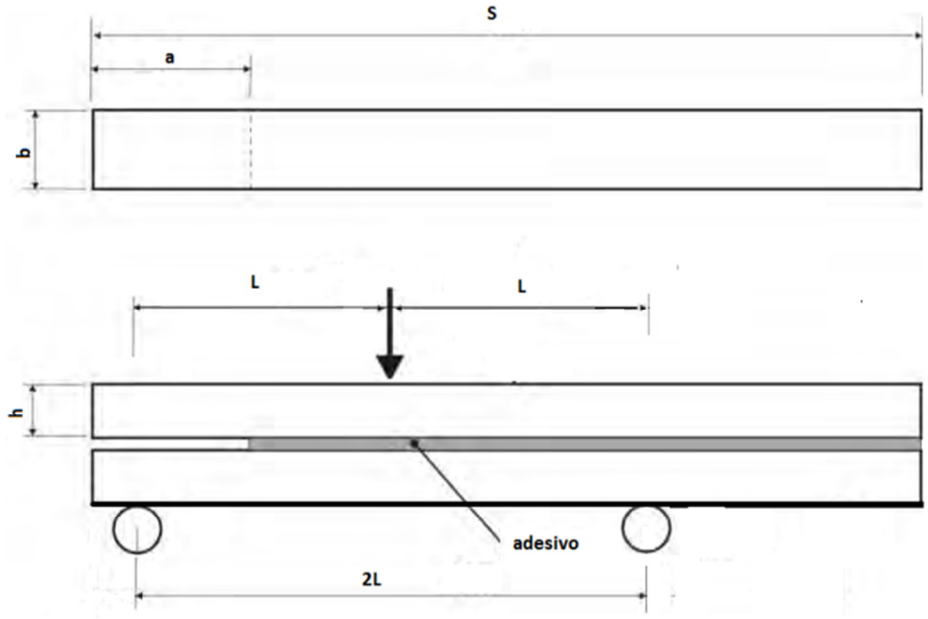


Figura V.3: Configuração proposta por RUSSELL (37). (ADAPTADO DE: CHAVES, 2013)

A seguir são apresentados dois modelos analíticos de estimativa do comprimento de trinca através da variação da rigidez do c.p.

V.2 Modelos analíticos de estimativa de comprimento de trinca

Dois modelos analíticos foram desenvolvidos utilizando conceitos da Resistência dos Materiais para relacionar a rigidez e o tamanho do c.p. O modelo baseado no método da linha elástica, HIBBELER (2004), é mostrado em detalhes no apêndice B, e o modelo baseado no método da viga conjugada, LEET *et al.* (2010), é mostrado em detalhes no apêndice C.

V.2.1 Modelo analítico do método da linha elástica

Este modelo analítico usa uma teoria bem conhecida da Resistência dos Materiais, HIBBELER (2004), onde utiliza-se uma aproximação da equação da linha elástica e sua integração sucessiva para estimar a relação entre o deslocamento transversal de qualquer ponto da linha elástica e os esforços transversais impostos a uma determinada viga.

A viga em questão foi dividida em três regiões distintas, sendo a primeira para $0 \leq x \leq a$, a segunda região para $a \leq x \leq L/2$, e a terceira região para $L/2 \leq x \leq L$, onde a é o comprimento inicial da trinca, L a distância entre apoios do c.p. e x uma posição genérica do c.p. Para este modelo utilizou-se o c.p. apresentado na Fig. V.4.

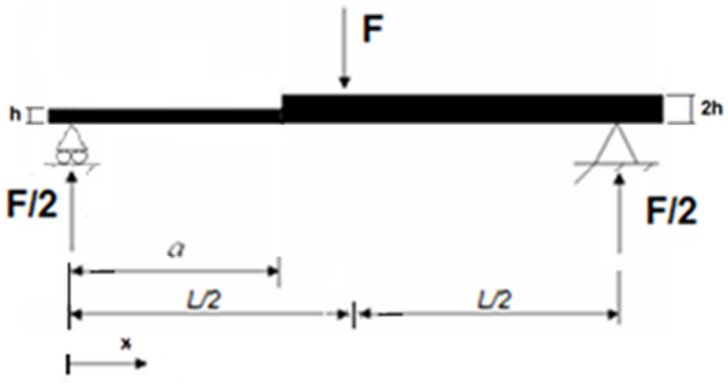


Figura V.4: Modelo de viga em modo ENF para o Método da linha elástica.

Na parte descolada, onde existe a trinca de tamanho a, foi considerada apenas a viga inferior, já que é suposto que a viga superior não sofrer reação do apoio esquerdo do c.p. O desenvolvimento do cálculo do modelo da linha elástica encontra-se no apêndice B, apenas os resultados finais de deslocamento vertical (flechas) são apresentados pelas equações V.11, V.12 e V.13.

$$y_{1(x)} = \frac{F}{EI}\left[\frac{1}{12}x^3 + \frac{\left(56\left(a^3/L\right)-3L^2-84a^2\right)}{384}x\right] \quad \text{para } 0 \leq x \leq a \quad \text{(V.11)}$$

$$y_{2(x)} = \frac{F}{8EI}\left[\frac{1}{12}x^3 + \frac{\left(56\left(a^3/L\right)-3L^2\right)}{48}x - \frac{7}{6}a^3\right] \quad \text{para } a \leq x \leq L/2 \quad \text{(V.12)}$$

$$y_{3(x)} = \frac{F}{8EI}\left[-\frac{1}{12}x^3 + \frac{FL}{4}x^2 + \frac{\left(56\left(a^3/L\right)-9L^2\right)}{48}x + \frac{\left(-56a^3+L^3\right)}{48}\right] \quad \text{para } L/2 \leq x \leq L \quad \text{(V.13)}$$

Embora a utilização do método da linha elástica para cálculo do deslocamento transversal de vigas seja bem conhecido, a sua utilização em vigas de seção transversal escalonada não é muito comum de ser abordado. Esta particularidade da descrição do c.p. como viga de duas seções transversais distintas pode ser vista em (V.11) que é dividida por ***I*** enquanto (V.12) e (V.13) são divididas por 8*I*.

Com auxílio do software matemático MathCad 15, as curvas resultantes da implementação das equações de (V.11) a (V.13) para cinco casos distintos de comprimento de trinca ***a***, são mostradas na Fig. V.5. Duas curvas limítrofes são também utilizadas: a curva de cor preta representa uma viga de espessura constante *2h* e a curva de cor laranja representa uma viga de espessura constante ***h***. A terceira curva, representa as equações (V.11), (V.12) e (V.13) e divide-se da seguinte forma: em vermelho está o trecho que corresponde à primeira equação, $y_1(x)$, que abrange a região $0 < x < a$, em azul está o trecho que corresponde à segunda equação, $y_2(x)$, na região $a < x < L/2$, e em verde está o trecho que corresponde a terceira equação, $y_3(x)$, na região de $L/2 < x < L$. Utiliza-se arbitrariamente $F = 100$ N.

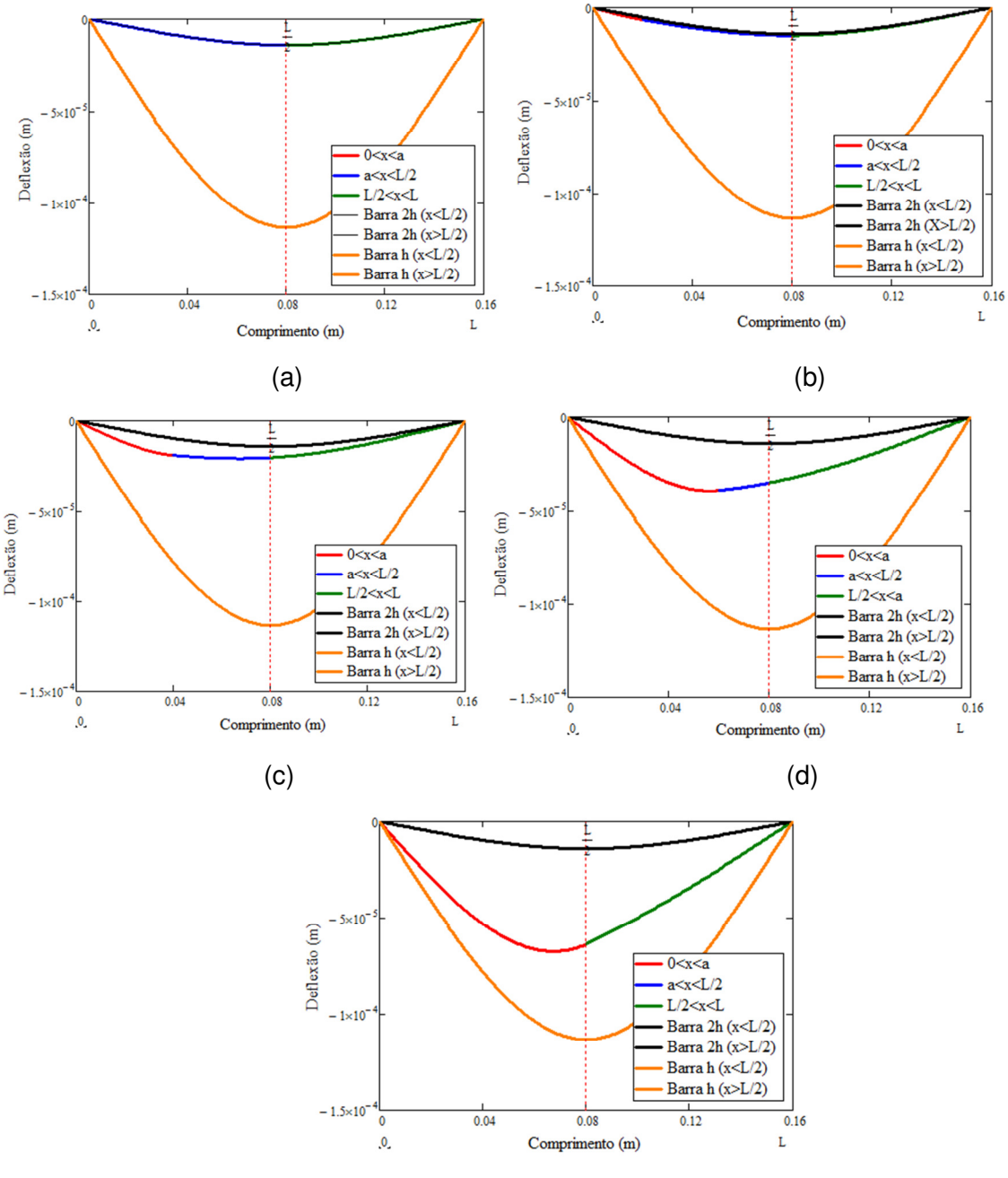


Figura V.5: Deflexões para a =: (a) 0 mm, (b) 20 mm, (c) 40 mm, (d) 60 mm e (e) 80 mm.

Para o valor de trinca *a* = 0 mm, como já era esperado, as deflexões do c.p. ensaiado, em cores azul e verde, e da viga de espessura ***2h***, em cor preta, coincidiram perfeitamente. Nota-se que à medida que a trinca *a* aumenta, fica mais evidente a assimetria de deslocamentos transversais causadas pela variação da seção transversal dos c.p.s.

Conforme mostrado no apêndice B, utiliza-se (V.12) para estimar o *K* do c.p. em função do tamanho da trinca *a*, $K = F/y_2(x)$, para $x = L/2$:

$$K(a) = \left[-\frac{1}{384EI}(28a^3 + L^3)\right]^{-1} \tag{V.14}$$

Pode-se, ainda, apresentar (V.14) como o tamanho da trinca *a* em função de *K* para $x = L/2$:

$$a(K) = \sqrt[3]{\frac{\frac{96EI}{K} + \frac{L^3}{4}}{-7}} \tag{V.15}$$

A equação (V.15) pode ser utilizada como uma medida indireta do tamanho da trinca ***a*** utilizando a informação da variação da rigidez *K* do c.p, durante o ensaio de fadiga. Note que *K* entra como número negativo já que $y_2(x)$ é negativo.

STRAWKEY *et al.* (1964) fizeram estudos de medição indireta de trincas a partir da medição da flexibilidade *C* dos c.p.s do tipo SLJ (*single lap joints*), obtendo resultados analíticos bem próximos aos experimentais. MOURA et *al.* (2009) também desenvolveram modelos para medição da propagação de trinca em ensaios estáticos para fratura em modo II, porém em substratos feitos de material compósito.. Em seu trabalho, buscou-se comparar três modelos, que são eles: CBT, ou *Corrected Beam Theory*, ou Teoria da Viga Corrigida, que utiliza correções na formulação da flexibilidade *C* para obtenção da taxa de energia dissipada ***G*** e posteriormente fazer o estudo da propagação da trinca; o segundo método avaliado foi o CCM, ou *Compliance Calibration Method*, ou Método de calibração da Flexibilidade, que estuda a variação da flexibilidade *C* para medição da trinca. A diferença entre estes métodos é que no primeiro é necessária a medição real da trinca experimentalmente, enquanto que no segundo é necessário apenas o valor de flexibilidade *C*. Os autores propuseram um método denominado CBBM, ou *Compliance Based Beam Method*, ou Método da viga baseada na flexibilidade, onde são feitas correções no parâmetro *C* de forma a obter valores de medição analítica da trinca próximos ao do real. Os autores obtiveram aparentemente êxito na nova formulação proposta.

Com intuito de confirmar os resultados obtidos no modelo do método da linha elástica, utiliza-se o modelo analítico do método da viga conjugada.

V.2.2 Modelo analítico do método da viga conjugada

Uma abordagem alternativa para a estimativa de deslocamentos transversais (flechas) de vigas, que pode ser utilizado tanto para o caso da viga ter diversas seções transversais quanto para o caso da viga ser composta de vários materiais, o Método da Viga Conjugada, LEET (2010), é muito utilizado em Engenharia Civil para análise de estruturas.

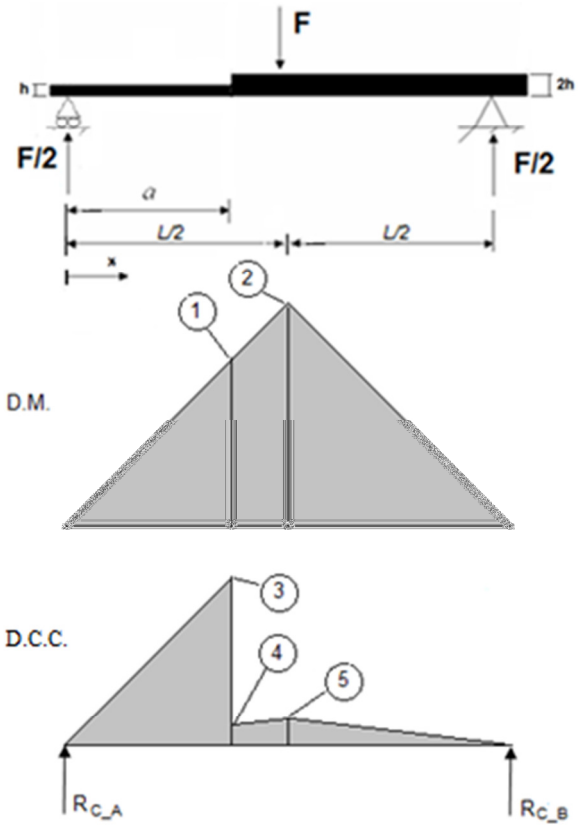


Figura V.6: Modelo de viga para um c.p. tipo ENF para o método da viga conjugada.

Onde, na Fig. V.6, D.M. significa diagrama de momento fletor e D.M.C., diagrama de momento fletor conjugado. O desenvolvimento do cálculo do modelo analítico pelo método da viga conjugada encontra-se no apêndice C, apenas o resultado final de deslocamento vertical (flecha) para $x = L/2$ é apresentado:

$$y_{(L/2)} = \frac{F}{96EI}\left[-\frac{L^3}{4} - 7a^3\right] \quad \text{, para x = L/2} \qquad \text{(V.16)}$$

Conforme mostrado no apêndice C, utilizando (V.16) e que $K = F/y(L/2)$, pode-se fazer a estimativa do comprimento de trinca ***a*** em função da rigidez K para $x = L/2$:

$$a(K) = \sqrt[3]{\frac{\frac{96EI}{K} + \frac{L^3}{4}}{-7}} \qquad \text{(V.17)}$$

A equação (V.17) pode ser utilizada como uma medida indireta do tamanho da trinca *a* utilizando a informação da variação da rigidez *K* do c.p, durante o ensaio de fadiga. Note que *K* entra como número negativo já que $y_2(L/2)$ é negativo. Comparando-se as equações (V.15) e (V.17) verifica-se que estas são idênticas.

V.3 Comparação dos modelos analíticos de estimativa de comprimento de trinca em função da variação da rigidez com um software de Elementos Finitos

A checagem final da validade dos modelos analíticos de estimativa de comprimento de trinca foi feita através da utilização de um programa de Elementos Finitos (E. F.) elaborado em Visual Basic, denominado 20L, cujas telas principais são mostradas no Apêndice A. O c.p. foi divido em três elementos: o primeiro de comprimento *a*, o segundo de comprimento *L/2 – a* e o terceiro de comprimento *L/2*. Foram usados quatro *key points* com coordenadas: (0,0); (a,0), (L/2,0) e (L,0). As propriedades do material dos três elementos foram retiradas da tabela IV.2 e as propriedades da seção transversal dos três elementos foram retiradas da Fig. IV.2: todos os elementos com largura *b* e o primeiro elemento de altura *h* e os elementos seguintes com altura *2h*. As condições de contorno foram de restrição horizontal e vertical no *key point* 1 e de restrição vertical no *key point* 4. As condições de carregamento foram arbitrárias, de uma força vertical de -100 N no *key point* 3. Após ter sido processado, este programa de E.F. forneceu como resultados os deslocamentos transversais dos *key points*, entre eles a do *key point* 3 onde a força vertical atuava. A divisão do valor da força imposta pelo deslocamento transversal obtido do *key point* 3 forneceu a rigidez *K* do c.p. em questão. Fez-se um total de 11 ensaios de E.F. com o comprimento da trinca variando de 25 mm até 75 mm de 5 em 5 mm. A Fig. V.7 mostra os resultados assim obtidos.

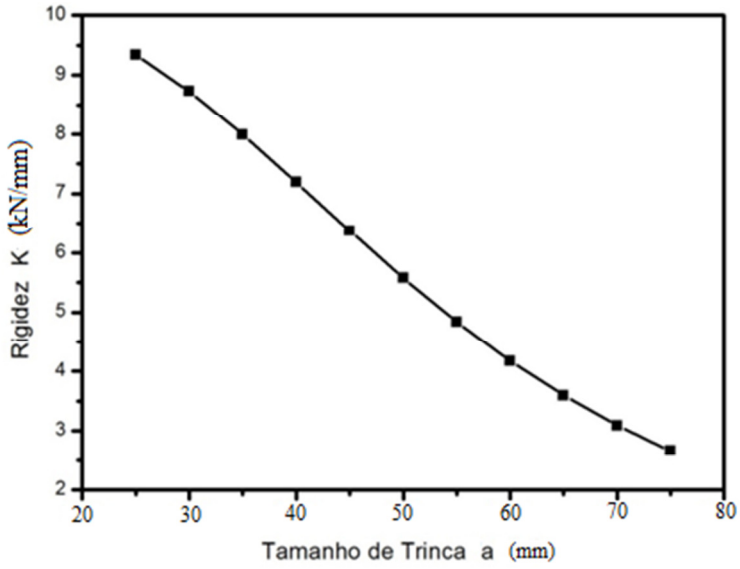


Figura V.7: Resultados de rigidez e tamanho de trinca no c.p. via E.F.

Deve-se dizer que os valores de *K* em função de *a* obtidos pelo software de E.F. confirmaram os resultados obtidos nos dois modelos analíticos de estimativa de comprimento de trinca: o do método da linha elástica e do método da viga conjugada.

Note que os valores de rigidez *K* diminuem com o aumento da trinca *a* de forma não linear. Os valores de rigidezes para cada tamanho de trinca encontrado pelo modelo de E.F. mostrados na Fig. V.7 são relacionados na tabela V.1.

Tabela V.1: Relação de rigidezes por tamanho de trinca no modelo em E.F.

Relação entre tamanho de trinca *a* e rigidez *K*	
Trinca *a* (m)	**Rigidez *K* (KN/mm)**
0.025	**9.338**
0.03	**8.725**
0.035	**7.993**
0.04	**7.191**
0.045	**6.369**
0.05	**5.575**
0.055	**4.837**
0.06	**4.175**
0.065	**3.594**
0.07	**3.091**
0.075	**2.662**

No próximo capítulo serão apresentados os resultados experimentais.

Capítulo VI - Resultados

Este capítulo é dividido em duas partes. Na primeira parte os resultados dos testes de fadiga nos c.p.s são apresentados e comentados. Na segunda parte as superfícies geradas pela fratura dos c.p.s são analisadas e comentadas.

VI.1 Resultados de Fadiga

Os resultados dos ensaios de fadiga são mostrados na Tabela VI.1, com c.p.s tratados superficialmente com granalha de aço (grupo A), jateamento de areia (grupo B) e escova rotativa (grupo C).

Tabela VI.1: Resultados dos ensaios de fadiga em c.p.s tratados com granalha (A), areia (B) e escova rotativa (C).

GRUPO A (GRANALHA)											
Faixas	F_R %	$F_{màx}$ (kN)	F_{min} (kN)	F_a (kN)	F_m (kN)	R	Freq. (Hz)	Ciclos p/ ruptura			
								CP1	CP2	CP3	CP4
5	50	3,15	0,315	1,416	1,731	0,10	20	1005022	1062048	1103536	-
6	60	3,78	0,378	1,699	2,077	0,10	20	289398	811460	479368	-
7	70	4,41	0,441	1,982	2,423	0,10	20	55957	22959	78848	-
8	80	5,03	0,503	2,265	2,769	0,10	20	4943	10554	402	2942

GRUPO B (AREIA)										
Faixas	F_R %	$F_{màx}$ (kN)	F_{min} (kN)	F_a (kN)	F_m (kN)	R	Freq. (Hz)	Ciclos p /ruptura		
								CP1	CP2	CP3
5	50	3,15	0,315	1,416	1,731	0,10	20	1100092	1207652	1101870
6	60	3,78	0,378	1,699	2,077	0,10	20	565249	565429	724401
7	70	4,41	0,441	1,982	2,423	0,10	20	54923	119373	235142
8	80	5,03	0,503	2,265	2,769	0,10	20	78737	28249	18383

GRUPO C (ESCOVA ROTATIVA)											
Faixas	$\%F_R$	$F_{màx}$ (kN)	F_{min} (kN)	F_a (kN)	F_m (kN)	R	Freq. (Hz)	Ciclos p/ ruptura			
								CP1	CP2	CP3	CP4
5	50	3,15	0,315	1,416	1,731	0,10	20	37828	228508	146226	-
6	60	3,78	0,378	1,699	2,077	0,10	20	27521	52040	147278	-
7	70	4,41	0,441	1,982	2,423	0,10	20	4811	21909	11528	9826
8	80	5,03	0,503	2,265	2,769	0,10	20	10229	3743	3689	6941

VI.1.1 Estudo da rigidez experimental

A rigidez, ou *stiffness*, em inglês, é dada pelo quociente da carga imposta pelo deslocamento gerado ($K=P/u$). A flexibilidade, ou *compliance*, em inglês, é o inverso da rigidez K da peça ($C = 1/K$). Em um gráfico de carga *versus* deslocamento, quanto mais vertical for uma determinada inclinação, menos flexível, ou mais rígida, será a peça. Por ser gerada através da carga P e do deslocamento u, a rigidez pode ser obtida observando-se as curvas características P versus u de cada ensaio.

Estas curvas são fornecidas pelo software *Wave Matrix* da *Instron* 8801, que também fornece o gráfico de carga versus tempo e deslocamento versus número de ciclos. Todos os ensaios foram realizados com controle de força ou *load control*, em inglês.

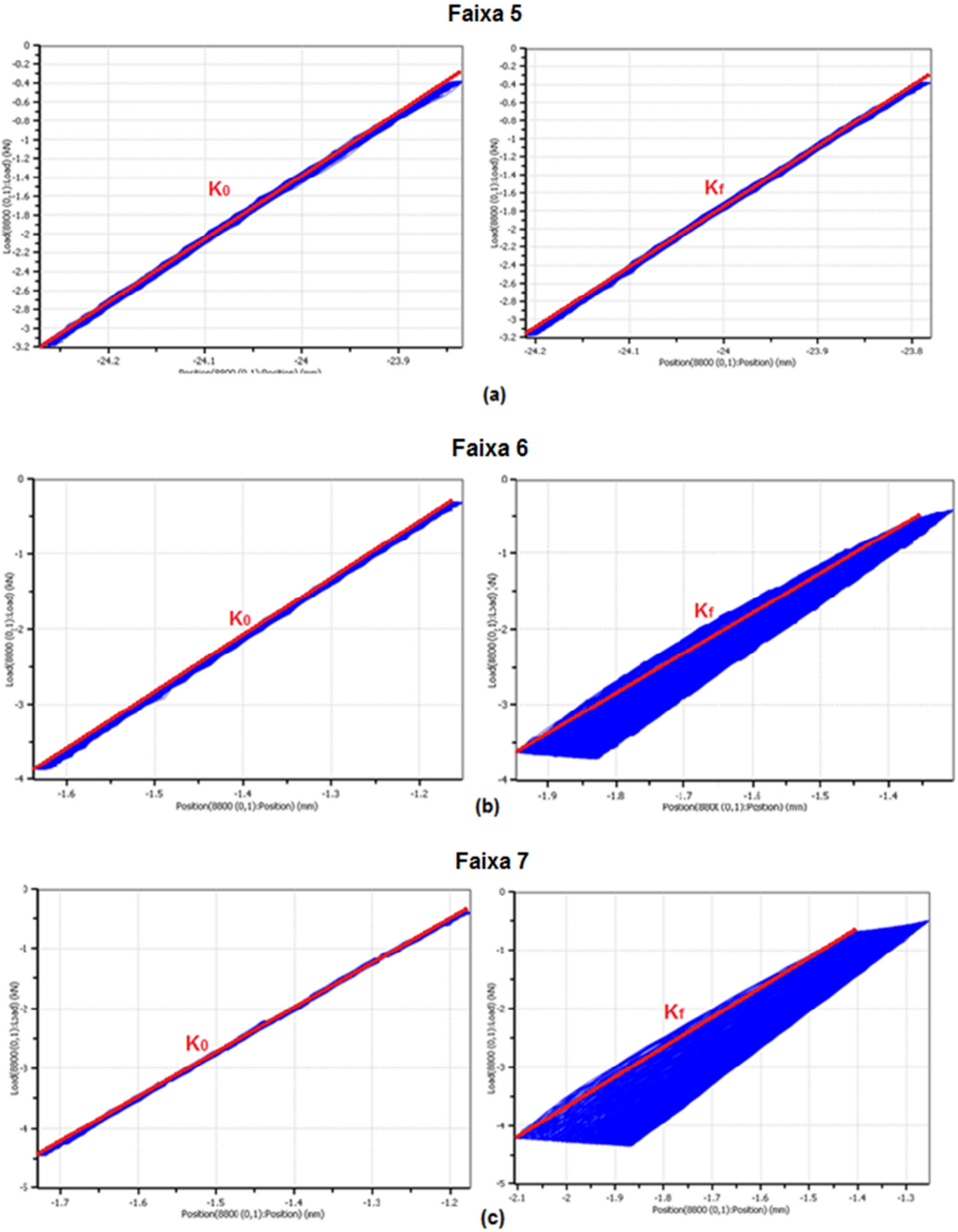
A seguir são feitas algumas comparações entre os resultados obtidos por tratamento superficial efetuado. Os gráficos P versus u são apresentados aos pares. Os gráficos à esquerda referem-se aos primeiros ciclos do ensaio de fadiga, enquanto os gráficos à direita referem-se aos últimos ciclos do ensaio de fadiga. Os ciclos intermediários não foram disponibilizados pelo software. No eixo das abcissas (*Position)* encontra-se o valor do deslocamento do pistão acionador da máquina de ensaios mecânicos em relação a sua origem. No eixo das ordenadas *(Load)* encontra-se o valor das cargas aplicadas.

Note que nestes gráficos os deslocamentos referentes às flechas dos c.p.s aumentam no sentido negativo do eixo das abscissas. Retas vermelhas foram acrescentadas aos gráficos e mostram a rigidez dos c.p.s para várias faixas, tempo de ensaio (início ou final) e tipos de acabamento superficial. Nestes diagramas, são definidas as rigidezes K, onde K_0 é a rigidez inicial do c.p. (nos primeiros ciclos do ensaio). K_i é uma rigidez intermediária, e K_f é a rigidez final (nos últimos ciclos do ensaio).

Interrompe-se o ensaio quando há uma variação de rigidez do c.p. consideravelmente grande, o que é indicado pela menor inclinação da reta vermelha. Quando isto ocorre, a trinca normalmente já se propagou até em torno da parte central do c.p., onde está localizada a força vertical, o que pode ser também verificado visualmente. O ensaio é interrompido neste ponto.

VI.1.1.1 Variação da Rigidez dos c.p.s tratados com granalha

Para os c.p.s do grupo A, que foram tratados com granalha, a variação da rigidez de c.p.s durante o ensaio de fadiga são mostrados na Fig. VI.1.



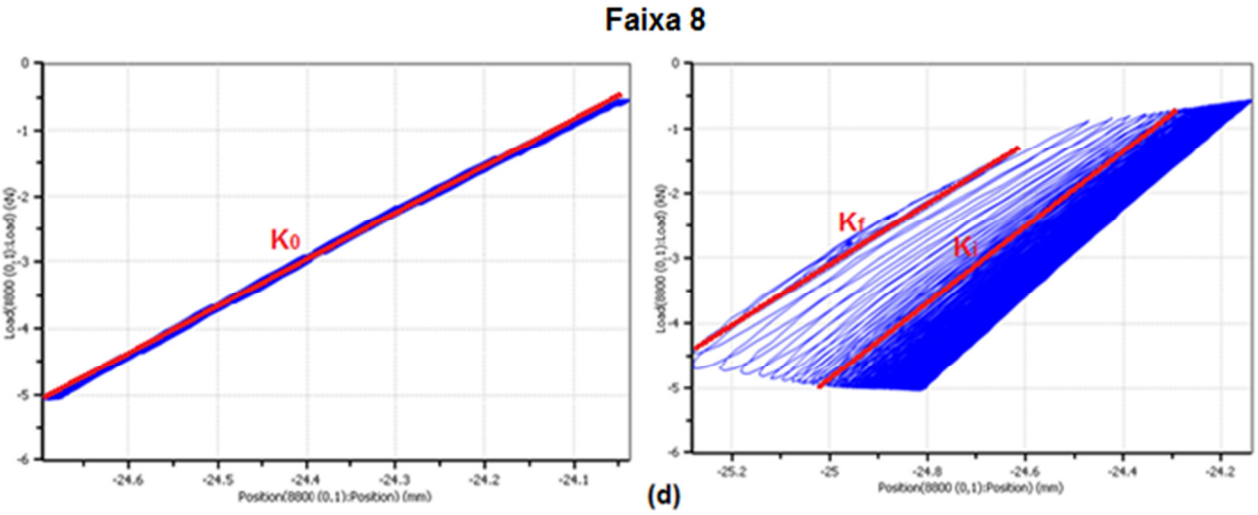
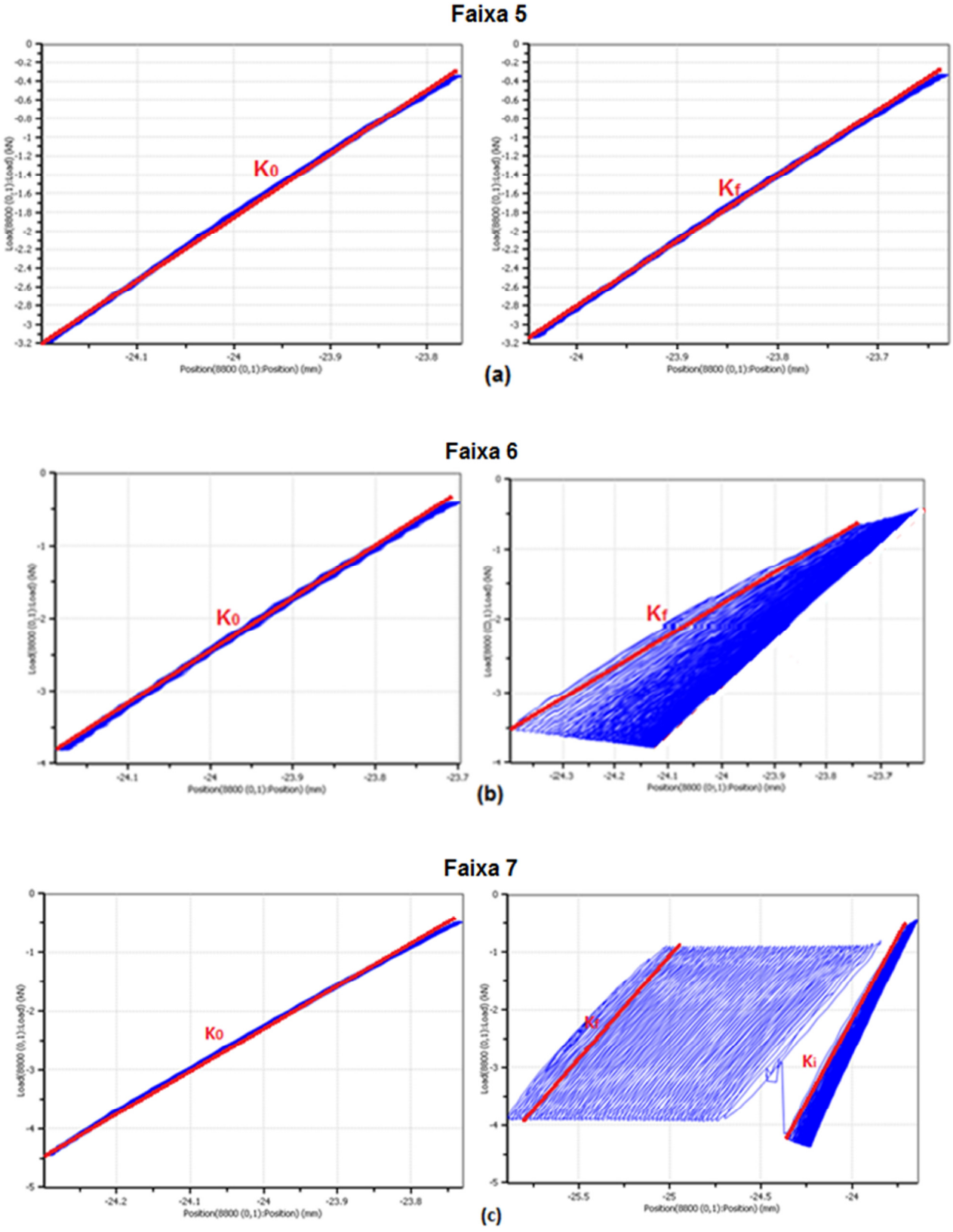


Figura VI.1: Exemplos de capturas dos ciclos iniciais e finais dos c.p.s tratados com granalha nos diferentes níveis de tensão.

Na faixa 5, onde foi aplicada 50% de F_R, a amplitude de carga imposta foi feita variar entre 3,15 kN e 0,315 kN compressivos, como ilustrado pela Fig. VI.1a. Nesta faixa, nos c.p.s não houve propagação de trinca até os 10^6 ciclos, logo é visto pela figura que praticamente não há mudança de inclinação da reta de K_0 para K_f. Considerou-se como vida infinita em fadiga. Na faixa 6, onde foi aplicada 60% da carga de referência F_R, a amplitude de carga imposta variou de 3,78 kN a 0,378 kN compressivos, como visto na Fig. VI.1b. Nestes c.p.s já houve propagação de trinca, como é possível ver na imagem da captura final a variação de rigidez de K_0 para K_f. Na faixa 7, onde foi aplicada 70% da carga de referência F_R, a amplitude de carga imposta variou de 4,41 kN a 0,441 kN compressivos, como visto na Fig. VI.1c. A inclinação de K_f em relação a K_0 foi mais significativa que na Fig. VI.1b. Na faixa 8, onde foi aplicada 80% de F_R, a amplitude de carga foi feita variar de 5,03 kN a 0,503 kN compressivos, como observado na Fig. VI.1d.

VI.1.1.2 Variação da Rigidez dos c.p.s tratados com areia

Para os c.p.s do grupo B, que sofreram tratamento com areia, a variação da rigidez de c.p.s durante o ensaio de fadiga é mostrada na Fig. VI.2.



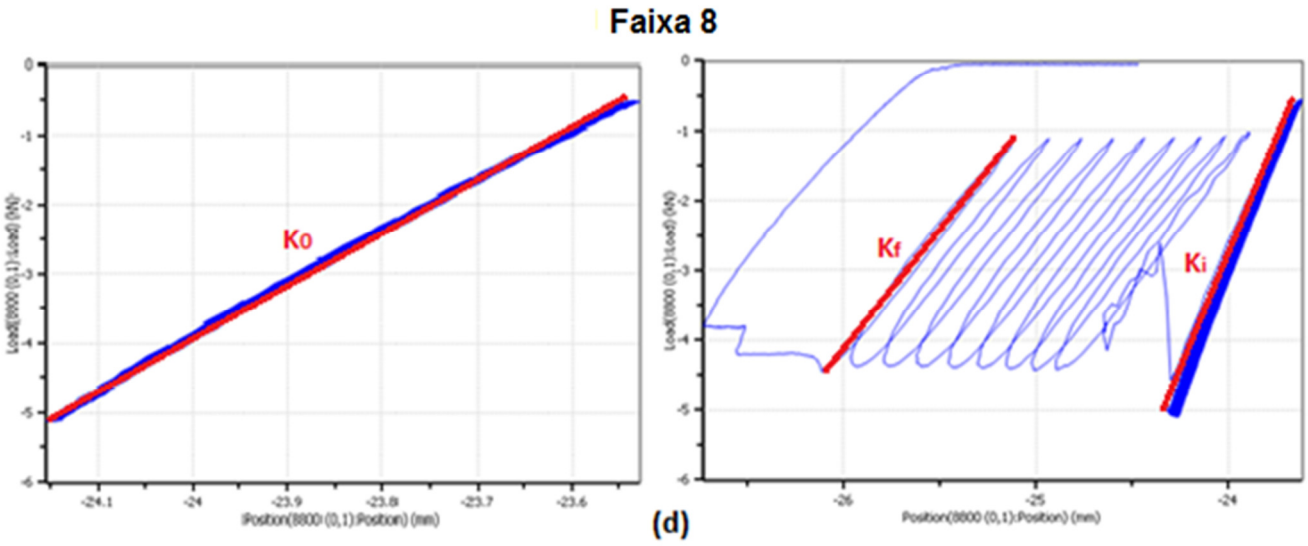
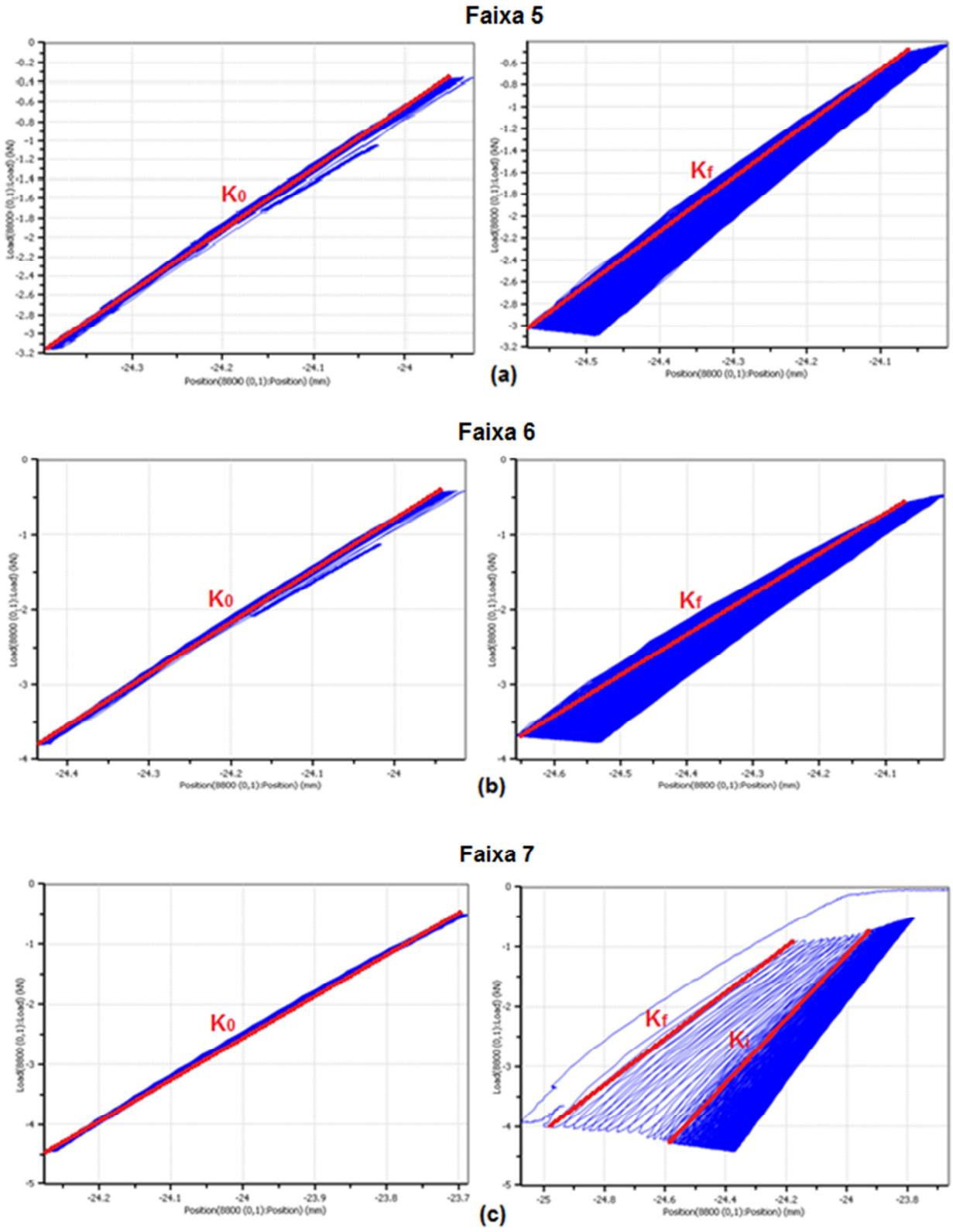


Figura VI.2: Exemplos de capturas dos ciclos iniciais e finais dos c.p.s tratados com areia nos diferentes níveis de tensão.

Os parâmetros dos ensaios foram os mesmos para todos os tipos de tratamento. Na faixa 5, da mesma forma como aconteceu nos c.p.s tratados com granalha, todos apresentaram vida infinita em fadiga, ultrapassando os 10^6 ciclos. Pode se ver na Fig. VI.2a que praticamente não houve mudança de rigidez no c.p. ensaiado. A partir da faixa 6 começou a haver propagação de trinca. Na faixa 7, o comportamento da curva foi bem característico para o ensaio. Pode-se observar que houve uma mudança mais gradual entre as rigidezes denominadas K_0 e K_i e houve um salto entre as rigidezes K_i e K_f, como indicado na Fig. VI.2c. Na faixa 8, o comportamento da curva foi semelhante ao da faixa anterior, apresentando o mesmo salto da rigidez intermediária K_i para a rigidez final K_f.

VI.1.1.3 Variação da Rigidez dos c.p.s tratados com escova rotativa MBX

Para os c.p.s tratados com escova rotativa MBX, do grupo C, a variação da rigidez de c.p.s durante o ensaio de fadiga é mostrada na Fig. VI.3.



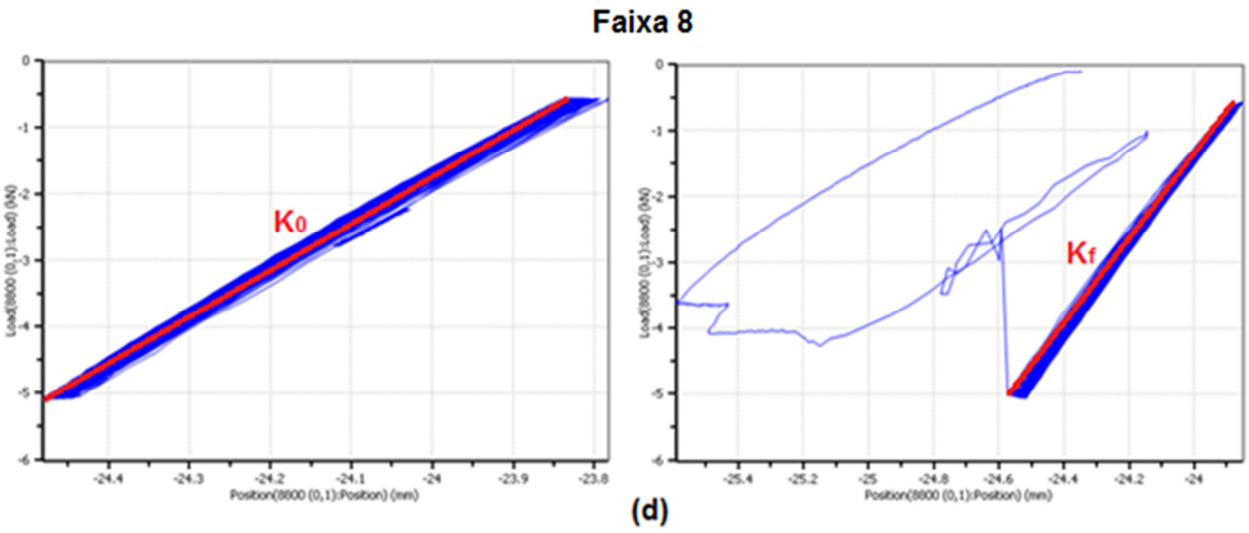


Figura VI.3: Exemplos de capturas dos ciclos iniciais e finais dos c.p.s tratados com escova rotativa MBX nos diferentes níveis de tensão.

O comportamento dos c.p.s empregados neste ensaio foi bem atípico. Já na faixa 5, como ilustrado pela Fig. VI.3a, a fase inicial apresenta instabilidades no controle de carga imposta. Há a mudança de uma rigidez K_0 para K_f logo nos primeiros ciclos. Estes c.p.s romperam com um número de ciclos bem inferior aos ensaios realizados com outros tipos de tratamentos superficiais. Na faixa 6, a 60% de F_R, o comportamento foi semelhante a da faixa 5, apresentando a mesma instabilidade inicial, seguido de uma mudança gradual de flexibilidade até o final do ensaio. Na faixa 7, apresentou uma queda de rigidez mais acentuada que na Fig. VI.3.b. Na faixa 8, a instabilidade de propagação foi ainda maior já no início do ensaio, como indicado pela Fig. VI.3d.

O estudo da fratura será feito posteriormente e será traçado um paralelo entre as imagens obtidas dos c.p.s com seus respectivos gráficos de carga versus deslocamento.

VI.1.2 Comparativo de flexibilidade dos c.p.s entre faixas

Foram elaborados gráficos que relacionam flexibilidade versus número de ciclos, para fazer-se um comparativo entre os tipos de tratamentos superficiais para cada faixa utilizada. Essas informações foram obtidas das tabelas elaboradas pelo software da *Instron* 8801, o *Wave Matrix*, chamadas *Stop Trends*, que relaciona os principais pontos do ensaio, e a tabela *Test Stop*, que fornece as informações do ensaio ponto a ponto. Estas são exemplificadas no Anexo A. A Fig. VI.4 ilustra os pontos extraídos dos ensaios realizados na faixa 5, onde foi calculada a flexibilidade dos c.p.s nos principais pontos ao longo do ensaio.

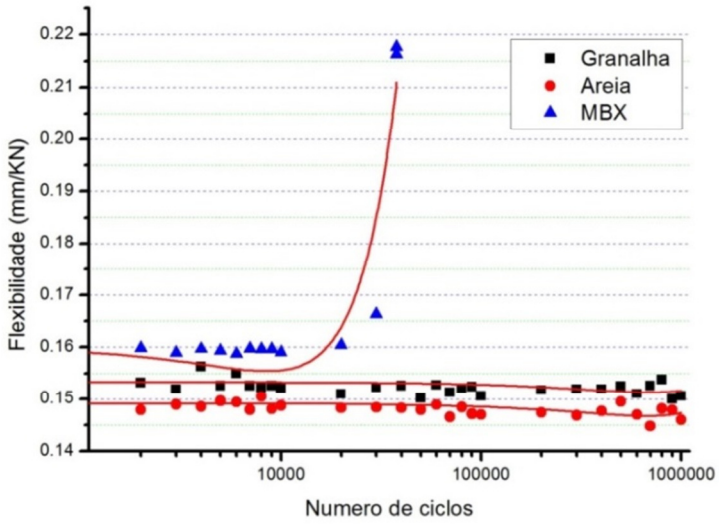


Figura VI.4: Flexibilidade versus nº de ciclos para a faixa 5.

Como pôde ser observado na Fig. VI.4, o c.p. tratado com escova rotativa rompeu em um nº de ciclos bem inferior ao número de ciclos alcançados pelos c.p.s tratados com granalha e areia, os quais não romperam. Note que na Fig. VI.4, e nas figuras seguintes VI.5, VI.6 e VI.7, ao passar as linhas de tendência (linhas vermelhas contínuas) pelos pontos experimentais pode ser visto, principalmente para um nº de ciclos elevado, há uma aparente diminuição da flexibilidade antes de seu aumento final, que não é um comportamento real.

Na Fig. VI.5 mostra-se os pontos retirados da faixa 6.

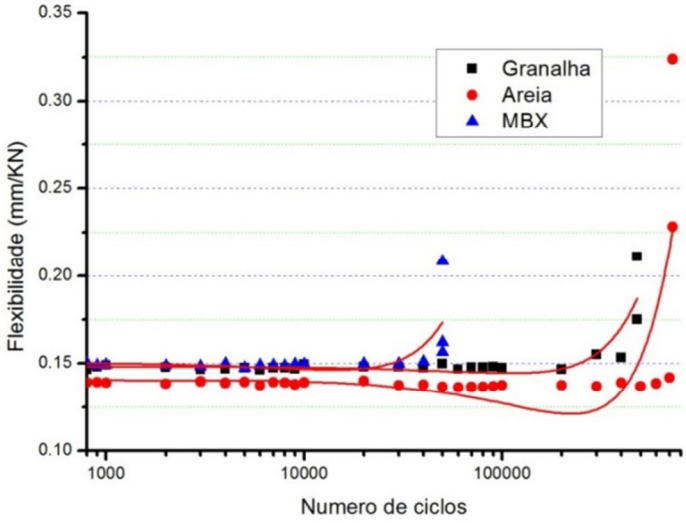


Figura VI.5: Flexibilidade versus nº de ciclos para a faixa 6.

Pelo gráfico da Fig. VI.5, é possível ver que o c.p. tratado com areia é o que apresenta o melhor desempenho, por apresentar uma maior vida em fadiga. O c.p. tratado com escova MBX apresentou o pior desempenho. A Fig. VI.6 apresenta o desempenhos dos c.p.s na faixa de ensaio 7.

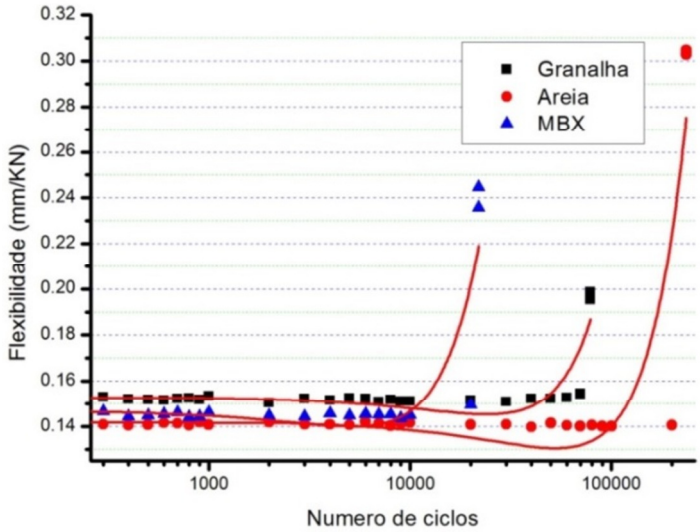


Figura VI.6: Flexibilidade versus nº de ciclos para a faixa 7.

Como observado na Fig. VI.6, novamente o c.p. tratado com areia apresenta melhor desempenho em fadiga.

A curva flexibilidade versus número de ciclos para a faixa 8 já aponta o comportamento esperado, ilustrado na Fig. VI.7, onde os c.p.s tratados com areia apresentam os melhores resultados, seguido pelos ensaiados com granalha, e por último os tratados com escova rotativa MBX. Estes últimos apresentaram resultado bastante insatisfatório em todos os c.p.s tratados.

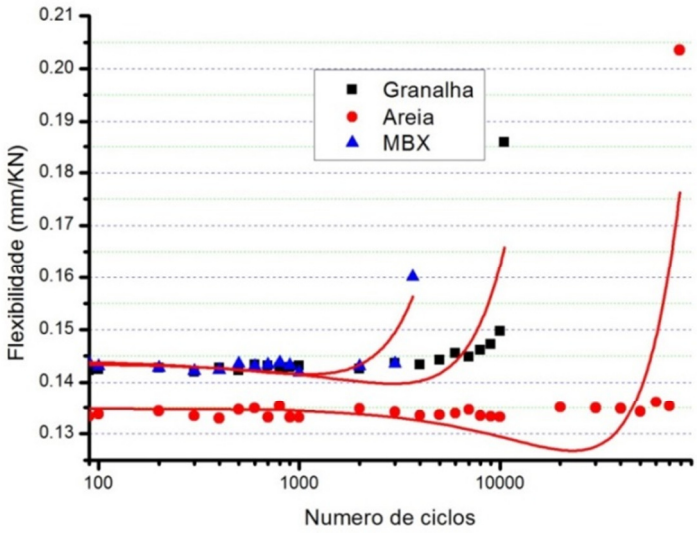


Figura VI.7: Flexibilidade versus nº de ciclos para a faixa 8.

Analisando-se as Figs. de VI.5 a VI.7 nota-se a flexibilidade dos c.p.s mantiveram-se praticamente constantes por todo o ensaio, só começando a aumentar sua flexibilidade apenas na fase final do ensaio de fadiga.

Foi avaliada também a variação de rigidez experimental para cada tipo de tratamento realizado. Foram avaliadas as rigidezes experimentais iniciais e finais, e os tamanhos de trinca observados tanto experimentalmente quanto analiticamente, como observado na Tabela VI.2.

Tabela VI.2a: Rigidezes e tamanhos de trinca na faixa 5.

Relação entre tamanho de trinca *a* e rigidez *K* na faixa 5					
	Rigidez (KN/mm)		**Trinca exp. (mm)**	**Trinca analítica (mm)**	**Erro**
	Inicial	**Final**	**Final**	**Final**	**(%)**
Granalha	6,44	6,44	Não propagou	Não propagou	-
Areia	6,59	6,59	Não propagou	Não propagou	-
MBX	6,13	3,41	57	61	+6,6

Tabela VI.2b: Rigidezes e tamanhos de trinca na faixa 6.

Relação entre tamanho de trinca *a* e rigidez *K* na faixa 6					
	Rigidez (KN/mm)		**Trinca exp. (mm)**	**Trinca analítica (mm)**	**Erro**
	Inicial	**Final**	**Final**	**Final**	**(%)**
Granalha	6,57	4,83	44	49	+10,2
Areia	7,12	3,51	51	60	+15,0
MBX	6,73	4,77	42	50	+16,0

Tabela VI.2c: Rigidezes e tamanhos de trinca na faixa 7.

Relação entre tamanho de trinca a e rigidez *K* na faixa 7					
	Rigidez (KN/mm)		**Trinca exp. (mm)**	**Trinca analítica (mm)**	**Erro**
	Inicial	**Final**	**Final**	**Final**	**(%)**
Granalha	6,42	5,76	42	43	+2,3
Areia	6,92	3,48	54	61	+11,5
MBX	6,5	3,67	56	59	+5,1

Tabela VI.2d: Rigidezes e tamanhos de trinca na faixa 8.

Relação entre tamanho de trinca *a* e rigidez *K* na faixa 8					
	Rigidez exp. (KN/mm)		**Trinca exp. (mm)**	**Trinca analítica (mm)**	**Erro**
	Inicial	**Final**	**Final**	**Final**	**(%)**
Granalha	7,18	4,37	54	53	-1,9
Areia	7,93	4,0	57	56	-1,8
MBX	6,74	4,8	54	50	-7,4

Os valores de rigidezes iniciais e finais obtidos através dos ensaios experimentais foram utilizados nas equações de tamanho de trinca para obtenção do tamanho de trinca final analítico. Os resultados obtidos para o tamanho de trinca final analítico apresentaram, na maioria das vezes, erro relativo à medição experimental inferior a 10%.

Nota-se uma grande dificuldade em se calcular a rigidez experimental nos c.p.s através do gráfico fornecido pela máquina de ensaios mecânicos, pois as curvas de força versus deslocamento não são sempre lineares. Quando analisadas detidamente, é possível ver que para um determinado ciclo, o valor de rigidez que antes se supôs único, pode variar ao longo deste, como mostra a Fig. VI.8 de uma curva carga versus deslocamento feita no software *Origin* 8.0.

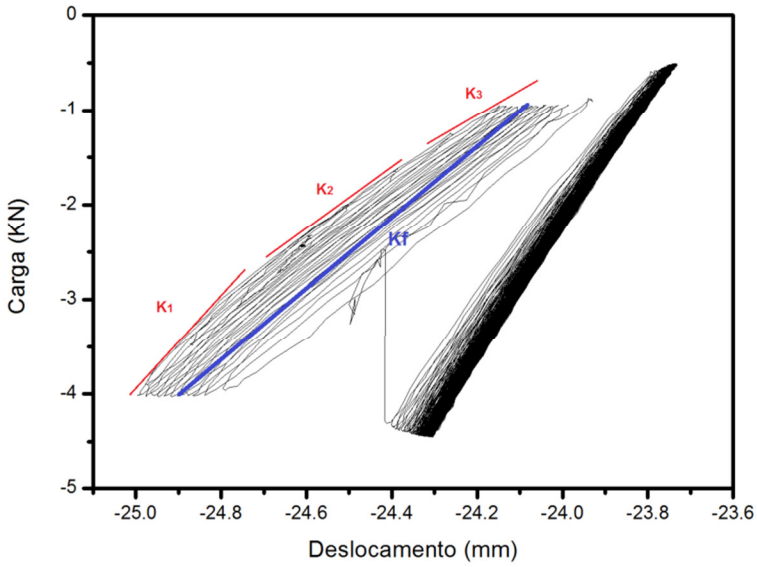


Figura VI.8 Variação da rigidez em uma curva carga versus deslocamento em um mesmo ciclo.

É visto na figura que há uma gradual mudança de rigidez ao longo do ciclo realizado, o que pode explicar uma parte das incertezas na medição da trinca através do modelo analítico desenvolvido. Conforme relataram BUDZIK *et al.* (2012) e de MOURA *et al.* (2008), os quais realizaram ensaios estáticos em vigas submetidas ao modo II de solicitação, a teoria da viga simples superestima as medições reais de tamanho de trinca *a*. Devido a isso, são sugeridos pelos autores correções no modelo de propagação de trinca, conforme pode ser verificado também em VALVO (2013).

A seguir as curvas de fadiga serão mostradas e analisadas para c.p.s com os três acabamentos superficiais distintos.

VI.1.3 Curvas de Fadiga

A Fig. VI.9 mostra o desempenho à fadiga dos c.p.s com os três tratamentos superficiais distintos para os quatro níveis de carregamento.

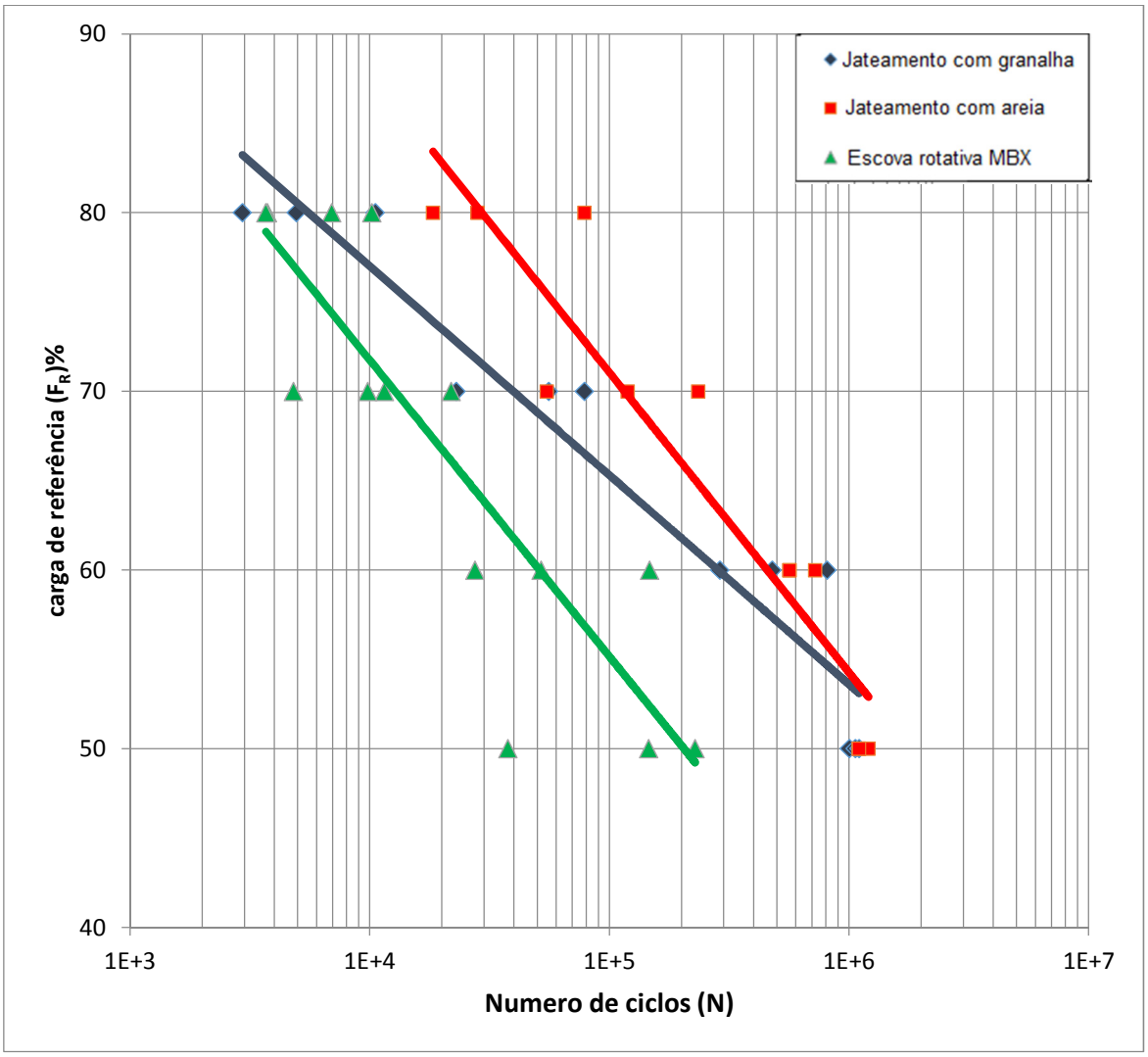


Figura VI.9: Gráfico percentual de carga versus número de ciclos para c.p.s com três acabamentos superficiais distintos.

O gráfico mostrado na Fig. VI.9 tem a abscissa em escala logarítmica, com o número de ciclos abrangendo a faixa de 10^3 a 10^7 ciclos. A ordenada em escala linear, mostrando percentuais da carga de referência F_R, obtida experimentalmente através de ensaios estáticos, vide Apêndice D.

O software Excel foi utilizado para passar três retas de tendência pelos pontos experimentalmente levantados. Analisando as posições relativas destas retas de tendência, pode-se afirmar que os c.p.s com escova rotativa MBX apresentaram o pior desempenho em vida à fadiga, pois a reta de tendência deste tipo de tratamento superficial ficou mais à esquerda das demais, mostrando vidas mais curtas, para todos os níveis de carregamento, que os outros dois tratamentos superficiais.

Os c.p.s submetidos ao tratamento superficial de jateamento de areia, por outro lado, tiveram o melhor desempenho em todos os níveis de carregamento, enquanto os c.p.s tratados superficialmente com jateamento de granalha tiveram um desempenho intermediário. Observa-se, ainda que, os c.p.s tratados superficialmente com jateamento de granalha para altos níveis de carga tiveram um desempenho fraco, se aproximando do desempenho dos c.p.s tratados por escova rotativa. Já para níveis mais baixos de carregamento o desempenho dos c.p.s tratados com jateamento de granalha mostraram um melhor desempenho, aproximando-se do desempenho dos c.p.s tratados com jateamento de areia.

VI.2 Resultados de Fratura

As fraturas são estudadas quanto aos seus tipos, à saber: adesiva, quando o adesivo se descola do substrato; e coesiva, quando a própria cola tem suas ligações atômicas rompidas, além de mista, quando a fratura começa de um modo e termina de outro. Neste capítulo serão estudados alguns c.p.s que foram abertos manualmente após os ensaios de fadiga, para que esta análise fosse realizada. Foram consideradas como superfície de fratura apenas aquela gerada pelo carregamento de fadiga. Também foram medidos os tamanhos de trinca finais para que se fizesse um comparativo entre os tratamentos realizados.

VI.2.1 Análise do comprimento das trincas

Após a abertura dos c.p.s, as trincas propagadas foram medidas com uma régua e relacionadas na tabela VI.3. O valor médio das trincas foi relacionado na tabela, descontando-se previamente o valor da pré-trinca de 40 mm. Da mesma forma, o percentual do comprimento útil do c.p., que é o quanto a trinca propagou em relação a distância entre os suportes de 160 mm, foi considerado o valor médio entre os c.p.s de um mesma faixa. A Fig. VI.10 ilustra como foi feita a medição das trincas nos c.p.s.

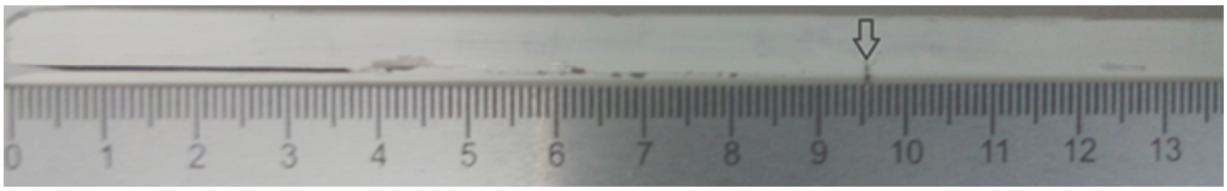


Figura VI.10: Exemplo de medição das trincas.

A Tabela VI.3 mostra, de forma resumida, a média dos comprimentos finais das trincas geradas pela propagação das trincas nos c.p.s.

Tabela VI.3: Comprimento finais médios de trincas nos c.p.s.

Faixa	Tratamento Mecânico					
	Granalha		Areia		MBX	
	Tamanho da trinca (mm)	Percentual do comprimento útil do c.p. (%)	Tamanho da trinca (mm)	Percentual do comprimento útil do c.p. (%)	Tamanho da trinca (mm)	Percentual do comprimento útil do c.p. (%)
50	0	0	0	0	45	34
60	41	30	42	31	36	26
70	46	34	57	42	44	33
80	53	39	60	44	63	46

A 50% F_R apenas os c.p.s tratados com escova rotativa MBX apresentaram fratura. Com 60% F_R, os c.p.s tratados com areia apresentaram o maior tamanho médio de trinca, seguidos dos tratados com granalha. A 70% F_R o comportamento foi semelhante ao anterior, com areia apresentando os maiores comprimentos de propagação medidos. Com 80% F_R o comportamento já foi diferente, com os c.p.s tratados com escova rotativa MBX apresentando as maiores tamanhos de trincas finais, seguidos dos c.p.s tratados com areia e, por último, os tratados com granalha.

A Fig. VI.11 ilustra a média dos tamanhos de trincas propagados em cada c.p. ensaiado por tipo de acabamento superficial e por percentual de carga.

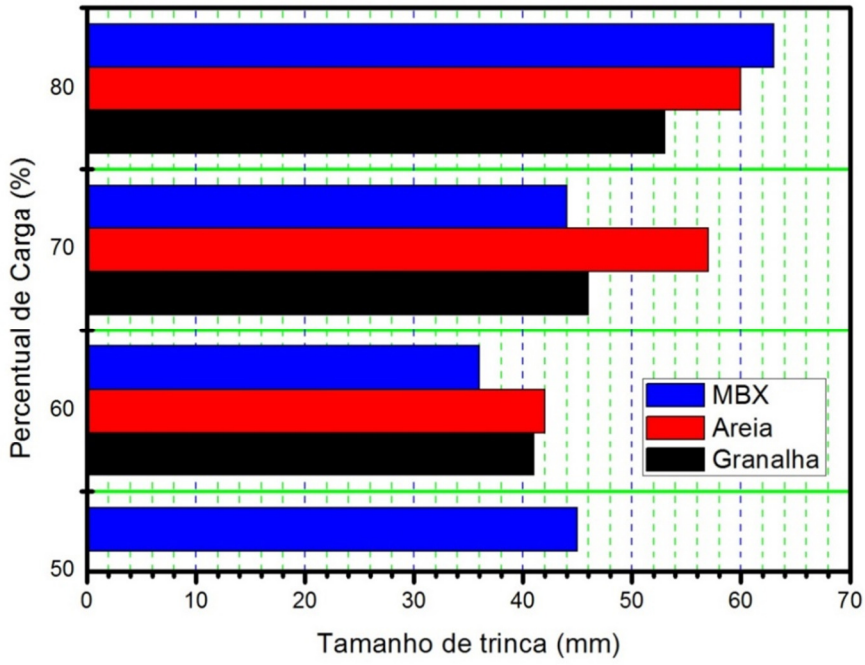


Figura VI.11: Tamanhos de trinca propagados em cada tipo de tratamento.

Quando traça-se um paralelo com o número de ciclos médio desenvolvido por cada tipo de tratamento superficial em fadiga, é possível fazer uma melhor relação entre os comprimentos de trinca propagados e a vida em fadiga. A Figura VI.12 exibe o gráfico de barras do percentual de carga versus número de ciclos para cada tipo de tratamento superficial.

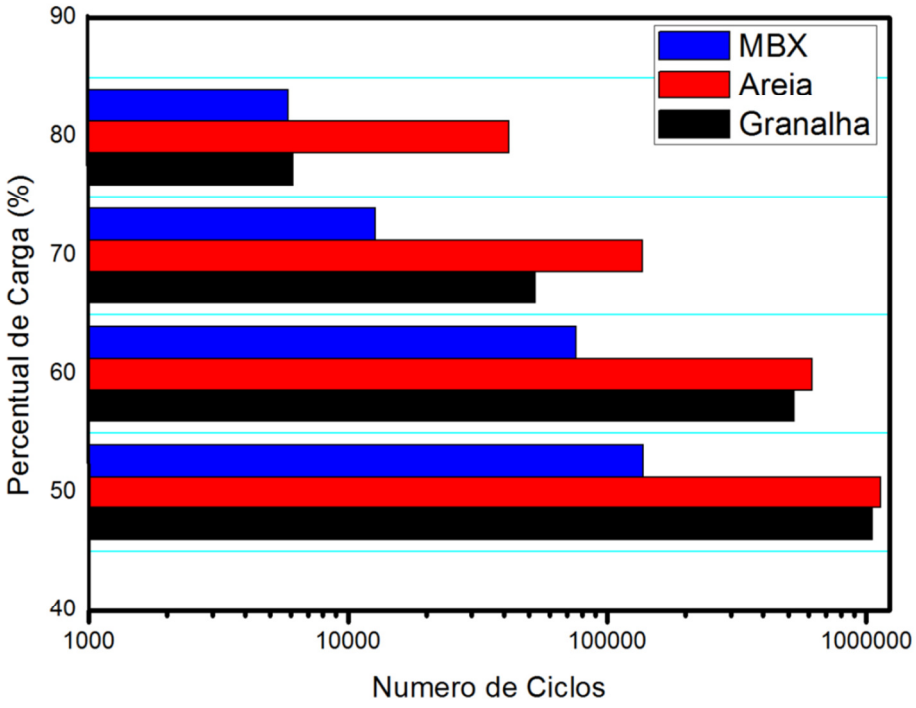


Figura VI.12: Número de ciclos desenvolvido por percentual de carga para cada tipo de tratamento.

Como pode ser visto na Fig. VI.12 os c.p.s ensaiados com areia foram os que apresentaram o maior número de ciclos em todos os percentuais de carga entre os tratamentos aplicados.

VI.2.2 Análise da fratura

Após encerar o ensaio de fadiga, alguns c.p.s foram abertos para análise. Para cada tipo de tratamento superficial, embora o número de ciclos até a ruptura tenha variado, superfícies de fratura características foram desenvolvidas, como pode ser visto na Fig. VI.13, que ilustra c.p.s abertos, tratados, respectivamente, com granalha, areia e escova MBX.

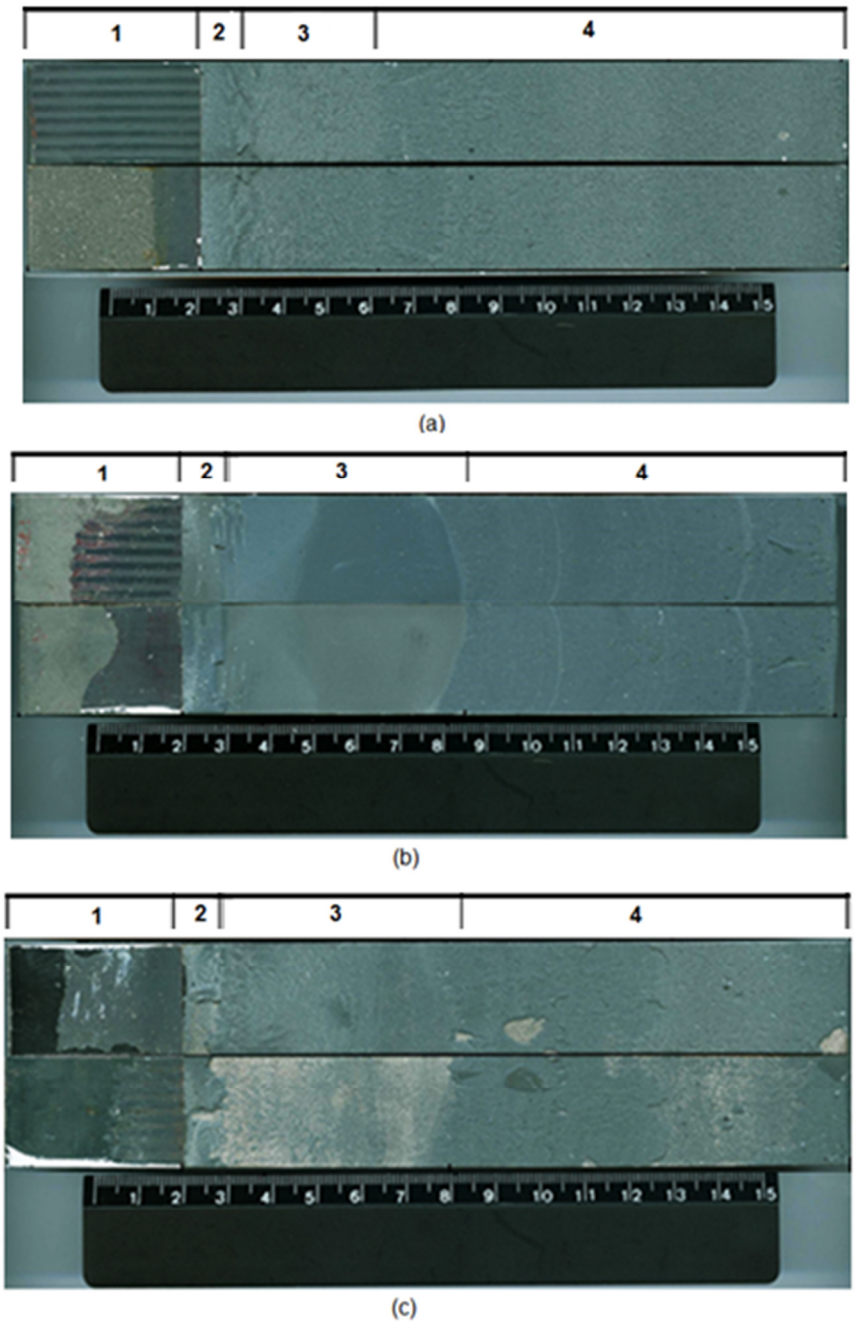


Figura VI.13: Subdivisões da fratura no c.p. tratados com: (a) granalha, (b) areia e (c) escova rotativa.

Como ilustra a Fig. VI.13, são quatro as regiões distintas identificáveis visualmente nos c.p.s, a saber: região 1, onde se localiza a pré-trinca; a região 2, chamada neste trabalho de “dente”; a região 3, o trecho de propagação final da trinca e, por último, a região 4, a região gerada quando da abertura manual do c.p. para estudo. A fratura nesta quarta região foi desconsiderada por não ter sido causada por fadiga.

FLOROS *et al.* (2015) fizeram estudos de análise de fratura, considerando o tipo de propagação, se estável ou instável, e os tipos de fratura encontrados, sejam coesivas ou adesivas, dividindo os corpos de prova em dois grupos, sendo no primeiro aplicado apenas um tipo de adesivo epoxy, o EA 9695, e uma combinação de dois tipos diferente de adesivos epoxy, o EA 9395 e o EA 9396. Os substratos da junta colada em questão eram feitos de material compósito. Foram ensaiados c.p.s nos modos I, II e modo misto

Discute-se no próximo item as superfícies de fratura produzidas para cada tipo de tratamento superficial.

VI.2.2.1 Corpos de provas tratados com granalha

Embora tivessem apresentado um desempenho intermediário em relação a desempenho em fadiga nos ensaios dinâmicos, os c.p.s ensaiados com granalha apresentaram o tipo de fratura que é mais desejável numa junta colada, que é a fratura coesiva. A Fig. VI.14 ilustra a imagem da fratura e a curva de carga versus deslocamento de um c.p. ensaiado na faixa 7.

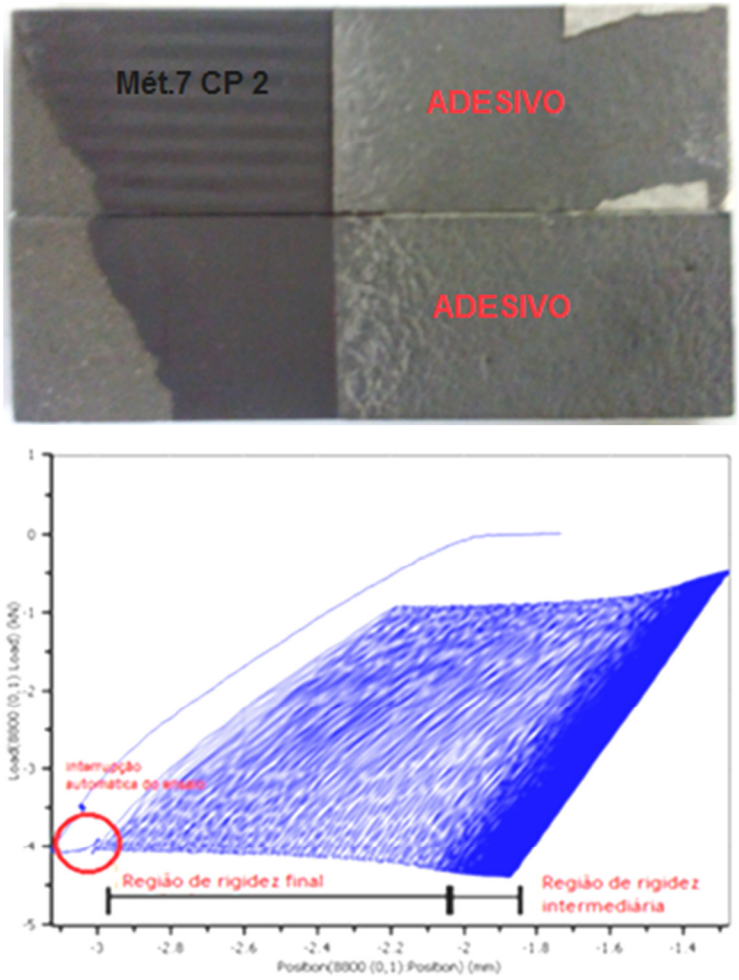


Figura VI.14: Imagem de fratura e curva de carga versus deslocamento do c.p. nº 2 da faixa 7.

Na Fig. VI.14 mostra uma região de mudança mais gradual da rigidez, denominada região de rigidez intermediária. A região de rigidez final, a rigidez variou mais rapidamente, como é possível ver na figura o maior espaçamento entre as linhas que indicam os ciclos realizados.

O c.p. ensaiado na faixa 8 apresentou uma mudança brusca de rigidez, como visto em seu gráfico carga *versus* deslocamento na Fig. VI.15, da região de rigidez intermediária para região de rigidez final.

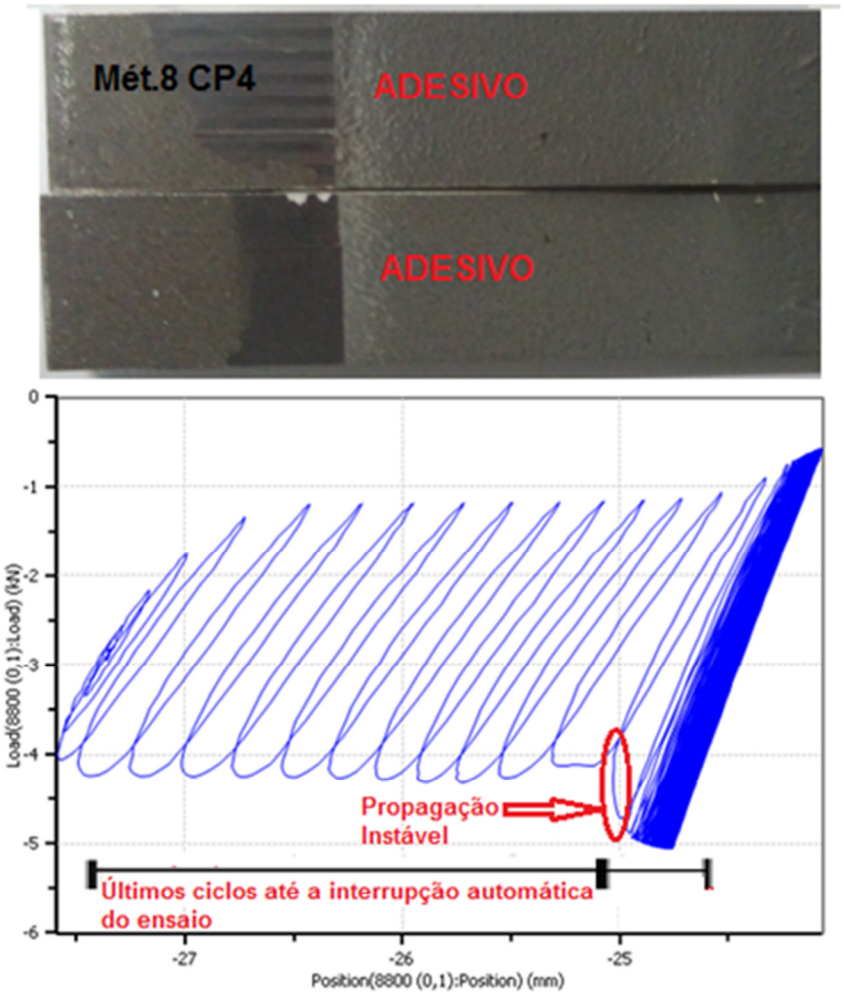


Figura VI.15: Imagem de fratura e curva de carga versus deslocamento do c.p. nº 4 da faixa 8.

Na 2ª região, foi observada a formação de uma região caracterizada por uma textura mais clara na região da fratura, com o comprimento medindo por volta de 10 mm. Esta região pode ser observada mais detalhadamente na Fig. VI.16. O salto na Fig. VI.15 mostra um instante de variação brusca da rigidez. Após a propagação da trinca, o ensaio foi interrompido, seja através de intertravamento da máquina de ensaios mecânicos, quando há um deslocamento maior que 1 mm, ou quando o operador percebe uma diminuição acentuada da rigidez do c.p.

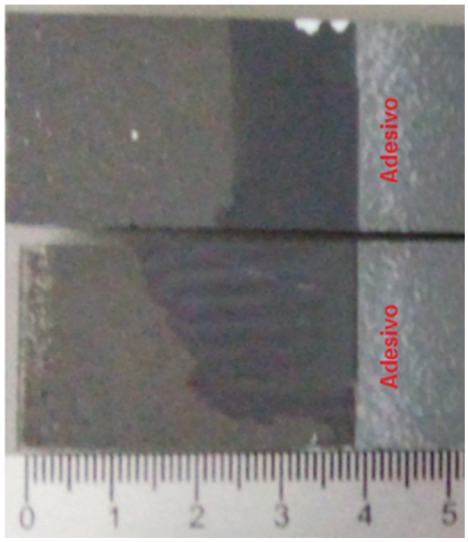


Figura VI.16: Ampliação da região 2 do c.p. nº 4 da faixa 8.

VI. 2.2.2 Corpos de prova tratados com areia

Os c.p.s tratados com areia foram os que apresentaram melhor desempenho em fadiga, porém a fratura obtida através da análise da superfície foi adesiva, o que não é ideal.

Uma característica notável deste ensaio foi a mudança da superfície de descolamento do c.p., formando uma espécie de “dente”. No início de propagação da trinca, o adesivo se descolou primeiro de uma das barras que compunham o c.p., vindo após ter propagado uma distância em torno de 10 mm se descolar da outra metade. Esse comportamento foi mais pronunciado nas maiores faixas de carga testados, os métodos 7 e 8. A Fig. VI.17 ilustra um exemplo deste fenômeno.

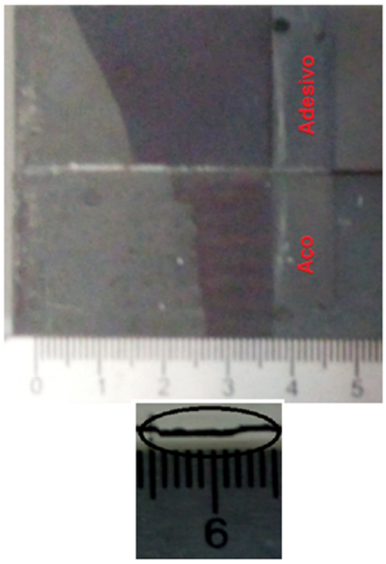


Figura VI.17: “Dente” formado durante a propagação da trinca.

Esse comportamento foi semelhante ao observado nos c.p.s tratados com granalha, com a exceção de que nestes não houve formação de dente, já que a fratura foi coesiva, e, portanto, não houve descolamento do adesivo no substrato.

O c.p. ensaiado na faixa 6 foi aberto para análise e sua curva de carga versus deslocamento é representada pela Fig. VI.18.

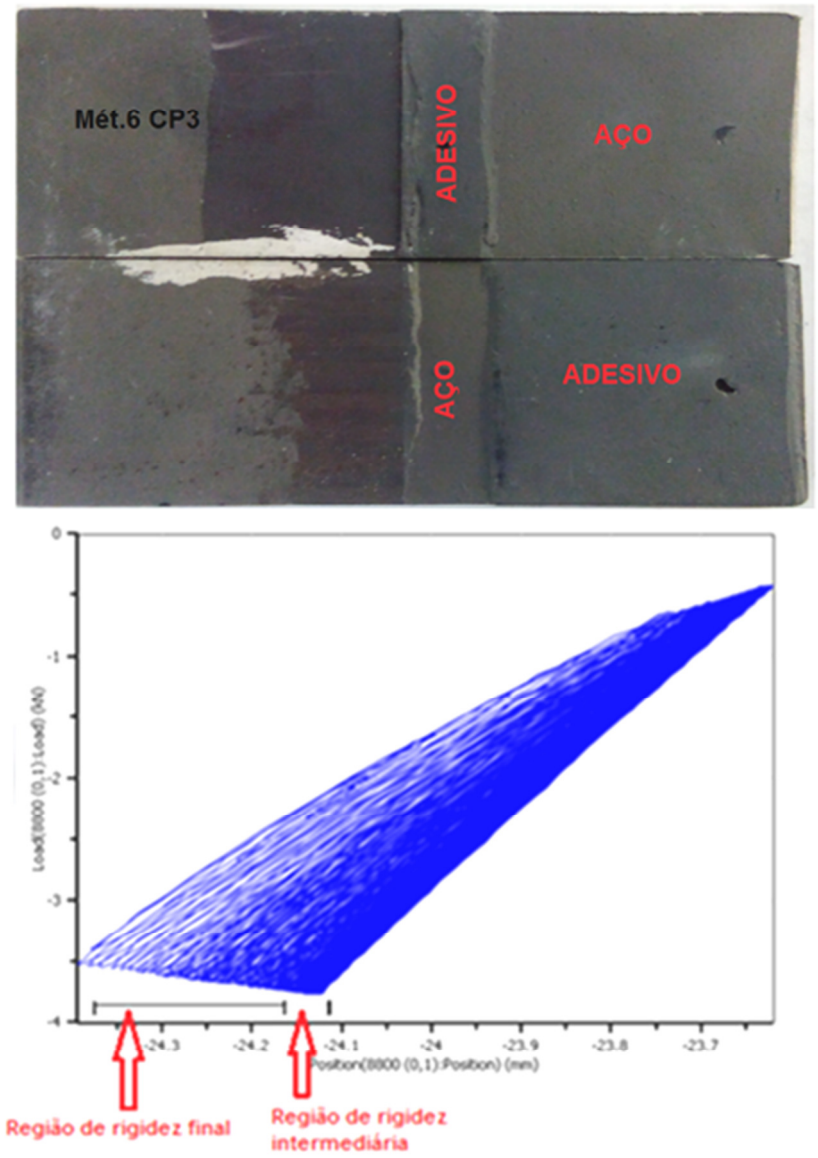


Figura VI.18: Imagem de fratura e curva de carga versus deslocamento do c.p. nº 3 da faixa 6.

Este c.p. rompeu com 724.000 ciclos. Através das tabelas *Stop Trends* e *Test Stop* presente nos anexos, fornecidas pelo software da máquina de ensaios mecânicos, o *Wave Matrix*, foi possível verificar que nos últimos quatro mil ciclos, o corpo de prova apresentou uma diminuição de rigidez mais acelerada, o que confirma a observação feita na curva de carga versus deslocamento.

Em seguida, foi aberto um c.p. ensaiado na faixa 7, como ilustra a Fig. VI.19.

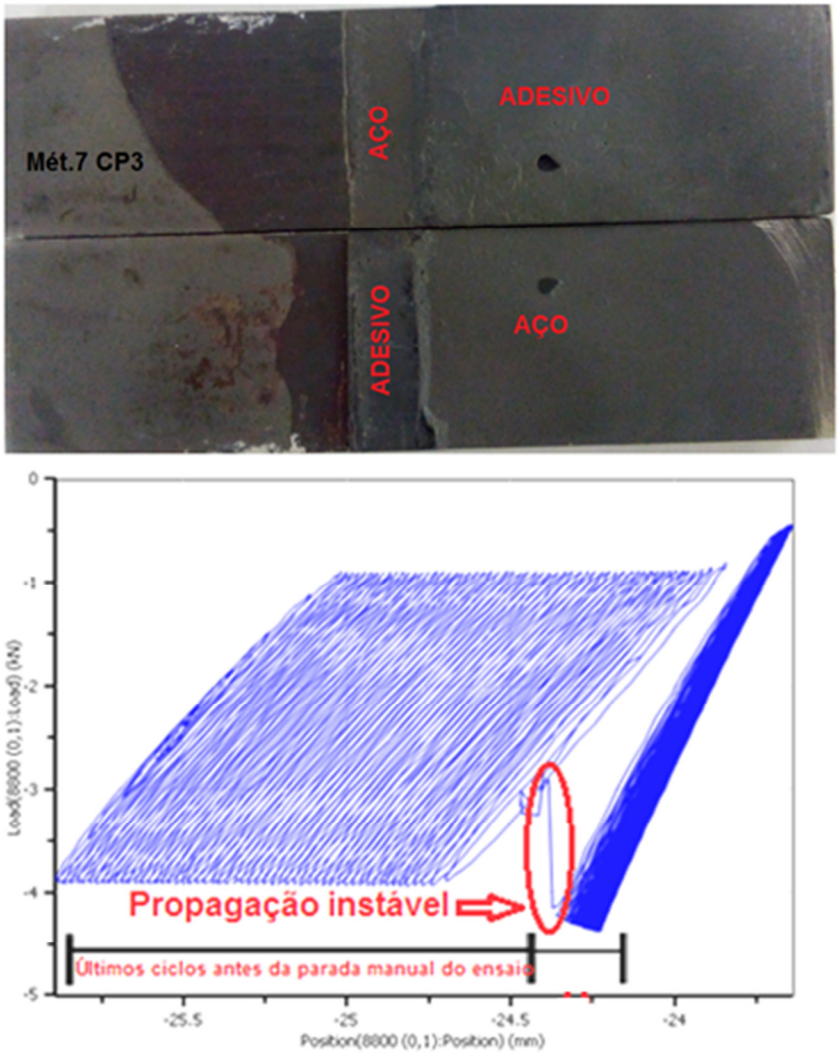


Figura VI.19: Imagem de fratura e curva de carga versus deslocamento de c.p. nº 3 da faixa 7.

Este c.p. rompeu com 235142 ciclos e através da análise da Fig. VI.19, verifica-se que a flexibilidade diminui muito pouco durante o período de propagação. O salto na Fig. VI.19 mostra um instante de variação brusca da rigidez. Este ensaio foi interrompido manualmente pelo operador ao observar mudança considerável da rigidez do c.p.

VI.2.2.3 Corpos de provas tratados com escova rotativa MBX

Os c.p.s tratados com escova rotativa MBX foram os que apresentaram as maiores irregularidades na superfície e falhas na colagem. O tipo de falha encontrado majoritariamente foi a adesiva, o que indicou uma adesão insatisfatória entre o substrato e o adesivo. Os c.p.s submetidos a este tipo de tratamento foram os únicos que apresentaram falha na faixa 5, com um números de ciclos bem inferior aos tratamentos superficiais anteriores, embora o aumento da flexibilidade não tenha sido tão grande como nos c.p.s tratados com areia. Esse fato também explica a superfície de ruptura bastante irregular nos c.p.s, já que não há um descolamento uniforme das placas do substrato. A Fig. VI.20 ilustra a fratura e a curva de carga versus deslocamento do c.p. ensaiado na faixa 5.

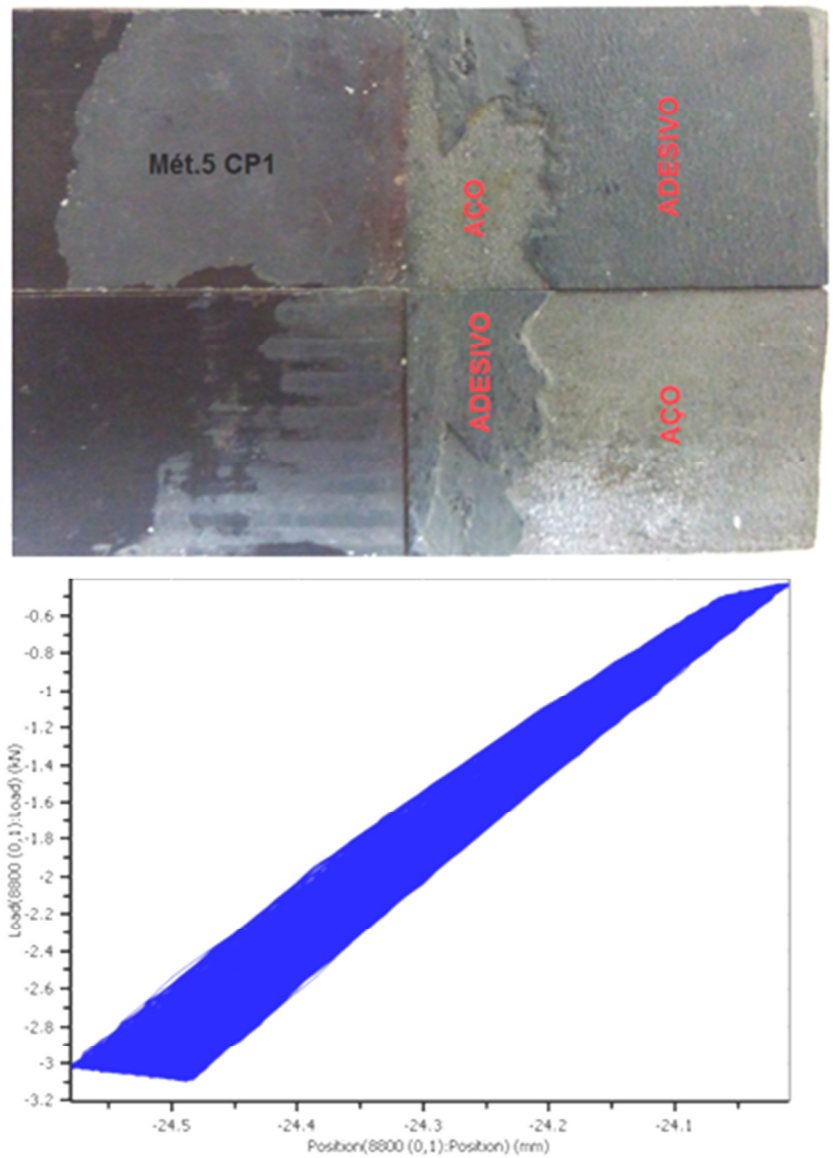


Figura VI.20: Imagem de fratura e curva de carga versus deslocamento de c.p. nº 1 da faixa 5.

Neste primeiro patamar de carga, a 50% F_R, o corpo apresentou propagação de trinca com baixo número de ciclos, neste caso, com 37828 ciclos, ao contrário dos outros tratamentos empregados, onde foi observada vida infinita em fadiga para a faixa 5 de carga.

O c.p. ensaiado na faixa 7 é apresentado na Fig. VI.21.

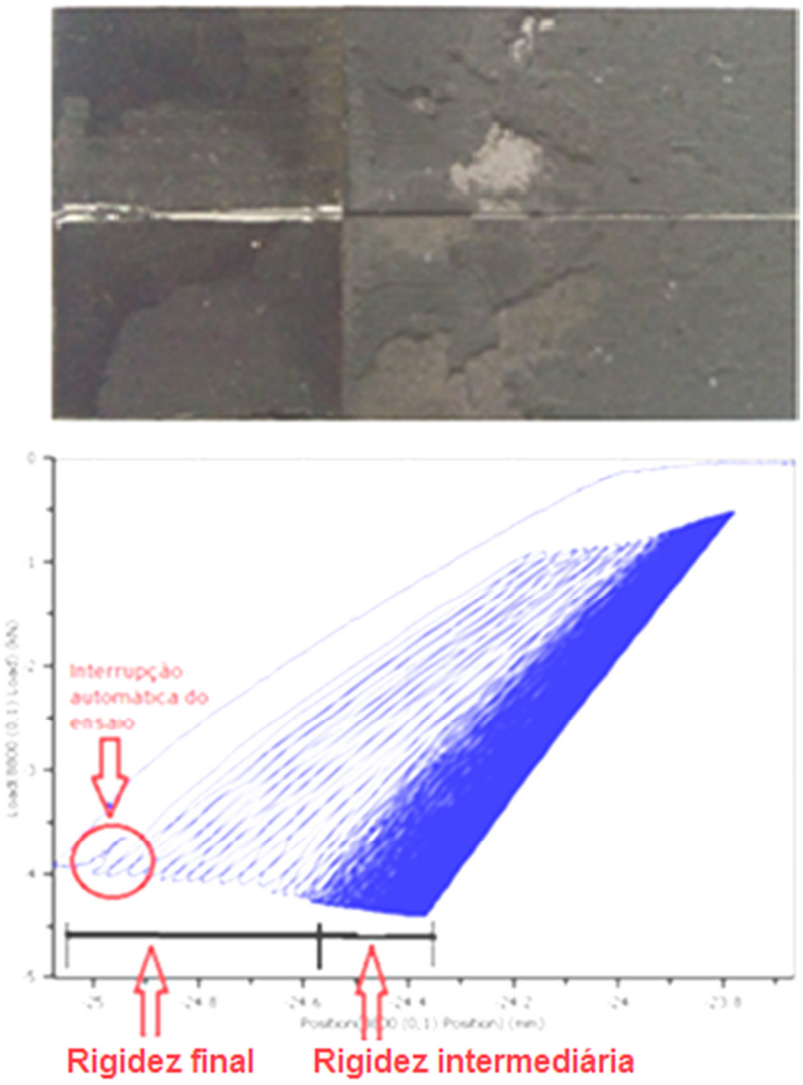


Figura VI.21: Imagem de fratura e curva de carga versus deslocamento de c.p. nº 2 da faixa 7.

A superfície de fratura criada neste c.p. foi bastante irregular. Foi visível a fratura adesiva, caracterizada pelo descolamento do adesivo do substrato. Por último, foi aberto um c.p. submetido a faixa 8 de ensaio, como ilustra a Fig. VI. 22.

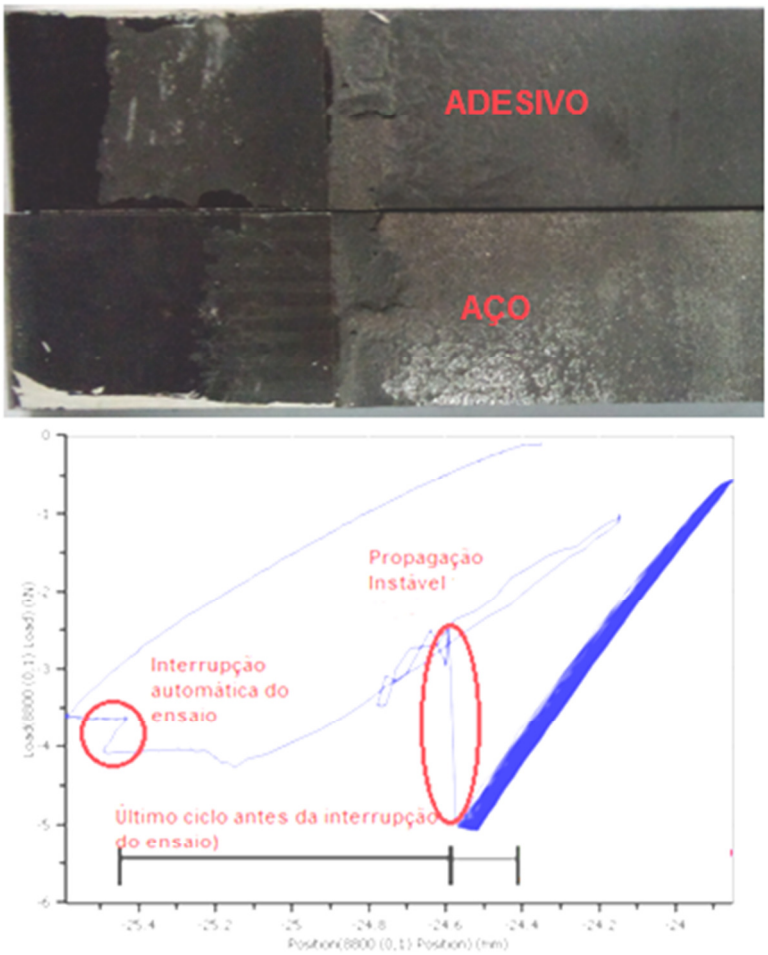


Figura VI.22: Imagem de fratura e curva de carga versus deslocamento de c.p. nº 3 da faixa 8.

Nesta imagem de fratura é identificada novamente uma formação de um “dente”, com seu comprimento medindo em torno de 10 mm. O salto na Fig. VI.22 mostra um instante de variação brusca da rigidez. O ensaio foi interrompido automaticamente após esta fratura, devido a um deslocamento excessivo do pistão acionador da máquina de ensaios mecânicos.

Capítulo VII – Conclusões

O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho das juntas coladas submetidas à fadiga de alto ciclo em modo de carregamento II, ou cisalhamento puro, para três tipos de tratamentos superficiais: granalha, areia e escova rotativa MBX. Em todos os ensaios realizados, os c.p.s tratados com areia apresentaram melhor desempenho em vida em fadiga.

Porém, a utilização de areia como partícula abrasiva vem caindo em desuso devido a impeditivos trabalhistas, pois a exposição a este abrasivo pode vir a causar doenças aos trabalhadores que realizam esse processo. Devido a isto, o tratamento superficial com granalha deve ser preferencialmente escolhido para o atendimento dos requisitos de vida em fadiga de estruturas coladas com epoxi. Seu desempenho se deu bem próximo aos dos c.p.s tratados com areia, principalmente para patamares de carregamento intermediários.

Embora também sejam amplamente utilizados na indústria, em especial na Naval, a preparação de superfícies para colagem com escova rotativa MBX apresentaram resultados insatisfatórios, vindo os c.p.s a romperem com baixo número de ciclos, com desempenho notadamente inferior ao desempenho para tratamentos superficiais de areia e de granalha.

Além da análise de fadiga, a análise dos c.p.s fraturados revelou que, embora os c.p.s tratados com areia fossem os que apresentaram melhor desempenho em fadiga, a fratura obtida através da análise da superfície foi adesiva, enquanto os c.p.s tratados com granalha, que apresentaram desempenho intermediário em relação a desempenho em fadiga, apresentaram o tipo de fratura mais desejável numa junta colada, que é de fratura coesiva.

A saída de dados da máquina de ensaios mecânicos utilizada disponibilizou os gráficos carga versus deslocamento, o que viabilizou a ideia de estimar o comprimento da trinca, nas diversas fases do ensaio de fadiga via análise da diminuição da rigidez do c.p. à medida que a trinca crescia. Para tal, dois modelos analíticos foram propostos: o primeiro pelo método da linha elástica e o segundo pelo método da viga conjugada. Foi ainda utilizado um programa de E.F. como referência. Os modelos propostos tiveram um bom desempenho, principalmente para estimar o comprimento de trincas grandes a partir da variação de rigidez de c.p.s.

Um ganho adicional do desenvolvimento dos modelos analíticos de rigidez é sua adaptação imediata para seu uso para avaliação da variação da flexibilidade do c.p. em função da variação de comprimento de trinca durante o ensaio de fadiga. Este fato poderá ser utilizado para estimar experimentalmente a taxa de energia dissipada por unidade de área do c.p $\mathcal{G}$.

Sugestão para trabalhos futuros

O desempenho das juntas coladas em fadiga submetidas às variações de condições ambientais, como umidade relativa do ar, conforme estudado por ASP (1997) e KINLOCH (1996), e juntas submetidas a imersões em água, conforme proposto por CROCOMBE (2013) seriam um desenvolvimento natural deste trabalho.

Foi proposta no APÊNDICE E uma formulação para a taxa de energia dissipada por unidade de área $\mathcal{G}$ para o c.p. tipo ENF, que nesta dissertação não chegou a ser utilizada. Sugere-se a utilização do modelo analítico de variação de flexibilidade em função da variação do comprimento da trinca para acessar a taxa de energia dissipada por unidade de área $\mathcal{G}$ dos c.p.s.

Referências Bibliográficas

ADAMS, A.N.N. “The effects of surface pretreatment on the cyclic-fatigue characteristics of bonded aluminum-alloy joints. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, vol. 26, pp. 50-61, Dezembro, 2006.

AFENDI, Mohd. “Three-Point Fracture Test of Epoxy Adhesive-bonded Dissimilar Materials”. M.Sc. Thesis, University ofTsukuba, Tsukuba, Japão, 2008.

AGOSTINHO, Oswaldo Luís; RODRIGUES, Antônio Carlos dos Santos; LIRANI, João. “Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões”. São Paulo, Edgar Blücher, 1977.

ASP, L.E. “The effects of moisture and temperature on the interlaminar delamination toughness of a carbon/epoxy composite”. **Composites Science and Technology**. vol. 58, pp. 967-977, nov. 1997.

ASTM A370.Standard Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. [S.I]: ASTM, 1980.

BUDIZ, M.K., JUMEL, J., BEN SALEM, N. “Instrumented end notched flexure – crack propagation and process zone monitoring Part II: Data reduction and experimental”. **International Journal of Solids and Structures**, vol. 50, pp.310-319, sep, 2012.

CHAVES, Felipe José Palhares. “Fracture Mechanics Applied to the Design of Adhesively Bonded Joints”. Programa Doutoral em Engenharia Mecânica, Porto, Portugal. Abril, 2013.

Ciência Hoje. Mais segurança e leveza no ar. Disponível em: <http://cienciahoje.uol.com.br/noticias/2013/04/mais-seguranca-e-leveza-no-ar>. Acesso em 12, dezembro, 2014.

CROCOMBE, A.D. “The fatigue response of environmentally degraded adhesively bonded aluminum structures”. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, vol.41, pp. 80-91, Março, 2013.

DA SILVA, L.F.M.; MAGALHÃES, A. G.; MOURA, M. F. S. F. Juntas Adesivas Estruturais. [S.I.]: Publindústria, 2007.

DE BARROS, Sílvio. “Comportamento de placas coladas em ensaios mecânicos”, CONEM, Recife, 2006

DE BARROS, Sílvio. “Crack propagation curves on flexure adhesion tests”, **International Journal of Structural Integrity**, vol. 4, n. 3, pp 396-406, Agosto, 2011.

DE BARROS, Sílvio. Modèle d'interface pour la simulation du comportement des assemblages collés. Tese de Doutorado, Université de Versailles-Saint Quentin em Yvekines, França, 2005.

DE MOURA, M.F.S.F., CAMPILHO, R.D.S.G, GONÇALVES, J.P.M. "Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints" **International Journal of Solids and Structures**. Vol. 46, pp 1589-1595, dezembro, 2009.

DE OLIVEIRA, Fernando Augusto Lima. "Análise das Tensões Residuais Induzidas pelos Tratamentos Mecânicos Superficiais na Construção de Navios". Projeto Final, UFRJ, 2014.

EDNESAJJAD, S. Ahesives Technology Handbook. 2ª edição. Nova Iorque, William Andrew, 2008.

FERNANDO, M. "A fracture mechanics study of the influence of moisture on the fatigue behaviour of adhesively bonded aluminum-alloy joints. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, vol 16, n. 2, pp. 113-119, Janeiro, 1996.

FLOROS, I.S., TSERPES, K.I. and LÖBEL, T. "Mode I, Mode II and Mode I+II fracture behavior of composite bonded joints: Experimental characterization and numerical simulation". **Composites Part B**. Vol. 78, pp. 459-468, abril, 2015.

GENTIL, Vicenti. Corrosão. 5ª edição; Rio de Janeiro, LTC, 2007.

HIBBELER, R.C. Resistência dos Materiais. 5ª Edição. São Paulo, Pearson Prentice Hall, 2004.

INSTRON. Manual Instron 8801. Disponível em: <http://www.instron.com.br/wa/product/8801-Floor-Model-Fatigue-Systems.aspx>. Acesso em 20, maio, 2015.

IRWIN G.R. and KIES, J.A. "Critical energy release rate analysis of fracture strength", **Weld J. Res. Suppl**., Vol. 33, pp 193-198, 1954.

KINLOCH, A. J.; HARJOPRAYITNO, W.W.; FERNANDO, M. "A fracture mechanics study of the influence of moisture on the fatigue behavior of adhesively bonded aluminium-alloy joints". **International Journal of Adhesion and Adhesives**. Vol. 16, pp. 113-119, jan. 1996.

LADEVÉZE, O. Allix, P. "Damage analysis of interlaminar fracture specimens". **International Journal of Adhesion and Adhesives**, vol.31, pp. 61-74, França, 1995.

LEET, Kenneth M.; UANG, Chia Ming; GILBERT, Anne M. "Fundamentos da Análise Estrutural".3ª edição. Mc Graw Hill, São Paulo, 2010.

LEFFER, K., ALFREDSSON, K.S., STIGH, U. “Shear behavior od adhesive layers”. **International Journal of Solids and Structures**, vol. 44, pp. 530-545, Suécia, março, 2006.

MANUTENÇÃO E SUPRIMENTOS. Disponível em: <http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/conteudo/5597-compressores-de-jateamento-de-areia/> Acesso em 17, dezembro, 2015.

NETO, Carlos Manuel Prada Mata. Adesivos Estruturais em automóveis. Porto: FEUP, 2010. Disponível em: http://paginas.fe.up.pt/~projfeup/cd_2010_11/files/MMM510_relatorio.pdf>. Acesso em 29 maio 2015.

PROLONGO, S.G.; URENA, A. “Effect of surfasse pre-treatment on the adhesive strength of epoxy-aluminium joints”.**International Journal of Adhesion and Adhesives**. Vol. 29, pp. 23-31, jan. 2008.

ROSA, Edison. Análise de Resistência Mecânica (Mecânica da Fratura e Fadiga). Santa Catarina, UFSC, 2002.

RUSSELL, Alan J..”On the measurement of mode II interlaminar fracture energies”. Research and Development Branch, Canada, 1982.

SALEEMA, N. “A simple surface treatment and characterization of AA 6061 aluminum alloy surface for adhesive bonding applications”. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, vol. 261, pp. 742-748, Novembro, 2012.

SRAWLEY, John E.; JONES, Melvin H.; GROSS, Bernard.“Experimental determination of the dependence of crack extension force on crack length for a single-edge-notch tension specimen”. National Aeronautics and Space Administration, Washington D,C, Estados Unidos, 1964.

TUPY. Catálogo de Granalhas Tupy. Disponível em: <http://www.tupy.com.br/portugues/produtos/granalhas_jateamento.php> Acesso em 27, maio, 2015.

UNDERHILL, P.R. “The dependence of the fatigue life of adhesive joints on surface preparation”. **International Journal of Adhesion and Adhesives**. 2006.

VALVO, P.S., FISICARO, P., BENNATI, S. “Explicit espressions for the crack length correction parameters for the DCB, ENF, and MMB test on multidirectional laminates”. 6th **International Conference on Composites Testing and Model Identification**. University of Pisa, Italy, 2013.

APÊNDICE A – Modelo em elementos finitos

Uma modelagem de elementos finitos foi elaborada de forma a validar a formulação de tamanho de trinca desenvolvida utilizando-se os conceitos de linha elástica, baseado na Resistência dos Materiais. O modelo foi feito em Visual Basic, em um programa desenvolvido pelo Prof. Paulo Kenedi, chamado de 20L, como ilustra a Fig. A.1.

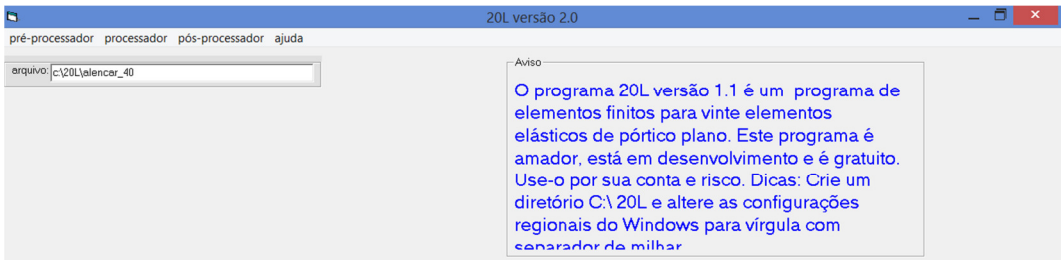


Figura A.1: Tela inicial do programa 20L.

Em seguida, deve ser informada a quantidade de materiais e suas características. A Fig. A.2 ilustra como é feita esta entrada.

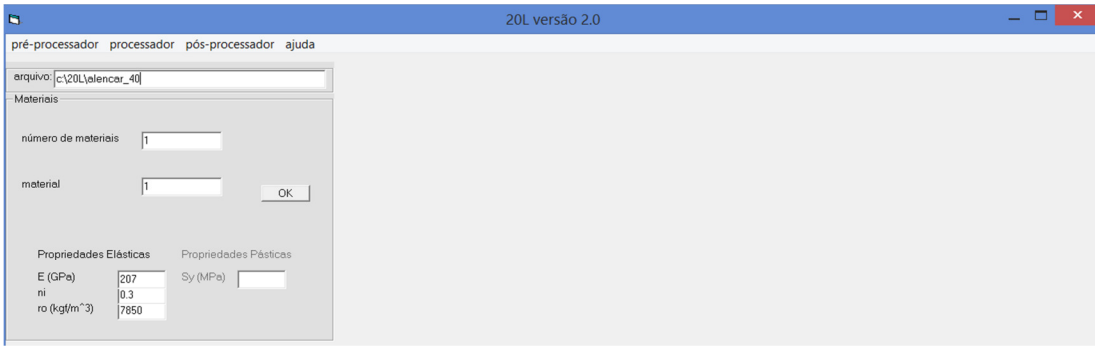


Figura A.2: Entrada de dados iniciais.

Posteriormente, é feita a entrada dos *keys points* do c.p., que são basicamente os pontos de vínculo do mesmo com os pontos de aplicação de carga e suportes, e as medidas do c.p., como ilustrado pela Fig. A.3.

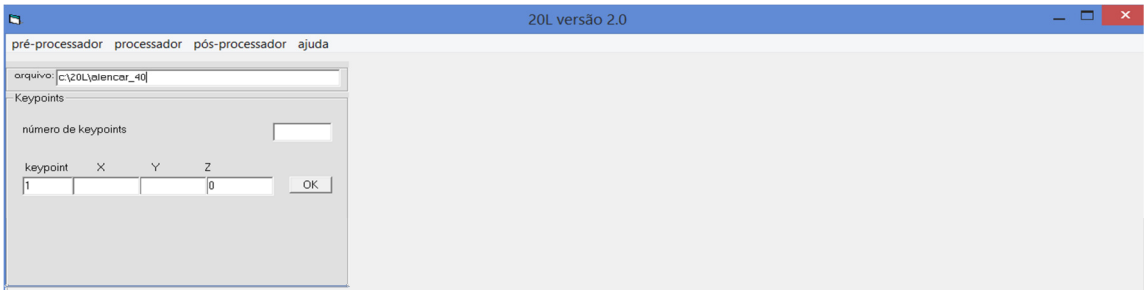


Figura A.3: Entrada dos *key points* e medidas do c.p.

Como ilustrado pela Fig. A.4, é informado o tipo de seção transversal da viga.

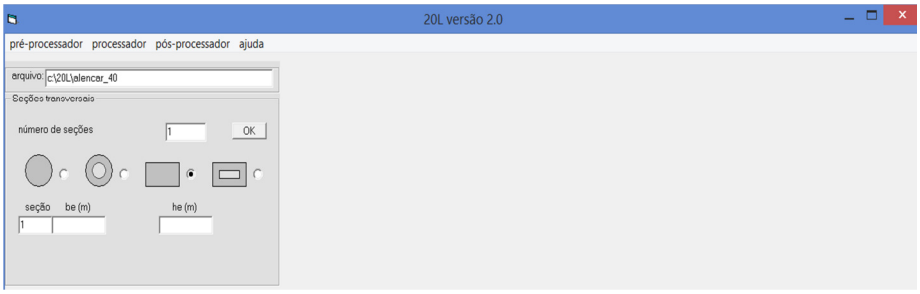


Figura A.4: Entrada do tipo de seção transversal.

Após ser informada a posição das cargas e os comprimentos de cada elemento e posição dos nós, que são as junções de um elemento a outro, o programa calcula os deslocamentos de cada *key point*. A Fig. A.5 mostra o c.p. discretizado, com os elementos, vínculos, força aplicada e suas reações.

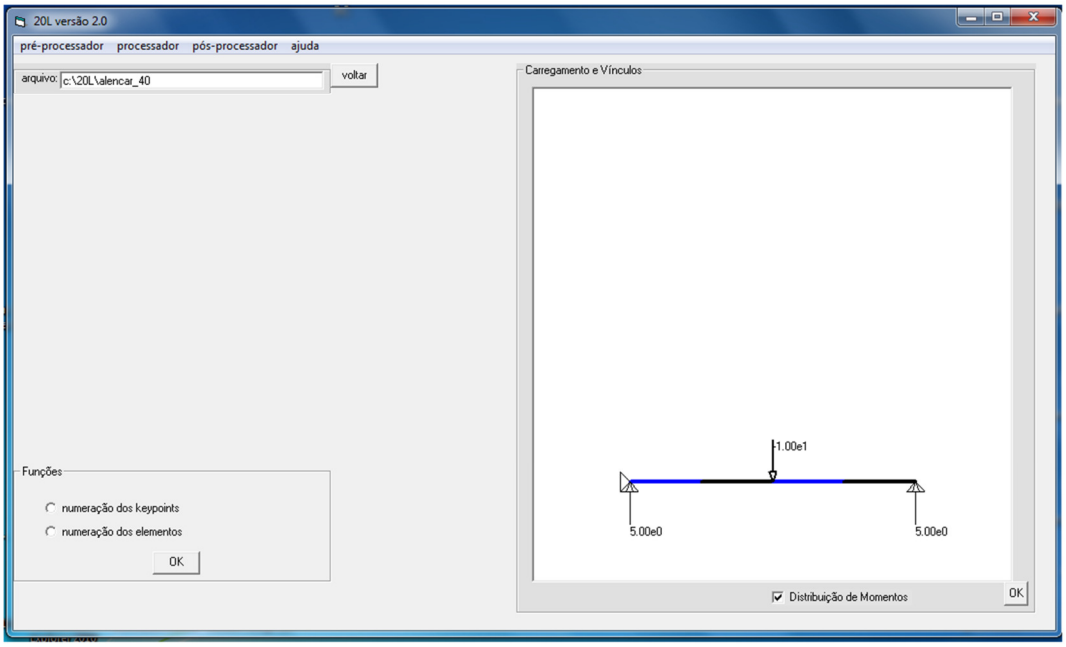


Figura A.5: Modelo pronto no programa 20L.

A Fig. A.6 mostra um dos resultados do programa, a distribuição de momentos, note que para tal cada elemento é subdividido em 20 partes (mesh).

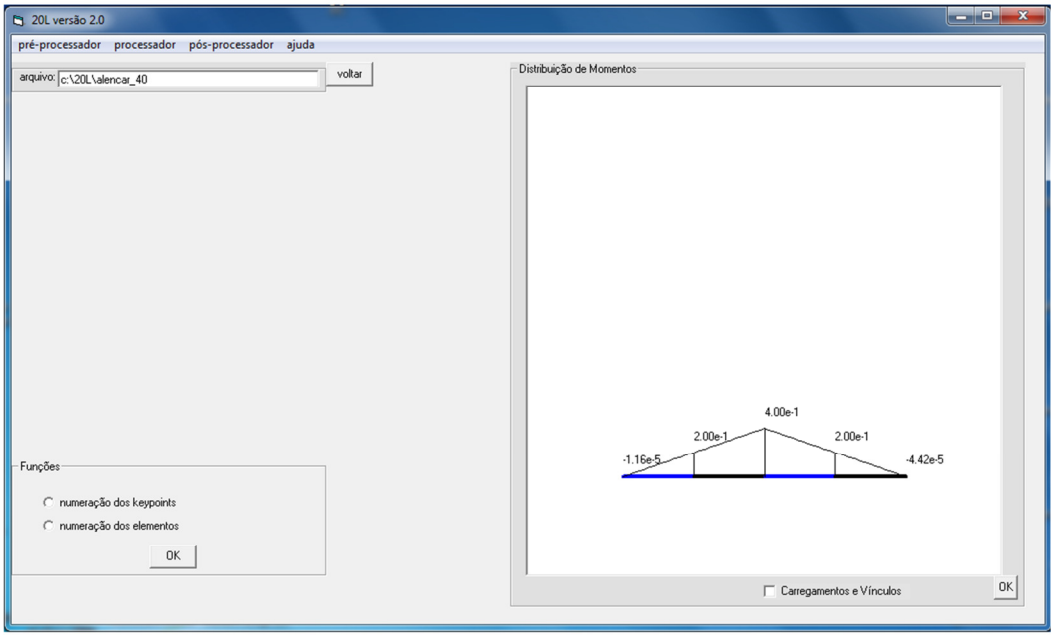


Figura A.6: Distribuição de momentos na viga.

O resultado do programa 20 L são os deslocamentos dos *key points*. Ao dividir a força aplicada pelo deslocamento vertical do *key point* central (onde a força está aplicada) obtem-se a rigidez correspondente.

APÊNDICE B – Método da linha elástica

Neste apêndice é mostrado, em detalhes, como foram obtidas as expressões dos deslocamentos transversais do modelo do c.p. tipo ENF pelo Método da Linha Elástica.

Método da Linha Elástica

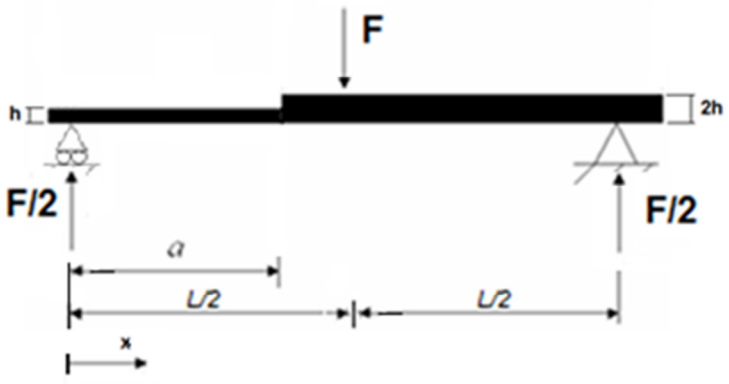


Figura V.4: Modelo de viga em modo ENF. (ADAPTADO DE: DE BARROS, 2005) (repetida)

A distribuição de momentos é apresentada à seguir:

$M = x\frac{F}{2}$ para $0 \leq x \leq a$ (B.1)

$M = x\frac{F}{2}$ para $a \leq x \leq {}^{L}/_{2}$ (B.2)

$M = (-x + L)\frac{F}{2}$ para ${}^{L}/_{2} \leq x \leq L$ (B.3)

Os momentos de inércia são:

$I_1 = \frac{bh^3}{12} = I$ (B.4)

$I_2 = \frac{b(2h)^3}{12} = 8\frac{bh^3}{12} = 8I$ (B.5)

As expressões das linhas elásticas para os trechos 1, 2 e 3 são:

$EI\frac{d^2y}{dx^2} = x\frac{F}{2}$ (B.6)

$8EI\frac{d^2y}{dx^2} = x\frac{F}{2}$ (B.7)

$8EI\frac{d^2y}{dx^2} = -x\frac{F}{2} + \frac{FL}{2}$ (B.8)

As expressões iniciais das inclinações para os trechos 1, 2 e 3 são:

$$EI\frac{dy}{dx} = x^2\frac{F}{4} + C_1 \quad \text{(B.9)}$$

$$8EI\frac{dy}{dx} = x^2\frac{F}{4} + C_2 \quad \text{(B.10)}$$

$$8EI\frac{dy}{dx} = -x^2\frac{F}{4} + F\frac{L}{2}x + C_3 \quad \text{(B.11)}$$

As expressões iniciais das flechas para os trechos 1, 2 e 3 são:

$$EIy = x^3\frac{F}{12} + C_1x + C_4 \quad \text{(B.12)}$$

$$8EIy = x^3\frac{F}{12} + C_2x + C_5 \quad \text{(B.13)}$$

$$8EIy = -x^3\frac{F}{12} + F\frac{L}{4}x^2 + C_3x + C_6 \quad \text{(B.14)}$$

Após os cálculos as constantes de C_1 a C_6 são determinadas:

$$C_1 = \frac{\left[56\left(a^3/_L\right) - 3L^2 - 84a^2\right]F}{384} \quad \text{(B.15)}$$

$$C_2 = \frac{\left[56\left(a^3/_L\right) - 3L^2\right]F}{48} \quad \text{(B.16)}$$

$$C_3 = \frac{\left[56\left(a^3/_L\right) - 9L^2\right]F}{48} \quad \text{(B.17)}$$

$$C_4 = 0 \quad \text{(B.18)}$$

$$C_5 = \frac{-7}{6}a^3F \quad \text{(B.19)}$$

$$C_6 = \frac{(-56a^3 + L^3)F}{48} \quad \text{(B.20)}$$

As expressões dos deslocamentos transversais (flechas) para os trechos 1, 2 e 3 são:

$$y_{1(x)} = \frac{F}{EI}\left[\frac{1}{12}x^3 + \frac{\left(56\left(a^3/L\right) - 3L^2 - 84a^2\right)}{384}x\right] \quad \text{para } 0 \le x \le a \quad \text{(repetida)} \quad \text{(V.11)}$$

$$y_{2(x)} = \frac{F}{8EI}\left[\frac{1}{12}x^3 + \frac{\left(56\left(a^3/L\right) - 3L^2\right)}{48}x - \frac{7}{6}a^3\right] \quad \text{para } a \le x \le L/2 \quad \text{(repetida)} \quad \text{(V.12)}$$

$$y_{3(x)} = \frac{F}{8EI}\left[-\frac{1}{12}x^3 + \frac{FL}{4}x^2 + \frac{\left(56\left(a^3/L\right) - 9L^2\right)}{48}x + \frac{\left(-56a^3 + L^3\right)}{48}\right] \quad \text{para } L/2 \le x \le L \quad \text{(repetida)} \quad \text{(V.13)}$$

Utilizando (V.12) e sabendo-se que K = F/y_2(x) pode-se fazer a estimativa do comprimento de trinca *a* em função da rigidez *K* para *x* = *L*/2:

$$a(K) = \sqrt[3]{\frac{\frac{96EI}{K} + \frac{L^3}{4}}{-7}} \quad \text{(repetida)} \quad \text{(V.15)}$$

Note que *K* entra como número negativo já que $y_2(x)$ é negativo.

OBSERVAÇÂO:

Comparando-se a foto, em vista lateral, do c.p. ENF (Fig. IV.3) e o desenho esquemático do modelo do c.p. tipo ENF mostrado na Fig. V.4 utilizado no método da linha elástica, verifica-se que estaria "faltando" uma parte da superior de c.p. na região da trinca *a*. Na Fig. B.1 mostra-se o modelo de c.p. tipo ENF considerando-se tanto a parte inferior quanto a parte superior do modelo na região da trinca *a*:

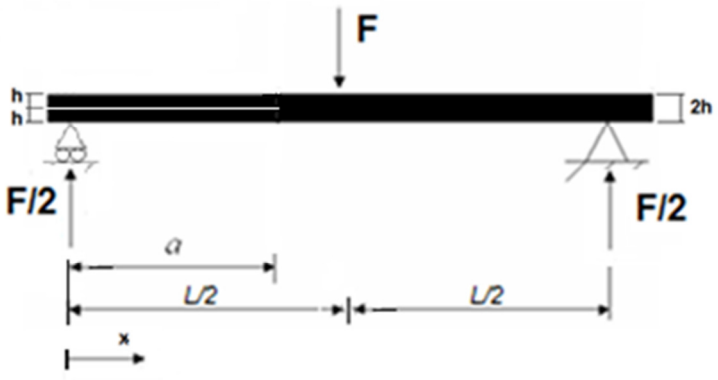


Figura B.1: Modelo de c.p. tipo ENF modificado.

Considera-se que neste caso a parte superior do modelo na região da trinca *a* estaria em paralelo com a parte inferior na mesma região. As expressões das linhas elásticas para os trechos 1, 2 e 3 são para este caso seriam:

$$\mathbf{2}EI\frac{d^2y}{dx^2} = x\frac{F}{2} \qquad \text{(B.21)}$$

$$8EI\frac{d^2y}{dx^2} = x\frac{F}{2} \qquad \text{(repetida)} \qquad \text{(B.7)}$$

$$8EI\frac{d^2y}{dx^2} = -x\frac{F}{2} + \frac{FL}{2} \qquad \text{(repetida)} \qquad \text{(B.8)}$$

Comparando-se as equações das linhas elásticas destes dois modelos, verifica-se que a única diferença estaria na constante 2, grifada em negrito na equação (B.21). Repetindo o desenvolvimento feito no modelo do c.p. tipo ENF original pelo método da linha elástica chega-se a seguinte estimativa da equação de *a* em função de *K* para *x* = *L*/2:

$$a(K) = \sqrt[3]{-\left(\frac{32EI}{K} + \frac{L^3}{12}\right)} \qquad \text{(B.22)}$$

Note que *K* entra como número negativo já que $y_2(x)$ é negativo. Verifica-se que utilizando esta nova estimativa de *a* (*K*) tem um desempenho inferior às estimativas feitas pela equação (V.15), estimando tamanhos de trincas com erros maiores que o modelo do c.p. tipo ENF original pelo método da linha elástica.

APÊNDICE C – Método da viga conjugada

Neste apêndice é mostrado, em detalhes, como foram obtidas as expressões do deslocamento transversal para x = L/2 do modelo do c.p. tipo ENF pelo Método da Viga Conjugada.

Método da Viga Conjugada (*Conjugated Beam Method*) para estimativa de "a"

O Método da Viga Conjugada constitui em uma outra abordagem, utilizado principalmente em Engenharia Civil, para o cálculo de deslocamentos transversais de vigas com seções transversais e materiais variáveis. Neste método o diagrama de momento fletor (D.M.) é dividido por E·I gerando um diagrama de carregamento conjugado (D.C.C.), além de alterar algumas condições de vínculo. Portanto, neste método o D.C.C. se transforma no novo carregamento da viga e, o que seria o momento fletor calculado em uma determinada seção da viga, transforma-se em deslocamento transversal desta seção (flexa).

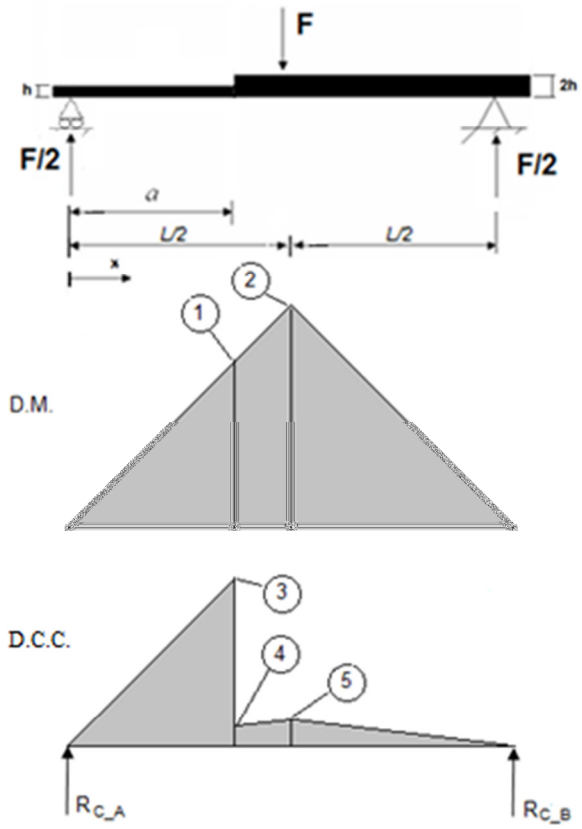


Figura V.6: Modelo de viga em modo ENF para o método da viga conjugada. (repetida)

Os pontos da Fig. V.6 são estimados como:

ponto 1: $M_1 = \frac{Fa}{2}$ (C.1)

ponto 2: $M_2 = \frac{FL}{4}$ (C.2)

ponto 3: $MC_3 = \frac{M_1}{EI}$ (C.3)

ponto 4: $MC_4 = \frac{M_1}{8EI}$ (C.4)

ponto 5: $MC_5 = \frac{M_2}{8EI}$ (C.5)

Aplicando as condições de equilíbrio no D.C.C. da Fig. V.6:

$$+\uparrow \sum F_{C_Y} = 0$$

$$R_{C_A} + R_{C_B} + \frac{a^2 F_c}{4EI} + \frac{a(L-2a)F_c}{32EI} + \frac{(L-2a)^2 F_c}{128EI} + \frac{L^2 F_c}{128EI} = 0 \quad \text{(C.6)}$$

$$+\uparrow \sum M_{C_A} = 0$$

$$LR_{C_B} + \left(\frac{L}{2} + \frac{L}{6}\right)\frac{L^2 F_c}{128EI} + \left(a + \frac{L-2a}{3}\right)\frac{(L-2a)^2 F_c}{128EI} + \left(a + \frac{L-2a}{4}\right)\frac{a(L-2a)F_c}{32EI} + \frac{a^3 F_c}{6EI} = 0 \quad \text{(C.7)}$$

Donde:

$$R_{C_B} = -\frac{F}{EI}\left(\frac{L^2}{128} + \frac{7}{48}\frac{a^3}{L}\right) \quad \text{(C.8)}$$

Para $x = {}^{L}/_{2}$

$$M_C(L/2) = \frac{F}{96EI}\left(\frac{-L^3}{4} - 7a^3\right) \quad \text{(C.9)}$$

Ou ainda que:

$$y_{(L/2)} = \frac{F}{96EI}\left[-\frac{L^3}{4} - 7a^3\right] \quad \text{para x = L/2} \quad \text{(repetida)} \quad \text{(V.16)}$$

Utilizando (V.16) e que *K = F/y(L/2)* pode-se fazer a estimativa do comprimento de trinca *a* em função da rigidez *K* para *x = L*/2:

$$a(K) = \sqrt[3]{\frac{\frac{96EI}{K} + \frac{L^3}{4}}{-7}} \quad \text{(repetida)} \quad \text{(V.17)}$$

Note que *K* entra como número negativo já que *y(L/2)* é negativo.

APÊNDICE D – Ensaio Estático

O c.p. foi posicionado com um vão de 160 mm entre os suportes da base e a carga aplicada no centro da peça, numa configuração de flexão de três pontos, como ilustram as figuras D.1 e D.2.

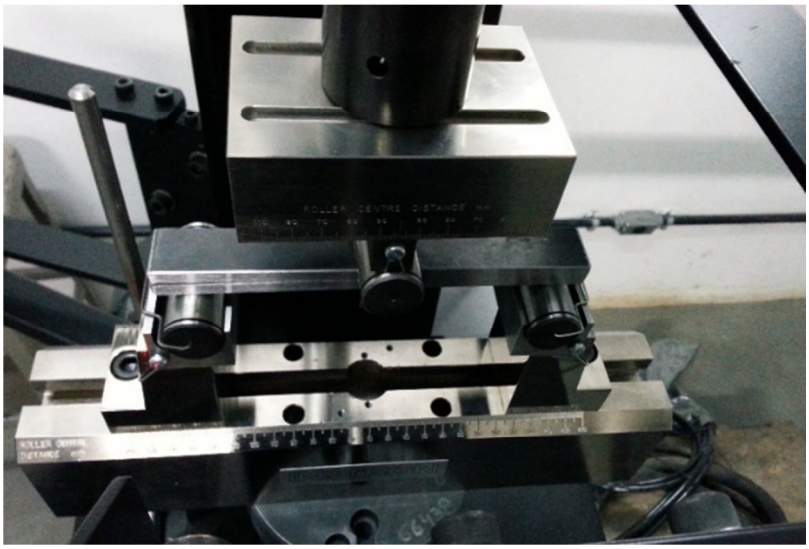


Figura D.1: Posicionamento do c.p.

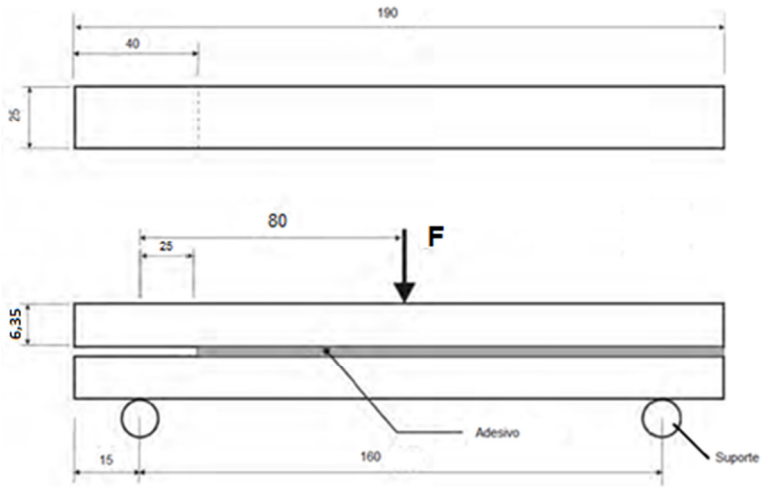


Figura D.2: Desenho esquemático do c.p.. (ADAPTADO DE: CHAVES, 2013)

O ensaio foi realizado com uma velocidade de deslocamento do pistão da máquina de ensaios mecânicos de 3 mm/min, seguindo a norma ASTM A370 (1980), a qual trata de ensaios mecânicos em c.p.s de aço. Foram testados 3 c.p.s. Todos foram ensaiados submetidos às mesmas condições ambientais: temperatura ambiente de 25ºC e umidade relativa do ar de 55%, monitoradas pelos equipamentos apropriados.

Ensaiou-se três c.p.s jateados com granalha G25, para que se fosse obtido o valor da carga de escoamento da junta na configuração estabelecida de modo II de solicitação para c.p. tipo ENF (*end notched flexure*). Esse valor de carga é utilizado como referência a ser utilizado, posteriormente, nos ensaios dinâmicos. As curvas carga versus deslocamento, pós-processadas através do software Origin 8.0, são exibidas na Figura D.3.

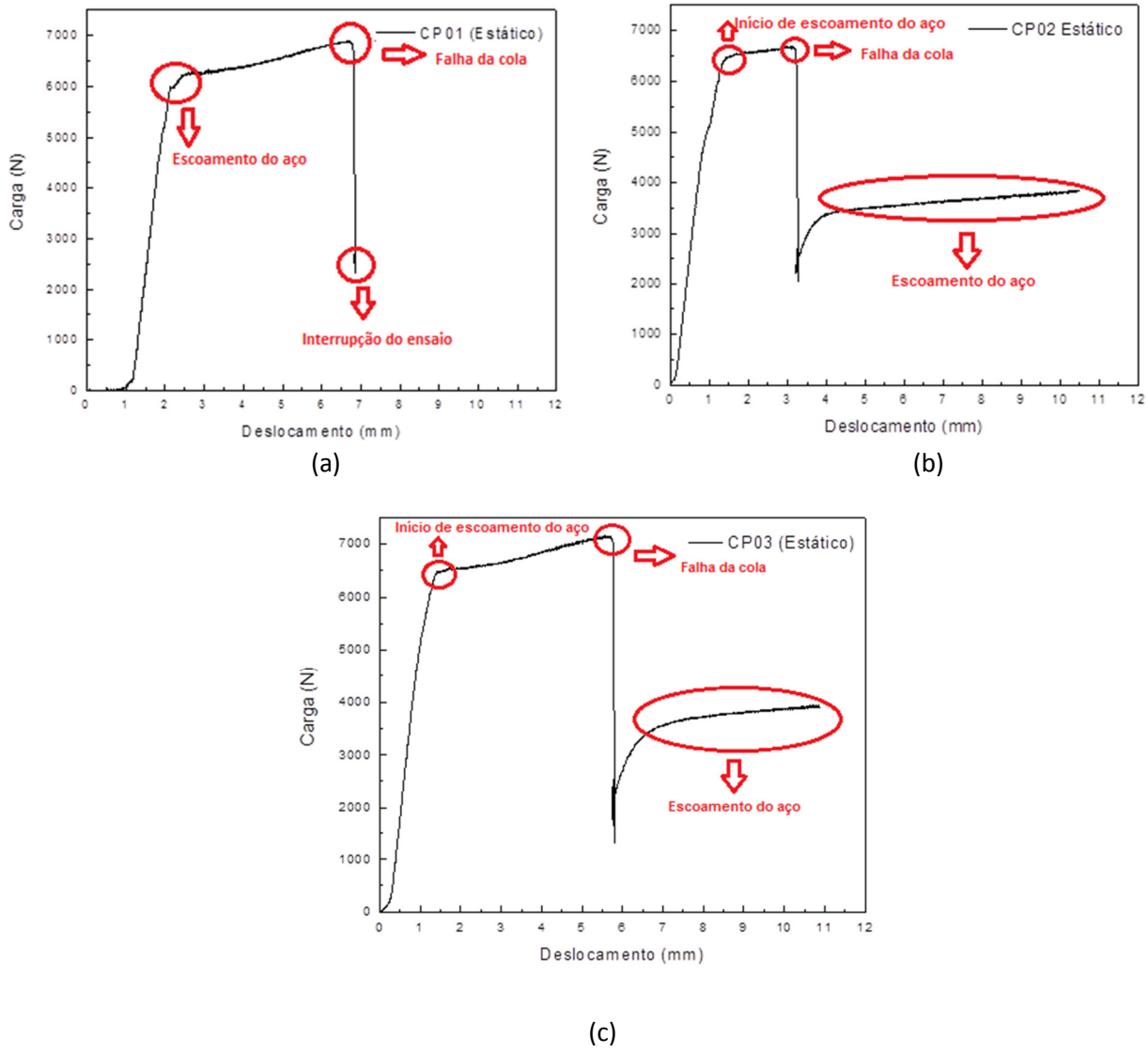


Fig. D.3: Curvas carga versus deslocamento do: (a) 1º c.p., (b) 2º c.p. e (c) 3º c.p. ensaiados.

Os ensaios realizados apresentaram resultados de carga de escoamento bem semelhantes entre si. O primeiro gráfico apresentou uma diferença em relação ao segundo e ao terceiro gráficos, visto que, na execução deste ensaio, a máquina de ensaios mecânicos não havia sido ainda programada para dar continuidade ao ensaio após o rompimento inicial da camada de cola.

A Instron 8801 estava programada para interromper o ensaio quando houvesse uma queda de 40% da carga aplicada, logo, quando houve o início da propagação da trinca e a consequente diminuição da resistência da junta colada, a máquina de ensaios mecânicos interrompeu imediatamente, por segurança, o avanço do pistão acionador.

A segunda e terceira curvas traduziram melhor o comportamento da junta colada sob carga. Até por volta de 1,5 mm de deslocamento do pistão da máquina de ensaios mecânicos, o c.p. apresenta um comportamento linear e elástico, quando se inicia o escoamento do aço, e, após isso, há um aumento do deslocamento sem um aumento significativo da carga. Em seguida, há uma queda abrupta da carga aplicada, devido ao rompimento do adesivo, seguida da continuação do escoamento do substrato de aço.

Os ensaios estáticos não caracterizaram eficazmente a junta colada, já que, como citado anteriormente, o material do substrato, aço, escoou antes da falha do adesivo, porém, como o objetivo era obter uma carga de referência para o ensaio de fadiga, foi utilizado este dado nos ensaios dinâmicos.

O resultado do teste estático nos três c.p.s apontou uma carga média de ruptura do adesivo de 6293 N. Posteriormente, este valor foi utilizado para calcular os parâmetros do teste de fadiga para cada um dos tipos de tratamento superficial.

A Fig. D.4 ilustra um dos três c.p.s utilizados no teste estático fraturado, onde é possível ver a extensão do comprimento da trinca final.

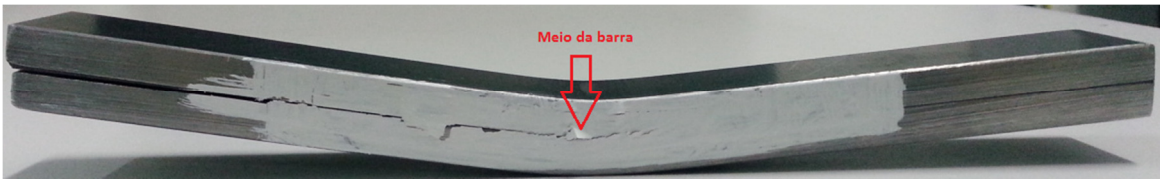


Figura D.4: Corpo de prova fraturado – Vista lateral.

APÊNDICE E – Modelo de $\mathcal{G}$

Neste apêndice utilizam-se os resultados obtidos pelo método da linha elástica (Apêndice B) para estimar a flexibilidade *C* do c.p. tipo ENF. Utilizando-se a expressão (V.15), pode-se estimar *C* do c.p. tipo ENF para *x* = L/2:

$$C(a) = \frac{7a^3 - (L^3/4)}{96EI} \qquad \text{(E.1)}$$

A taxa de energia dissipada por unidade de área pode ser definida em função da flexibilidade da estrutura *C*:

$$\mathcal{G} = -\frac{F^2}{2B}\frac{dC}{da} \qquad \text{(repetida)} \qquad \text{(III.7)}$$

Derivando-se a equação (E.1) em relação a *a*, tem-se:

$$\frac{dC}{da} = \frac{7}{32}\frac{a^2}{EI} \qquad \text{(E.2)}$$

Substituindo-se (E.2) em (III.7), tem-se:

$$\mathcal{G} = -\frac{7}{64}\frac{F^2a^2}{BEI} \qquad \text{(E.3)}$$

ANEXO A – Tabelas do software Wave Matrix

Exemplo de tabela Stop Trends

Total Cycles	Position Maximum (mm)	Position Minimum (mm)	LoadMaximum (KN)	LoadMinimum (KN)
1	-1.112110203	-1.676565103	-0.423121452	-4.411113262
2	-1.117528265	-1.681307249	-0.430846214	-4.429465532
3	-1.119829601	-1.685158901	-0.440347195	-4.432302713
4	-1.122543996	-1.68419867	-0.430822372	-4.44329977
5	-1.125210112	-1.690094166	-0.435811281	-4.427760839
6	-1.129464096	-1.681489639	-0.4375875	-4.431033134
7	-1.12859506	-1.690335565	-0.431573391	-4.433006048
8	-1.131068057	-1.688801341	-0.433528423	-4.433494806
9	-1.129485554	-1.694042378	-0.434464216	-4.429322481
10	-1.129866427	-1.693167978	-0.430983305	-4.426270723
20	-1.136255449	-1.699449711	-0.436538458	-4.431706667
30	-1.139517016	-1.699991518	-0.436574221	-4.433596134
40	-1.140337772	-1.701858335	-0.43117404	-4.430299997
50	-1.142086572	-1.707233482	-0.430548191	-4.433232546
60	-1.143057532	-1.704116755	-0.44183135	-4.429966211
70	-1.148448772	-1.703719788	-0.440067053	-4.434555769
80	-1.145551986	-1.70481413	-0.438183546	-4.429358244
90	-1.146801896	-1.706954533	-0.433784723	-4.434365034
100	-1.147252507	-1.708204442	-0.432372093	-4.435580969
200	-1.153528876	-1.708762342	-0.431656837	-4.431116581
300	-1.15529377	-1.718498761	-0.435811281	-4.428821802
400	-1.157182045	-1.714829499	-0.435966253	-4.431039095
500	-1.15829248	-1.718906456	-0.439745188	-4.434472322
600	-1.160786934	-1.71877771	-0.434499979	-4.43816781
700	-1.158630438	-1.718091065	-0.43836236	-4.436761141
800	-1.163715906	-1.720805461	-0.437736511	-4.42507863
900	-1.163694449	-1.723144347	-0.437903404	-4.436594248
1000	-1.161993928	-1.72164231	-0.436598063	-4.433608055
2000	-1.167186685	-1.732076103	-0.438386202	-4.428911209
3000	-1.17631156	-1.733830268	-0.438469648	-4.434520006
4000	-1.178789922	-1.740090544	-0.43245554	-4.432219267
5000	-1.181954928	-1.744006569	-0.437271595	-4.435819387
6000	-1.189035961	-1.748056705	-0.437653065	-4.434746504
7000	-1.191240736	-1.749725039	-0.434792042	-4.430389404
8000	-1.191782543	-1.753480132	-0.431746244	-4.422068596
9000	-1.195387432	-1.758522685	-0.436747074	-4.43315506
10000	-1.197007486	-1.759252246	-0.429332256	-4.430007935
20000	-1.239048432	-1.805112658	-0.453031063	-4.413664341

Exemplo de Tabela Test Stop

CycleElapsed Time (s)	Total Cycles	Position (mm)	Load (mm)
0.001	22959	-2.863034944	-3.319990635
0.002	22959	-2.820961812	-3.153812885
0.003	22959	-2.782600857	-2.972060442
0.004	22959	-2.741568422	-2.809453011
0.005	22959	-2.69059572	-2.628916502
0.006	22959	-2.643850179	-2.4546206
0.007	22959	-2.596825689	-2.268135548
0.008	22959	-2.551233498	-2.094167471
0.009	22959	-2.495856608	-1.934844255
0.01	22959	-2.449711883	-1.780933142
0.011	22959	-2.404151879	-1.630353928
0.012	22959	-2.352288683	-1.49075985
0.013	22959	-2.310988027	-1.359248161
0.014	22959	-2.275362925	-1.24464035
0.015	22959	-2.239517883	-1.147985458
0.016	22959	-2.220399096	-1.060467958
0.017	22959	-2.193335606	-0.992339849
0.018	22959	-2.17730136	-0.946509838
0.019	22959	-2.167961908	-0.918674469
0.02	22959	-2.163219762	-0.90931654
0.021	22959	-2.162946177	-0.930035114
0.022	22959	-2.170467091	-0.971287489
0.023	22959	-2.190819694	-1.048070192
0.024	22959	-2.214192464	-1.130735874
0.025	22959	-2.241400793	-1.244294643
0.026	22959	-2.271870689	-1.376378536
0.027	22959	-2.31400283	-1.51309371
0.028	22959	-2.356617768	-1.669800282
0.029	22959	-2.404082141	-1.85148716
0.03	22959	-2.456825101	-2.035868168
0.031	22959	-2.515039768	-2.236902714
0.032	22959	-2.567632525	-2.442729473
0.033	22959	-2.623594136	-2.65622139
0.034	22959	-2.677206132	-2.866339684
0.035	22959	-2.730925416	-3.064143658
0.036	22959	-2.78132949	-3.265404701
0.037	22959	-2.832146624	-3.439736366
0.038	22959	-2.869456153	-3.609591722
0.039	22959	-2.906272155	-3.751730919
0.04	22959	-2.941135509	-3.878593445
0.041	22959	-2.963590964	-3.956526518
0.042	22959	-2.983020887	-4.018187523
0.043	22959	-2.994280801	-4.049354792
0.044	22959	-2.997236595	-4.053735733
0.045	22959	-2.996689425	-4.030251503
0.046	22959	-2.994967446	-3.98709178
0.047	22959	-2.980344042	-3.891009092
0.048	22959	-2.963666066	-3.786486387
0.049	22959	-2.934982522	-3.639519215
0.05	22959	-2.90903483	-3.495138884