

8. Referências Bibliográficas

[1]ASTM E399-08, “Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{IC} of Metallic Materials”, American Society for Testing and Materials, 2008.

[2]ASTM E1290-02, “Standard Test Method for Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement”, American Society for Testing and Materials, 2002.

[3]ASTM E1820-01, “Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness”, American Society for Testing and Materials, 2001.

[4]BS 7448: Part 1: 1991, “Fracture Mechanics Toughness Tests, Part 1, Method for Determination of K_{IC} , critical CTOD and Critical J Values of Metallic Materials,” 1991.

[5]GKSS 2002/24, “The GKSS test procedure for determining the fracture behavior of materials: EFAM GTP 02”, GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH, 1994.

[6]R6, “Assesment of the Integrity od Structures containing Defects” rev. 3, CEGN, 1988.

[7]API 579-1/ASME FFS-1, “Fitness for Service, Recommended Practice” segunda edição, American Petroleum Institute Publishing Services, Junho 2007.

[8]SAQ, “A combined deterministic and probabilistic procedure for safety assessment of components with cracks”Swedish Radiation Safety Authority, 2008:01.

[9]SINTAP “Estructural Integrity Assessment Procedures for European Industry- Task 5, subtask 5.1”, University of Cantabria, Junho,1997.

[10]BS 7910:2005, “Guide of Methods for Assessing Acceptability of Flaws in Metallic Structures,” British Standards Institution, Julho 2005.

[11]Tagawa T. et al., “Inconsistency in ASTM E1290-CTOD and BS7448-CTOD”, Japan Welding Engineering Society, 2008.

[12]Martins I.P., “Curvas J_R e $CTOD_R$ de aços estruturais segundo normas ASTM e BSI”, Projeto de Graduação – Departamento de Engenharia Metalúrgica, Escola Politécnica Universidade Federal do Rio de Janeiro, Setembro 2012.

[13]De Souza Francisco J.C., “Avaliação da tenacidade à fratura de aço API 51X70 utilizado na fabricação de dutos transportadores de gás e petróleo”, Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Abril 2009.

[14]Haag J. et al, “Influência do nível de constricção geométrica na tenacidade à fratura de arames de alta resistência mecânica”, 12º Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos Coteq2013-136, 2013.

[15]Cravero S., “Desenvolvimento de Procedimentos para Avaliação de curvas JR em espécimes à fratura SE(T) utilizando o método de Flexibilidade”, Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Dezembro 2007.

[16]Flores W.D.; Godefroid L.B., Donato G.H.B., “Avaliação da geometria do corpo de prova na tenacidade à fratura de aço API 5LX70”, 67º Congresso Anual da ABM, 2012.

[17]Piovatto R.R., “Desenvolvimento de metodologia experimental para aplicação de espécimes SE(T) para avaliação de integridade estrutural em dutos”, Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2007.

[18]Moreira F.C.; Donato G.B.; Magnabosco R., “Avaliação numérico-experimental de curvas de crescimento de trinca (curvas R) em aço AISI 1020 utilizando espécimes SE(T) solicitados por pinos e garras”, 65º Congresso Anual da ABM, 2010.

[19]Joyce J.A.; Hackett E.M.; Roe C., “Effects of cracks depth and mode of loading on the J_R curve behavior of a high-strength steel”, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1993.

[20]Ramos K.A.M., “Estudo comparativo entre os resultados obtidos pelos documentos API 579 e BS 7910 na avaliação de trincas em vasos de pressão”, Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

[21]González S.C., “Evaluación de la Integridad Estructural de componentes sometidos a condiciones e bajo confinamiento”, Tese de Doutorado – Universidad de Cantabria, Santander, Espanha, Março 2007.

[22]Castro, J.T.P.; Meggiolaro M.A.“Técnicas e Práticas de Dimensionamento Estrutural sob Cargas Reais de Serviço: Volume II- Propagação de Trincas, Efeitos Térmicos e Estocásticos”, ISBN 1449514707, CreateSpace2009.

[23]Castro, J.T.P.; Meggiolaro M.A.“Técnicas e Práticas de Dimensionamento Estrutural sob Cargas Reais de Serviço: Volume I- Iniciação de Trincas”, ISBN 1449514707, CreateSpace2009.

[24]Martins G. P., “Determinação dos parâmetros de iniciação J_i e δ_i em junta de aço ASTM A516 grau 65-N soldada por arco submerso”, Dissertação de Mestrado – Departamento de engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Minas Gerais, Setembro 1985.

[25]Griffith A.A.,”The phenomenon of rupture and flow in solids”, Philosophical Transactions series A, v.221, p.163-198, 1920.

[26]Willians M.L.,”On the stress distribution at the base of a stationary crack”, Journal of Applied Mechanics v.24, p.109-114, 1957.

[27]Irwin G.R.,”Analysis of stresses and strains near the end of a crack transversing a plate”, Journal of Applied Mechanics v.24, p.361-370, 1957.

[28]Anderson,T.L., “Fracture Mechanics : Fundamentals and Applications” 2a ed, CRC : New York, 1995.

[29]Rossi J.L.M. “Contribuição aos Estudos da Validação da Curva Mestra utilizando os Dados do Euro-Teste”, Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009.

[30]Fortes C., “Mecânica da Fratura” , ESAB BR , Assistência Técnica Consumíveis, 2003.

[31]Barsom J.M., Rolfe S.T.,”Fracture and Fatigue Control in Structures”, 2nd ed., Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1987.

[32]Weels A.A.,” Unstable Crack Propagation in Metals: Cleavage and fast fracture” Proceedings of the crack propagation Symposium, v.1, paper 84,Cranfield, UK,1961.

[33]Burdekin F.M., Stone D.E.W,”The crack opening displacement approach to fracture mechanics in yielding materials”, Journal of strain analysis, v.1, p.145-153,1966.

[34]Junior E.H., “Investigação experimental do comportamento dúctil de aços API-X70 e aplicação de curvas de resistência J para previsão de colapso em dutos”, Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.

[35]Franceschini A.S. “Avaliação do fenômeno de união de trincas induzidas pelo hidrogênio e sua influência na integridade estrutural de um vaso de pressão”, Dissertação de Mestrado – Departamento de engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Janeiro 2011.

[36]Chiessa M.et al.,” Efficient fracture assessment of pipelines. A constraint-corrected SENT specimen approach”, Engineering Fracture Mechanics v.68, p.527-547, 2001.

[37]Da Cunda L.B., “O modelo de Gurson para dano dúctil: Estratégia computacional e aplicações”, Tese de Doutorado – Departamento de engenharia Civil da Universidade de Rio Grande do Sul, Março 2006.

[38]Ruggieri C. et al., "Numerical modeling of ductile crack growth in 3-D using computational cells", *International Journal of Fracture*, v.82, p.67-95,1996.

[39]Gurson A.L., "Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: part I –yield criteria and flow rules for porous ductile media", *ASME Journal of Engineering Materials and Technology*, v.99, p. 2-15,1977.

[40]Tvergaard V., "On Localization in Ductile Materials Containing Spherical Voids." *International Journal of Fracture*, Vol. 18, pp. 237–252, 1982.

[41]Tvegaard V., "Material Failure by Void Growth to Coalescence." *Advances in Applied Mechanics*, Vol. 27, p. 83–151, 1990.

[42]Falesk J. et al., "Cell model for nonlinear fracture analysis – Micromechanics calibration", *International Journal of Fracture*, v.89, p. 355-373,1998.

[43]Tvergaard V., Needleman A., "Analysis of the Cup-Cone Fracture in a Round Tensile Bar." *Acta Metallurgica*, Vol. 32, p. 157–169, 1984.

[44]Imai Y.; Mataka T., "Effect of side groove for three-point bending fracture toughness specimens", *JSME* vol. 27, Maio 1984.

[45]Lucon E.; Scibetta M., "Influence of side groove root radius on the ductile fracture toughness of miniature C(T) specimens", *General Framework Agreement SUEZ-SCK-CEN*, 2009.

[46]ASTM E1820-08a, "Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness", *American Society for Testing and Materials*, 2008.

[47]ASTM E1820-11, "Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness", *American Society for Testing and Materials*, 2011.

[48]Joyce J.A.; Link R.E., "Effects of constraint on upper shelf fracture toughness", *American Society for Testing and Materials*, Philadelphia, 1995.

[49]Freire, J.L.F., "Notas de aula do curso de Integridade Estrutural de dutos", dado no programa do curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

[50]Medina J.A.H., “Procedimento para avaliação da Integridade Estrutural em máquinas de Levantamento e Movimentação de materiais”, Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio, Setembro 2009.

[51]Cruz J.R.B., “Procedimento analítico para previsão do comportamento estrutural de componentes trincados”, Tese de Doutorado – IPEN, 1998.

[52]Cruz J.R.B.; De Andrade A.H.P., “Uma visão geral das principais metodologias para Avaliação da Integridade de estruturas trincadas”, Nota da coleção PTC, IPEN,1995.

[53]Webster S.; Bannister A., “Structural Integrity assessment procedure for Europe- of the SINTAP programme overview”, Engineering Fracture Mechanics 67, Junho 2000.

[54]Cicero S; Alvarez J.A., “Una experiencia educativa del V programa marco : El work package 6 del proyecto FITNET”, Anales de la Mecánica de Fractura, vol. 2, 2007.

[55]Cicero S; Alvarez J.A., “Proyecto FITNET : Hacia una norma europea de Integridad Estructural”, Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de Materiales de Ingenieros de Caminos, canales y puertos, Universidad de Cantabria, Santander, 2007.

[56]ASTM E 8M-04, “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials(Metric)”, American Society for Testing and Materials, 2004.

[57]RAGAB, A.R., “A model for ductile fracture based on internal necking of spheroidal voids”,Acta Materialia, v.52, p.3997-4009, 2004.

[58] www.matweb.com , Material property data, 1996-2015.

[59]Rodrigues,L.D.; Freire, J.L.F.; Vieira, R.D.; Castro,J.T.P., “Stain Analysis of a Pressure Vessel Teste Specimen containing Metal Loss Defects”, 21° Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, COBEM,2011.

[60]Gallo C.; Alvarez J.A.;Solana F.G.; “Evaluación de la Integridad de componentes fisurados basada en la parada de fisura”, Departamento de Ciencia e

Ingeniería del Terreno y de Materiales de Ingenieros de Caminos, canales y puertos, Universidad de Cantabria, Santander, 2007.

[61]Wiesner C.S.; Maddox S.J.;Xu W.; Burdekin F.M.; Andrews R.M.;Harrison J.D., “Engineering critical analyses to BS 7910-the UK guide on methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures”, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2000.

[62]Gutierrez, F.;Cicero S., “FITNET FFS Procedure,” Un procedimiento europeo unificado de evaluación de la Integridad Estructural”, Anales de la Mecánica de Fractura, vol. 1, 2007.

[63]De Jong R.P., “Avaliação de tubulações trincadas em sistemas primários de reatores nucleares”, Dissertação de Mestrado – IPEN, 2004.

[64]Neto M.M.; Cruz J.R.B.; De Jong R.P., “On the structural integrity assessment of cracked piping of PWR nuclear reactors primary systems”, Progress in Nuclear Energy 50, 2008.

[65]Alegre J.M.; Bravo P.M.;Cuesta I.I., “Aplicación del procedimiento ASME-API 579 para el diseno en fatiga de vasijas de alta presión bobinadas”, Anales de la Mecánica de Fractura 26, vol. 2, 2009.

[66]Lee J.S.; Ju J.B.; Jang J.I., Kim W.S.; Kwon D., “Weld crack assessment in APIX65 pipeline: failure assessment diagrams with variations in representative mechanical properties”, Materials Science and Engineering, 2004.

[67]Lie S.T.; Yang Z.M., “Fracture assessment of damaged square hollow section (SHS) K-joint using BS 7910:2005”, Engineering Fracture Mechanics 76, 2009.

[68]Lie S.T.; Yang Z.M.; Gho W.M., “Validation of BS7910:2005 failure assessment diagrams for cracked square hollow section T-, Y- and K-joints”, International Journal of Pressure Vessels and Piping 86, 2009.

[69]Sant’Anna H.M.; Leal M.F., “A practical procedure to assess critical defects in pressure vessels subjected to fatigue loads”, Engineering Fracture Mechanics 78, 2011.

[70]Muhammed A., “Background to the derivation of partial safety factors for BS 7910 and API 579”, *Engineerin Failure Analisis* 14, 2007.

[71]Donato G.H.B.; Ruggieri C., “Avaliação de defeitos em estruturas soldadas incluindo efeitos de dissimilaridades mecânicas utilizando a metodologia FAD”, *Conferência de Tecnologia de Soldagem e Inspeção, EXPOSOL*, 2008.

[72]O’Dowd N., “Advanced Fracture Mechanics”, *Lectures on Fundamentals of Elastic, Elastic-Plastic and Creep Fracture*, Imperial College London Department of Mechanical Engineering, 2002-2003.

[73]Anderson T.L.; Osage D.A., “API 579: a comprehensive fitness-for-service guide”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 77, 2000.

[74]Cicero S.; Madrazo V.; Carrascal I.A., “Assessment of notched structural components using Failure Assessment Diagrams and the Theory of Critical Distances”, *Engineering Fracture Mechanics* 78, 2011.

[75]Kotousov A.; Price J.W.H., “Elastic analysis of semi-elliptical axial cracks in cylinders under thermal shock using the BS 7910 framework”, *International Journal of Pressure Vessel and Piping* 76, 1999.

[76]Budden P.J.; Sharples J.K.; Dowling A.R., “The R6 procedure: recent developments and comparison with alternative approaches”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 77, 2000.

[77]Rocha R.S., “Avaliação do alívio mecânico de tensões residuais devido a sobrecarga provocada por teste hidrostático”, *Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul*, Julho, 2009.

[78]Soares S.D., “Correlações entre emissão acústica de defeitos e parâmetros de Mecânica da Fratura na Avaliação da Integridade de equipamentos pressurizados”, *Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio de Janeiro*, Março, 2008.

[79]Li P.N.; Lei Y.; Zhong Q.P.; Li X.R., “A Chinese structural integrity procedure for pressure vessels containing defects”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 77, 2000.

[80]Wu H.S.; Zhong Q.P., “Assessment of integrity of structures containing defects”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 75, 1998.

[81]Lin Y.C.; Xie Y.J., “Expert system for integrity assessment of piping containing defects”, *Expert System with Applications* 30, 2006.

[82]Salcedo F.G., “Los procedimientos de evaluación de integridad estructural de componentes fisurados: descripción y aplicaciones”, *Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales, Universidad de Cantabria*, 1999.

[83]Cravero S.; Ruggieri C., “Estimation procedure of J-resistance curves for SE(T) fracture specimens using unloading compliance”, *Engineering Fracture Mechanics* 74, 2000.

[84]Frainer V.J., “Avaliação do comportamento em fratura de risers rígidos”, *Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Metalúrgica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre*, 2007.

[85]Paredes M.; Ruggieri C., “Further results in J and CTOD estimation procedures for SE(T) fracture specimens- Part II : Weld centerline cracks”, *Engineering Fracture Mechanics* 89,2012.

Apêndice A

A.1. Superfícies de fratura dos CPs testados



Figura A.1 – Superfície de fratura CP SEB-03-01.



Figura A.2 – Superfície de fratura CP SEB-03-02.



Figura A.3 – Superfície de fratura CP SEB-03-03.



Figura A.4 – Superfície de fratura CP SEB-04-01.



Figura A.5 – Superfície de fratura CP SEB-04-02.



Figura A.6 – Superfície de fratura CP SEB-04-03.

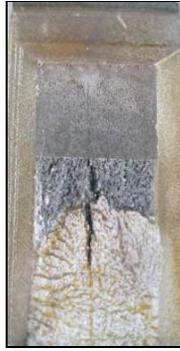


Figura A.7 – Superfície de fratura CP SEB-05-01.



Figura A.8 – Superfície de fratura CP SEB-05-02.



Figura A.9 – Superfície de fratura CP SEB-05-03.



Figura A.10 – Superfície de fratura CP SET-04-01.



Figura A.11 – Superfície de fratura CP SET-04-02.



Figura A.12 – Superfície de fratura CP SET-04-03.



Figura A.13 – Superfície de fratura CP SET-05-01.

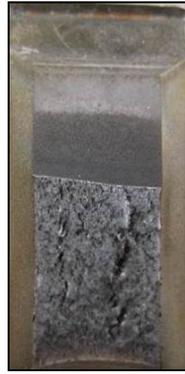


Figura A.14 – Superfície de fratura CP SET-05-02.



Figura A.15 – Superfície de fratura CP SET-05-03.

A.2. Fratografias dos CPs testados

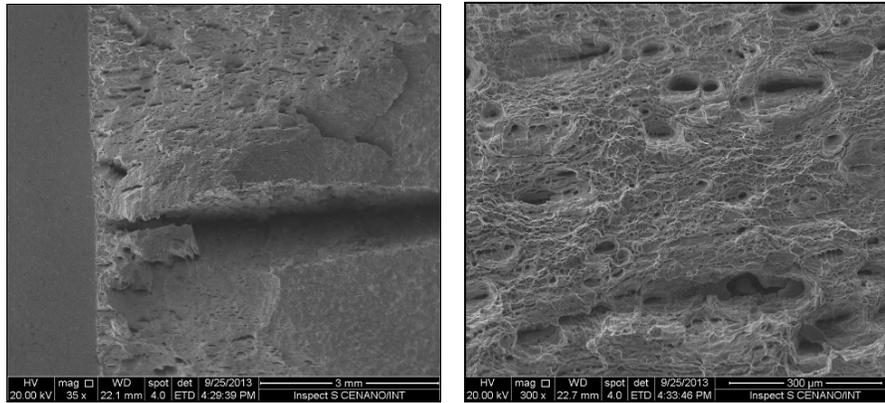


Figura A.16 – Fratografias # 1 e # 2 da superfície CP SEB 03-01.

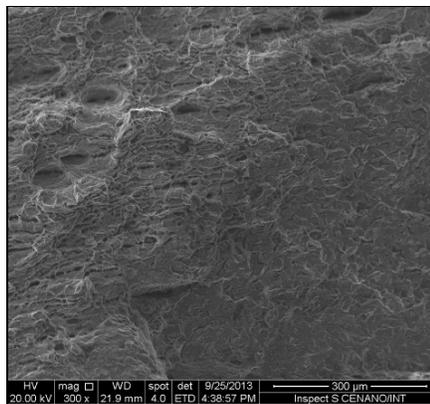


Figura A.17 – Fratografia # 3 da superfície CP SEB 03-01.

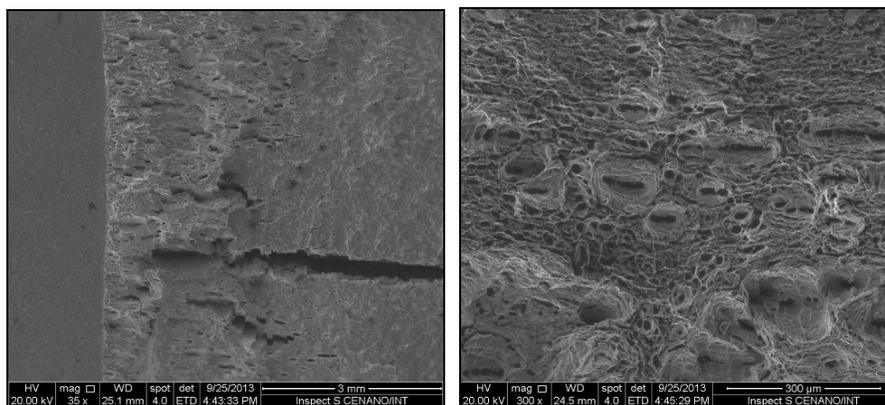


Figura A.18 – Fratografias # 1 e # 2 da superfície CP SEB 03-02.

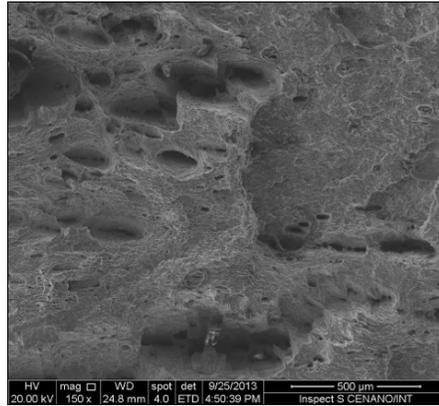


Figura A.19 – Fratografia # 3 da superfície CP SEB 03-02.

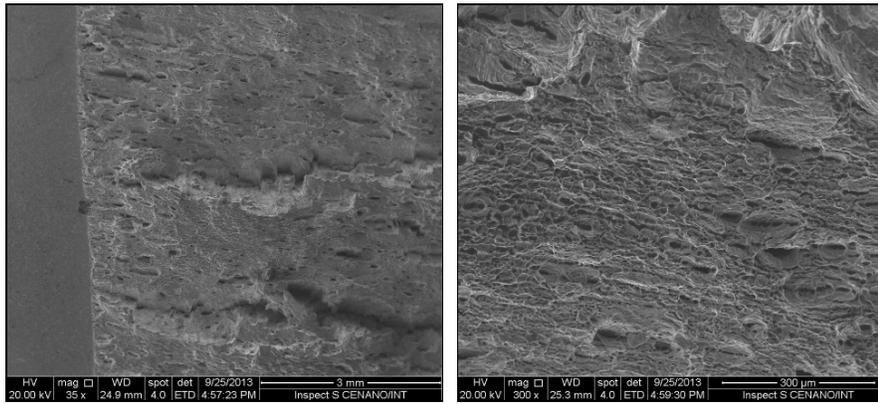


Figura A.20 – Fratografias # 1 e # 2 da superfície CP SEB 03-03.

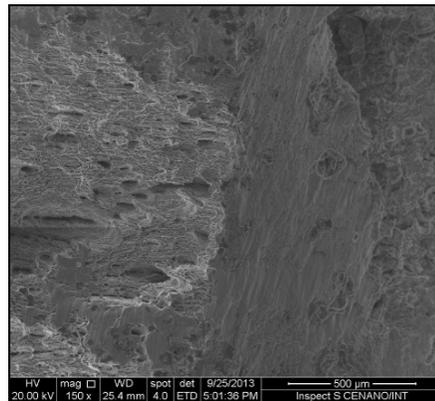


Figura A.21 – Fratografia # 3 da superfície CP SEB 03-03.

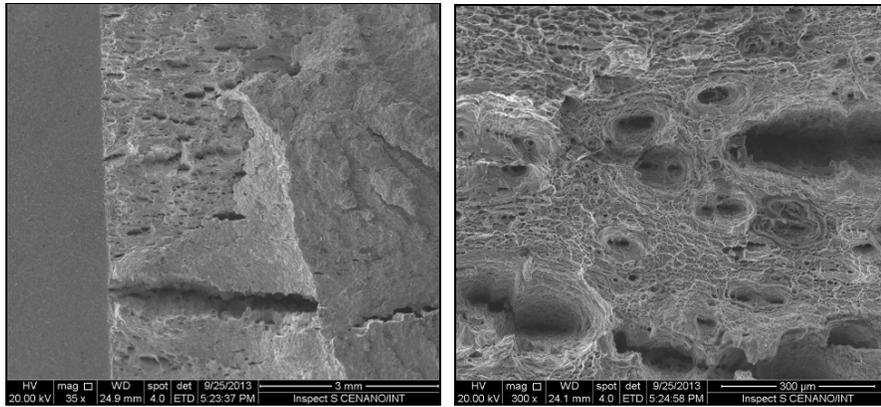


Figura A.22 – Fratografias # 1 e # 2 da superfície CP SEB 04-01.

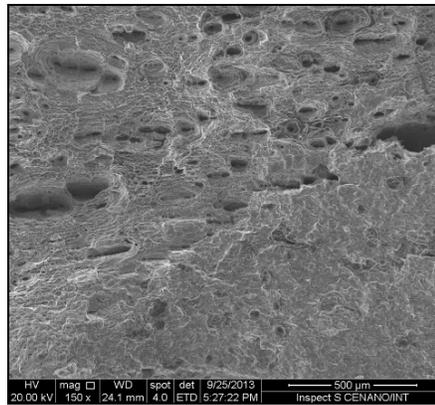


Figura A.23 – Fratografia # 3 da superfície CP SEB 04-01.

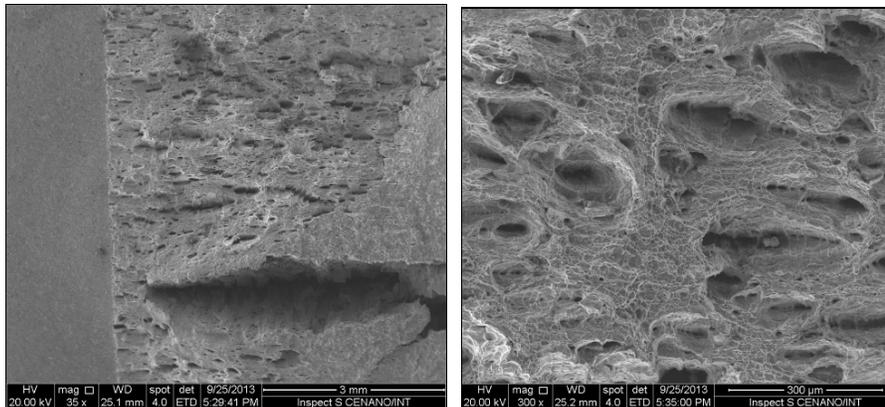


Figura A.24 – Fratografias # 1 e # 2 da superfície CP SEB 04-02.

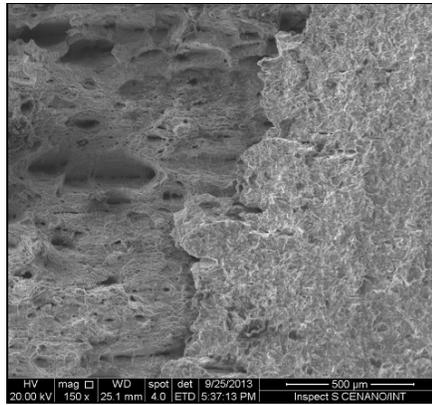


Figura A.25 – Fratografia # 3 da superfície CP SEB 04-02.

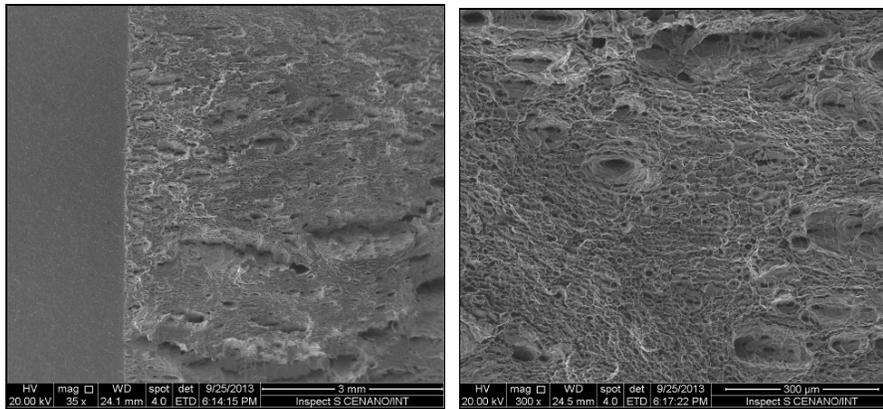


Figura A.26 – Fratografias # 1 e # 2 da superfície CP SEB 04-03.

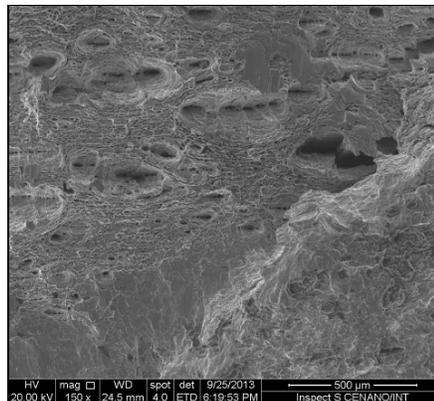


Figura A.27 – Fratografia # 3 da superfície CP SEB 04-03.

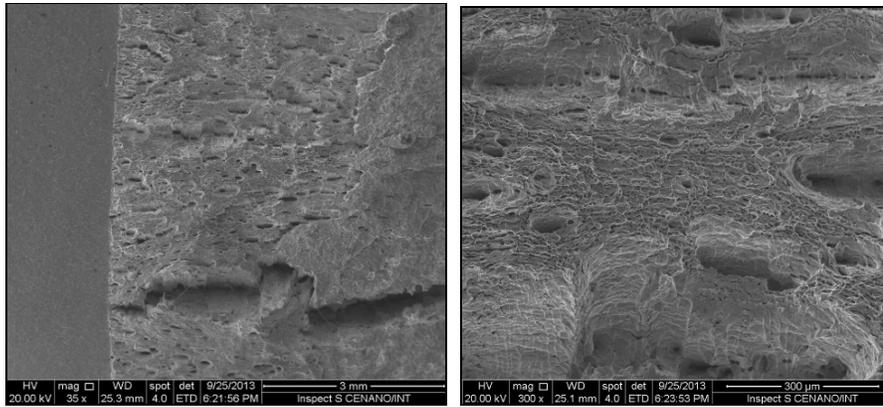


Figura A.28 – Fratografias # 1 e # 2 da superfície CP SEB 05-01.

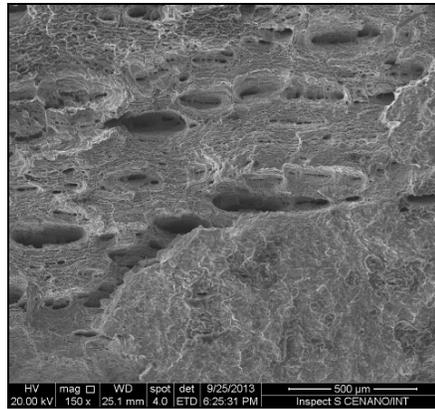


Figura A.29 – Fratografia # 3 da superfície CP SEB 05-01.

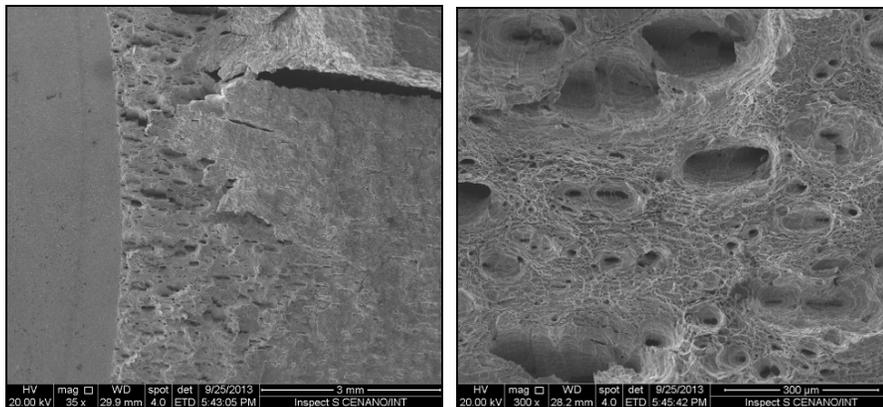


Figura A.30 – Fratografias # 1 e # 2 da superfície CP SEB 05-03.

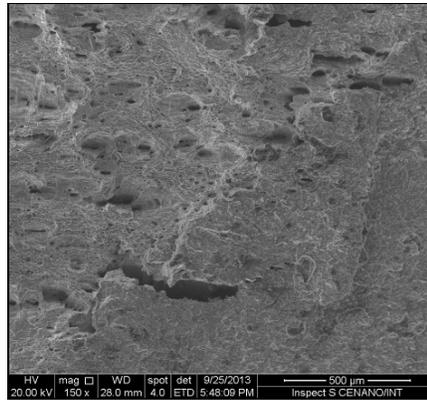


Figura A.31 – Fratografia # 3 da superfície CP SEB 05-03.

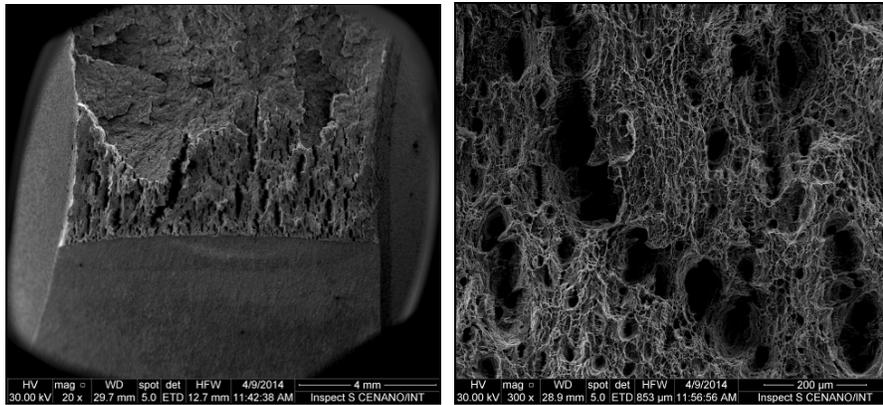


Figura A.32 – Fratografias # 1 e # 2 da superfície CP SET 04-01.

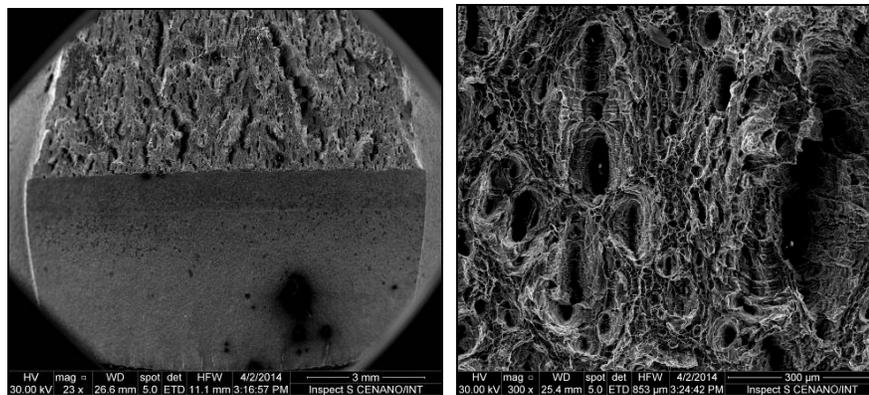


Figura A.33 – Fratografias # 1 e # 2 da superfície CP SET 04-02.

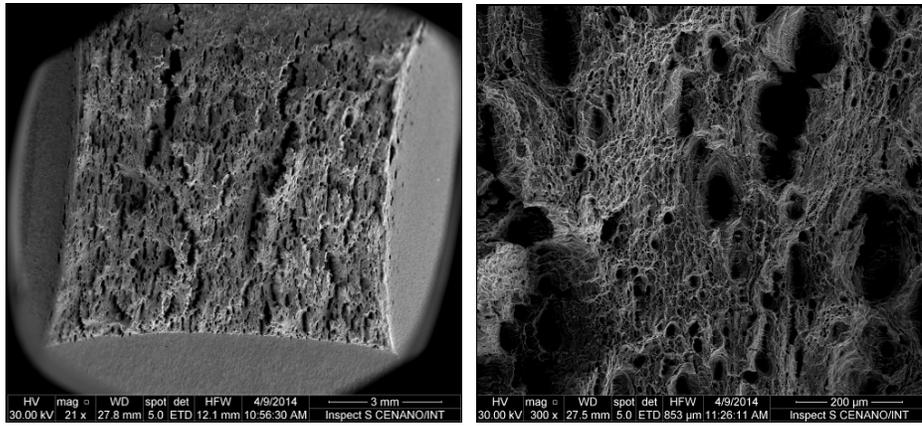


Figura A.34 – Fratografias # 1 e # 2 da superfície CP SET 04-03.

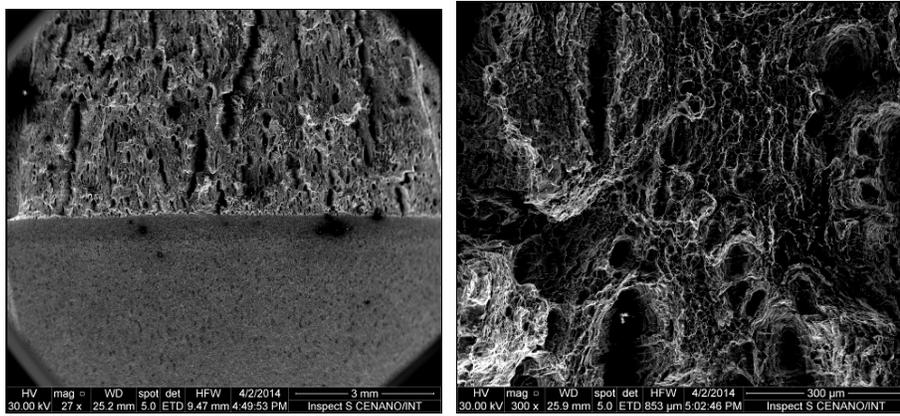


Figura A.35 – Fratografias # 1 e # 2 da superfície CP SET 05-01.

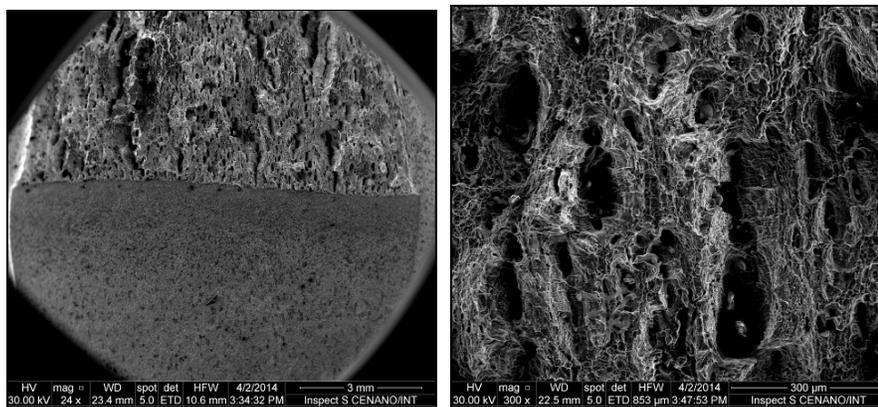


Figura A.36 – Fratografias # 1 e # 2 da superfície CP SET 05-02.

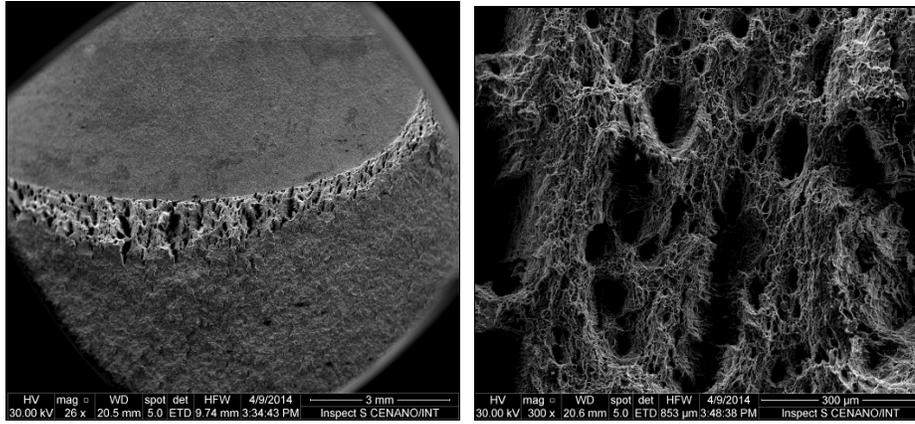


Figura A.37 – Fratografias # 1 e # 2 da superfície CP SET 05-03.

Apêndice B - Medição de deslocamento em teste de Tenacidade usando a Metodologia DIC

Um dos maiores problemas no desenvolvimento deste trabalho foi a disponibilidade de equipamentos de aquisição de dados apropriados e confiáveis. No caso específico dos testes de tenacidade um parâmetro importante de ser medido é o deslocamento da boca do entalhe, o qual é usualmente medido com clip gage. Por isto é importante encontrar alternativas a estes sensores que não sempre atendem a capacidade requerida ou encontram-se disponíveis para uso. Foi assim que conseguiu-se validar a técnica de processamento de imagens digitais (DIC) para a medição de deslocamento nos testes de tenacidade. Para validar este método, testes foram realizados em um material estrutural AISI 1020 utilizando CPs do tipo C(T).

Para materiais relativamente dúcteis, a norma britânica BS 7448[4] estabelece o cálculo da tenacidade à fratura considerando as partes elásticas e plásticas da taxa de alívio de energia, quantificada através da integral J:

$$J=J_{el}+J_{pl} \quad (B.1)$$

Considerando o cálculo da tenacidade relacionada à carga máxima, então:

$$J_{max} = \left[\frac{P_{max}}{BW^{0.5}} \cdot f\left(\frac{a_0}{W}\right) \right]^2 \frac{(1-\nu^2)}{E} + \frac{\eta_p A_p}{B(W-a_0)} \quad (B.2)$$

Onde P_{max} é a carga máxima, B é a espessura e W é a largura do corpo de prova, $f(a_0/w)$ é uma função adimensional que depende da geometria do CP, a_0 é o comprimento inicial de trinca, ν é o coeficiente de Poisson, E é o módulo de elasticidade do material, A_p é a área da parte plástica sob a curva força versus deslocamento do ponto de aplicação da força, e η_p e $f(a/W)$ são dados por:

$$\eta_p = 2 + 0,522 \left(1 - \frac{a_0}{W} \right) \quad (\text{B.3})$$

$$f \left(\frac{a_0}{W} \right) = \frac{\left(2 + \frac{a_0}{W} \right)}{\left(1 - \frac{a_0}{W} \right)^{1,5}} \left[0,886 + 4,64 \frac{a_0}{W} - 13,32 \left(\frac{a_0}{W} \right)^2 + 14,72 \left(\frac{a_0}{W} \right)^3 - 5,6 \left(\frac{a_0}{W} \right)^4 \right] \quad (\text{B.4})$$

É claro que para garantir uma medida confiável da tenacidade é preciso obter os dados de força aplicada e deslocamento da linha de carga de forma precisa, sem importar a geometria do corpo de prova ou as condições do teste. Usualmente o deslocamento do ponto de aplicação da força é medido com um *clip-gage*, como o mostrado na Figura B.1, onde a medição é realmente feita na linha de aplicação da força.

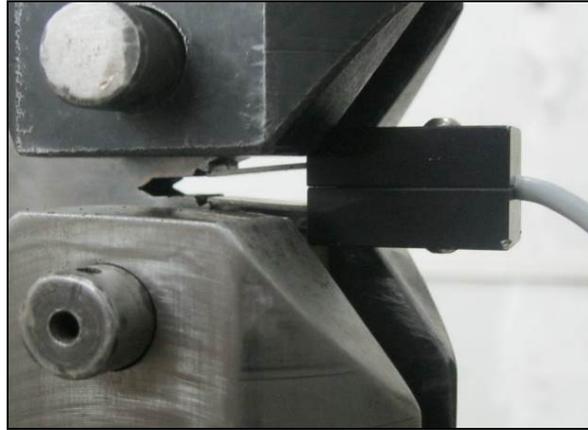


Figura B.1– Clip gage montado no CP.

O material utilizado foi um aço estrutural AISI 1020. Um total de quatro CPs do tipo C(T) foram utilizados nos testes de tenacidade à fratura relacionada com a carga máxima (J_{\max}). As dimensões dos CPs são apresentadas na Figura B.2.

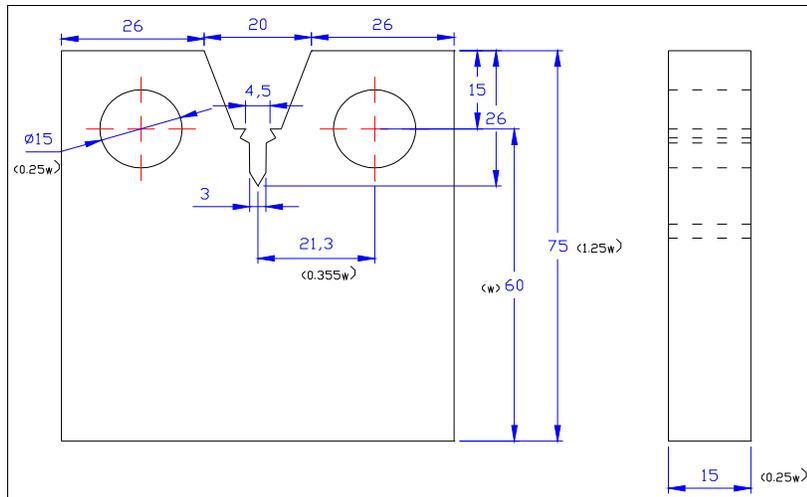


Figura B.2– Geometria e dimensões do CP.

Os corpos de prova foram pré-trincados por fadiga a uma razão de carga $R=0,1$ sob frequência de 40 Hz e $a_0/W=0,5$. O sistema de monitoramento do pré-trincado é constituído por um microscópio ótico, tipo Newport, com uma lente marca Nikon auto 1:3:5, lente 43-86 mm. e um micrômetro instalado na sua base conforme a Figura B.3.

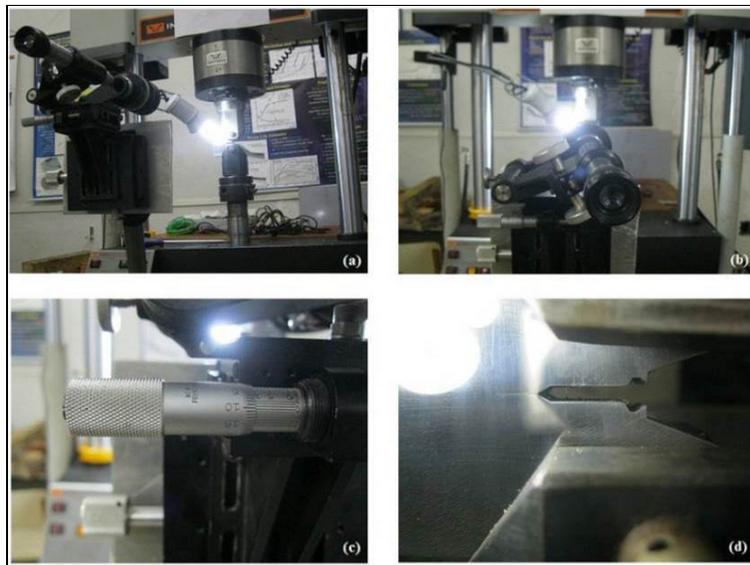


Figura B.3– Sistema de monitoramento da pré-trinca.

Após o pré-trincamento, os testes foram realizados em uma máquina servo-hidráulica Instron 8501 de 100kN sob controle da taxa de carregamento. Foram registrados os valores de carga e deslocamento da linha de ação da carga, este último medido com um clip gage. A preparação dos CPs para análise por

processamento de imagens foi feita antes de iniciar os testes, aplicou-se uma camada fina de tinta branca em spray e, em seguida, aplicou-se uma névoa de tinta negra (spray) a uma distância de aproximadamente 50 cm. , este procedimento foi aplicado também no clip gage e os pinos das garras conforme a Figura B.4.

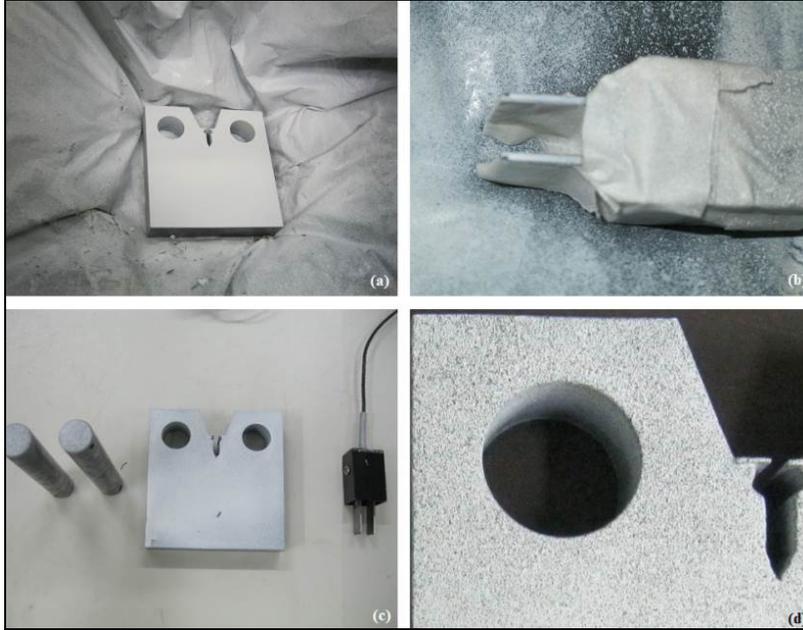


Figura B.4– Aplicação da tinta (a)CP;(b) clip gage;(c) conjunto ;(d) padrão de pontos

Com o objetivo de obter imagens claras para o processamento das fotografias é preciso garantir um bom ajuste das distâncias focais da câmera digital e uma ótima iluminação do CP a fotografar conforme a Figura B.5, detalhes sobre a técnica DIC e o equipamento podem ser vistas em [59].

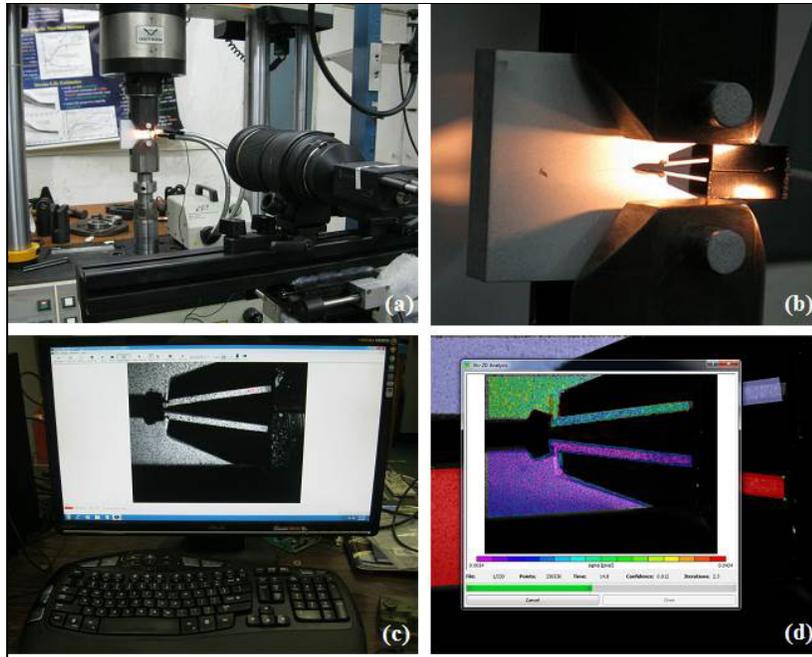


Figura B.5– Sistema de monitoramento : (a) câmera CCD e lente; (b) CP e clip gage a fotografar; (c) tela de alta resolução; (d) processamento das imagens DIC.

Os testes foram realizados variando a taxa de carregamento no intervalo $10^{-3} \leq \dot{P} \leq 1$ kN/s, onde a menor taxa de carregamento usada foi limitada pela capacidade da máquina, enquanto a maior taxa foi restrita pelo tempo de teste (35 segundos), a Tabela B.1 mostra as taxas usadas e o tempo estimado de cada teste.

	Taxa (kN/s)	Tempo estimado
CP1	0,001	9 horas
CP2	0,01	1 hora
CP3	0,1	6 minutos
CP4	1	35 segundos

Tabela B.1 – Taxa de carregamento e tempo dos testes.

O software usado para processamento das imagens foi o VIC 2D da Correlated Solutions e a quantidade de fotos por intervalo de tempo foi selecionada de acordo à duração estimada do teste , no CP4 foram capturadas com velocidade de 1 foto por segundo (1fps) e no CP1 a velocidade foi de 2 fotos por minuto (2fpm). As Figuras B.6 e B.7 mostram as imagens em diferentes intervalos de tempo do CP3 e o seu respectivo processamento (medindo o deslocamento da linha de ação da força).

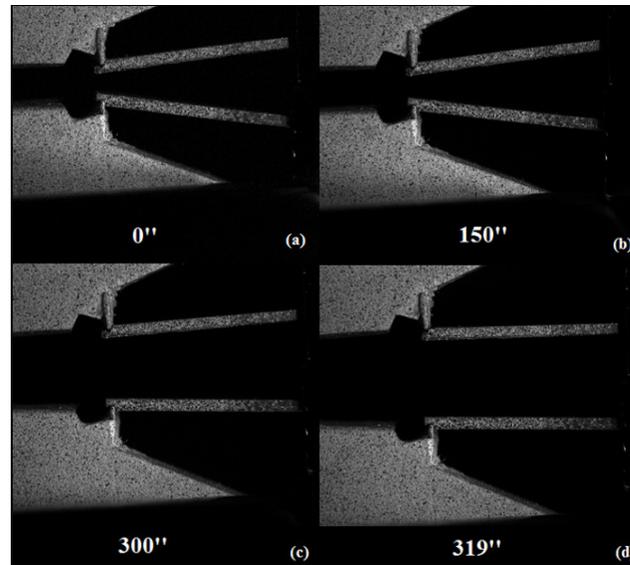


Figura B.6– Imagens tiradas pelo software DIC para o CP3.

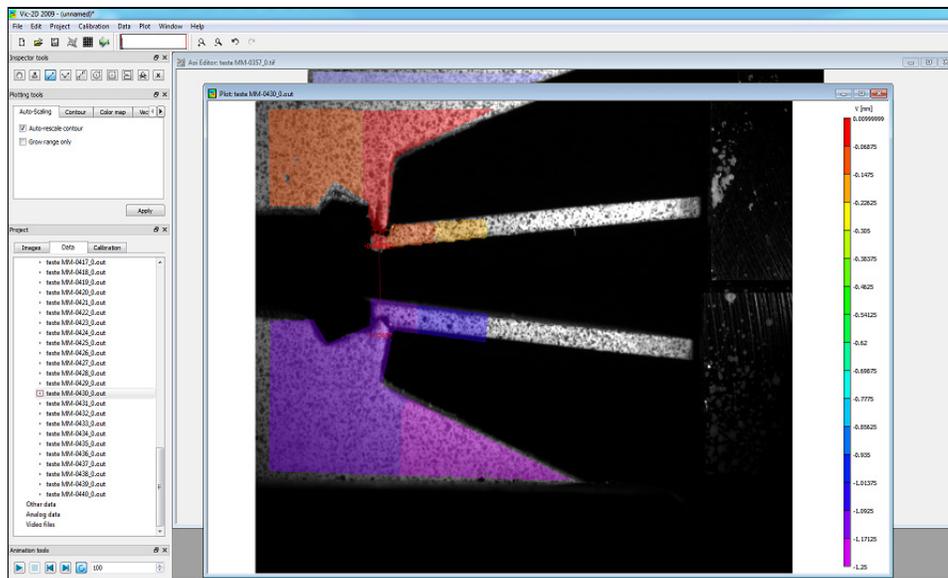


Figura B.7– Processamento de imagem CP3.

O deslocamento da linha de ação da força dos pontos obtidos no DIC e no sistema de aquisição de dados usando o clip gage podem ser comparados para uma mesma força aplicada. Nas Figuras B.8-B.11 são mostradas as curvas força vs. deslocamento da linha de ação da força medidas nos testes nas diferentes taxas de carregamento avaliadas. Pode-se notar que existe uma boa correlação dos deslocamentos nas medidas feitas com o clip gage comparadas com a técnica DIC.

Nas Figuras também pode-se observar que a técnica DIC permitiu realizar o controle do deslocamento até a abertura máxima do CP, o qual não foi possível com o clip gage devido ao fato deste atingir o seu limite máximo de deslocamento. A média das diferenças entre as medidas comparadas foi estimada em aproximadamente 7%.

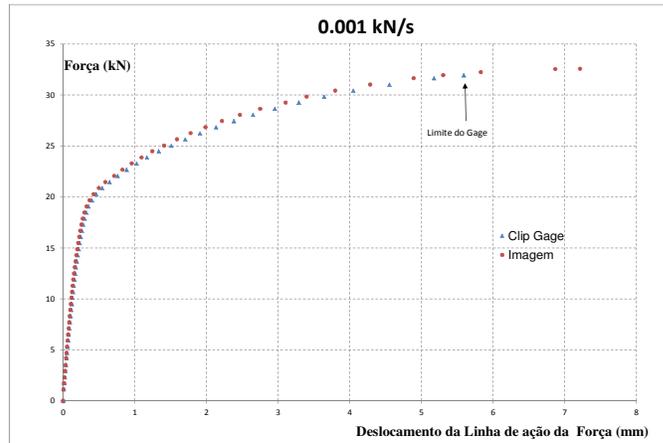


Figura B.8– Curva força vs.LLD – CP1.

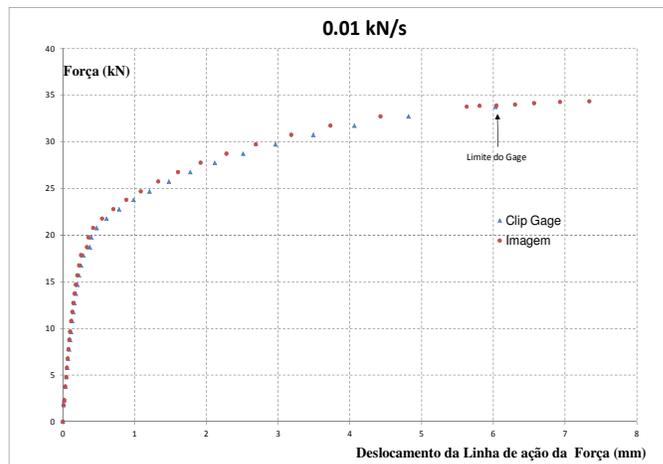


Figura B.9– Curva força vs.LLD – CP2.

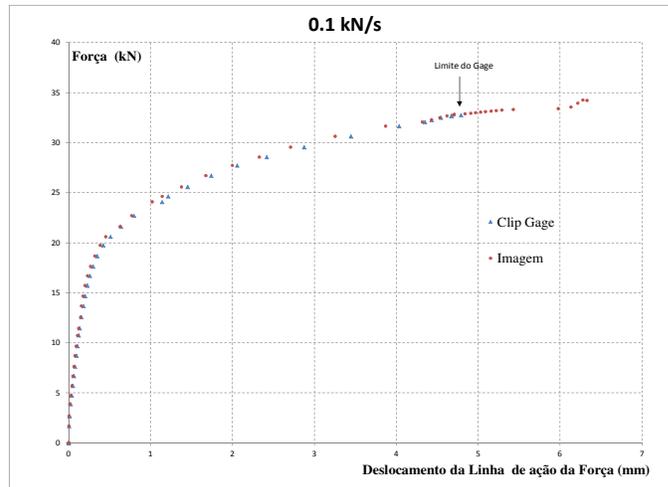


Figura B.10– Curva força vs.LLD – CP3.

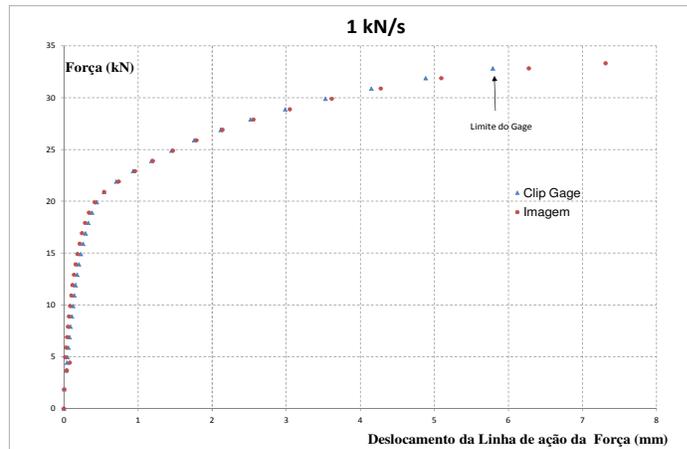


Figura B.11– Curva força vs.LLD – CP4.

Desta forma foi validada a técnica DIC para medição do deslocamento da linha de ação de força em testes de tenacidade à fratura. Quatro testes foram realizados em um material estrutural e em diferentes taxas de carregamento, os resultados medidos a partir da técnica DIC foram comparados com os medidos com um *clip gage* comercial. Uma boa correlação foi obtida entre ambas as técnicas, diferenças máximas de 7% foram obtidas. Assim, a técnica DIC mostrou-se como um método versátil por não precisar de contato com o corpo de prova, trabalhar em diferentes temperaturas e ter faixas de operação maiores do que os sensores convencionais.