

- [1] Site da TRANSPETRO – [www.transpetro.com.br](http://www.transpetro.com.br) consultado em 21/11/2006.
- [2] KIEFNER, J. F., et al., "Failure Stress Levels of Flaws in Pressurized Cylinders", Progress in Flaw Growth and Fracture Toughness Testing ASTM STP 536, American Society for Testing and Materials, pp. 461-481, (1973).
- [3] Anon., "Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines", A supplement to ANSI/ASME B31 Code for Pressure Piping, American National Standards Institute (ANSI) / American Society of Mechanical Engineers (ASME) B31G, New York, (1991).
- [4] Anon., Det Norske Veritas (DNV) Recommended Practice – DNV-RP-F101 – Corroded Pipelines, Norway, (2004).
- [5] FREIRE, J.L.F, VIEIRA, R.D., BENJAMIN, A.C., "Part II: Experimental Strain Analysis of Metal Loss Defects in Pipeline", Experimental Techniques, September/October, Society for Experimental Mechanics, (2006).
- [6] HOPKINS, P., "Defect Assessment in Pipelines", PETROBRAS, Rio de Janeiro, Setembro, 16–18, (2002).
- [7] BUENO, S.I.O, FRANZOI, A.R.; "Avaliação de Integridade de dutos submarinos de transferência: 10 anos de atividades na Bacia de Campos", IBP1132\_05, Rio Pipeline Conference, Rio de Janeiro, Outubro, 17–19, (2005)
- [8] FERREIRA, P.A., "Gerenciamento da Corrosão de Dutos – Corrosão Interna de Dutos de Óleo, Gás e Derivados", Curso de Formação de Novos Engenheiros, PETROBRAS, Novembro, (1998).
- [9] THOMAS, J.E.; **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**, Rio de Janeiro : Interciência : PETROBRAS, (2001).
- [10] MAGALHÃES, F.C.M., VIDAL, N.A.A., GOMES, V.L.C, "Metabolização de Sulfato de Bário por Bactérias Redutoras de

- Sulfato”, 15ª Mesa Redonda de Materiais, Inspeção e Corrosão, Nov/93, Centro de Pesquisas da PETROBRAS, (1993).
- [11] ALVES, L.F.C., “Efeito de Pequenas Adições de H<sub>2</sub>S na Corrosão do Aço-carbono pelo CO<sub>2</sub>: Estudo Efetuado com um Novo Sistema de Ensaio Eletroquímico sob Condições Controladas de Fluxo e Pressão”, COPPE/UFRJ, Dissertação de Mestrado, Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, (1997).
- [12] ANDRADE, C. A., “Avaliação da Corrosividade de Óleos Transportados em Dutos” – Relatório Final do Projeto 02.08.14 CENPES/PDEP/TMEC, (1999).
- [13] CAMERINI, C.S. et al., “Comparação do Resultado de 3 Técnicas de Inspeção com Pigs Instrumentados em um mesmo Oleoduto da Bacia de Campos”, IBP1127\_05, Rio Pipeline Conference, Rio de Janeiro, Out 17-19, (2005).
- [14] SMART, J. S., “Corrosion of welds in oil and gas pipelines”, Prevention of Pipeline Corrosion Conference, PIPES & PIPELINES INTERNATIONAL, November (1995).
- [15] ENDO, S., FUJITA, S., NAGAE, M., HIRANO, O. “New line pipe resists preferential corrosion at welds”, Oil and Gas Journal, March 17, (1997).
- [16] LEIS, B.N. et al., “Guidelines for Assessing Corrosion Associated with Welds”, Proceedings of IPC–2006, IPC2006-10503, 6th International Pipeline Conference, September, 25 – 29, 2006, Calgary, Canada.
- [17] HOPKINS, P., COSHAN, A. “The Pipeline Defect Assessment Manual”, Report to the PDAM Joint Industry Project, May, (2003).
- [18] Anon., “Specification of Line Pipe”, American Petroleum Institute (API) 5L, (2004).
- [19] PALMER, A. C., KING, R.A., **Subsea Pipeline Engineering**, Tulsa, PennWell, 2004, 570 p.
- [20] DENYS, R., “Pipeline Safety, past, present and future”, IPLOCA 26th Annual Convention, pp 1-28 (1992).
- [21] LIESSEM, A. et al., “Processing and Properties of an Alternative Alloying Concept for an Export Subsea Pipeline in Grade X70”, IPC2006\_10034, Proceedings of IPC 2006, 6th International Pipeline Conference, Calgary, Alberta, Canada.

- [22] ZIEDAS, S., TATINI, I., **Soldagem**, São Paulo, SENAI-SP, 1997, 553 p., Coleção Tecnologia SENAI.
- [23] GIANETTO, J.A. et al., "Characterization of the Microstructure and Toughness of DSAW and ERW Seam Welds of Older Linepipe Steels", Proceedings of IPC 2002, 4th International Pipeline Conference, September 29 – October 3, 2002, Calgary, Alberta, Canada.
- [24] LINNERT, G.E., **Welding Metallurgy – Carbon and Alloy Steels**, 3 ed, Vol. 1 - Fundamentals, American Welding Society, New York, (1965).
- [25] KOJIMA, S.S., "API 5L X80 ERW Pipes: TenarisConfab & Usiminas Development", Proceedings of IPC-2006, 6th International Pipeline Conference, September 25-29, 2006, Calgary, Canada.
- [26] KIEFNER, J.F., VIETH, P.H., "A Modified Criterion for Evaluating The Remaining Strength of Corroded Pipe", Final Report on project PR 3-805 to Pipeline Research Committee of American Gas Association, December, 22, 1989.
- [27] Anon., "Fitness for Service", Recommended Practice 579, American Petroleum Institute (API), First Edition, January 2000.
- [28] STEPHENS, D.R., LEIS, B.N., "Development of an Alternative Criterion for Residual Strength of Corrosion Defects in Moderate-to High-Toughness Pipe", Proceedings of IPC 2000, 3<sup>th</sup> International Pipeline Conference, Volume 2, pp. 781-792, ASME 2000, October 1 – 5, 2000, Calgary, Alberta, Canada.
- [29] BENJAMIN, A.C., ANDRADE, E.Q., "Modified Method for the Assessment of the Remaining Strength of Corroded Pipelines", IBP 413\_03, Rio Pipeline Conference and Exposition, Outubro 22-24, 2003, Rio de Janeiro, Brasil.
- [30] LIESSEM, A. ERDELEN-PEPPLER, M., "A Critical View on the Significance of HAZ Toughness Testing", International Pipeline Conference, IPC2004, October 4-8 Calgary, Alberta, Canada.
- [31] Anon., "Submarine Pipeline System", DNV-OS-F101, Det Norske Veritas, Norway, 2000.
- [32] PISARSKI, H.G., "A Review of HAZ Toughness Evaluation", Report 566/1996, The Welding Institute (TWI), Cambridge, United Kingdom, 1996.

- [33] DIETER, G.E., **Metalurgia Mecânica**, 2 ed., Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1981, 653 p.
- [34] CETLIN, P.R., SILVA, P.S.C.P., **Análise de Fraturas**, São Paulo, Associação Brasileira de Metais (ABM), 1978, 229 p.
- [35] American Society for Metals Handbook, Vol. 1, pp 31.
- [36] BUENO, S.I.O, MURRAY, P., “Freezing Technique Applied to an Offshore Pipeline at Campos Basin in Brazil”, Proceedings of IPC 2000, 3th International Pipeline Conference, Volume 2, pp. 1057-1064, ASME 2000, October 1 – 5, 2000, Calgary, Alberta, Canada.
- [37] RAMOS, M.A., **Metalurgia**, Rio de Janeiro, PETROBRAS / SEDES / CEN-SUD, (1989), 248 p.
- [38] LU, J., **Handbook of Measurements of Residual Stress**, Vol. 2, SEM, 2 ed., 417 p., (2005).
- [39] FERNANDES, J. L., “Análise e Modelagem de Tensões Residuais em Juntas Soldadas”, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2002;
- [40] Anon., “Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method”, American Society for Testing and Materials (ASTM) E 837-01, Philadelphia, (2004).
- [41] VIDIGAL, R., “Crescendo com o Brasil”, Texto publicitário da TENARISCONFAB obtido no site da empresa pesquisado em Outubro de 2006.
- [42] SOUZA, R.D. “Avaliação Estrutural de Dutos com Defeitos Reais”, Dissertação de mestrado, orientador: José Luiz de França Freire, co-orientador: Adilson Carvalho Benjamin, Rio de Janeiro, PUC, Departamento de Engenharia Mecânica, 2003.
- [43] VIEIRA, R.D., Programa Tecnológico de Dutos (PRODUT), Avaliação de Dutos Corroídos com Defeitos Curtos, Ensaios de Ruptura em espécimes Tubulares com Defeito de Corrosão na Solda Longitudinal, Caracterização dos Materiais dos Tubos usados na Confeção dos Espécimes Tubulares ET 11, 13, 14, 15 e 16, Relatório Técnico No 1 – Metal de Base, Relatório Técnico No 2 – Solda Longitudinal/ZTA do contrato do CENPES no. 0050.0011720.05.2, Centro Técnico Científico, PUC-Rio, set. 2006.

- [44] VIEIRA, R.D., Programa Tecnológico de Dutos (PRODUT), Avaliação de Dutos Corroídos com Defeitos Curtos, Ensaios de Ruptura em espécimes Tubulares com Defeito de Corrosão na Solda Longitudinal, Testes de Pressão nos espécimes Tubulares ET 11, 13, 14, 15 e 16, Relatório Técnico No 5 do contrato do CENPES no. 0050.0011720.05.2, Centro Técnico Científico, PUC-Rio, out. 2006.
- [45] Anon., “Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials”, American Society for Testing and Materials (ASTM) E8 – 04 (2004).
- [46] Anon., “Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products”, American Society for Testing and Materials (ASTM) A 370 – 03a, (2004).
- [47] American National Standard Institute (ANSI) – American Welding Society (AWS) – B4.0–98, “Standard Methods for Mechanical Testing of Welds”, (1998).
- [48] Anon., “Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials” American Society for Testing and Materials (ASTM) E23 – 06, (2006).
- [49] Anon., “Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens”, American Society for Testing and Materials (ASTM) E3 – 01, (2001).
- [50] LEIS, B.N. et al., “Guidelines for Assessing Corrosion associated with Girth and Long-Seam Welds” , Report GRI-04/0119, October, 2004.
- [51] SOUZA, S. A., **Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos – Fundamentos Teóricos e Práticos**, 5 ed., Edgard Blücher .
- [52] LEIS, B.N., KILINSKI, T.J., “Data Base of Mechanical and Toughness Properties of Pipe”, Catalog No L51845e, Battelle Memorial Institute, January 21, 2004.
- [53] FREIRE, J.L.F., BENJAMIN, A.C, VIEIRA, R.D., ROSAS, M.P., BUENO, S.I.O., “Avaliação da resistência de dutos com defeitos de corrosão do tipo pite em locais de intensificação de tensões”, Trabalho submetido ao COTEQ –2007.
- [54] Anon., “Standard Method for Mechanical Testing of Welds”, ANSI/AWS B4.0-98, American National Standard Institute, American Welding Society, 1998.

- [55] KERANS, W.H., “Resistance and Solid-state Welding and other Joining Processes”, Vol. 3, 7 ed., Welding Handbook, American Welding Society (AWS), Miami, 1980.
- [56] MELLO, M.A., “Estudo de Tenacidade à Fratura de Aço da Classe API 5L – X60”, Tese de Mestrado, Departamento de Metalurgia, COPPE-UFRJ, Junho, 1987, 128 p.
- [57] BENJAMIN, A.C., “Avaliação estrutural de Dutos Corroídos”, Curso da Universidade Corporativa, PETROBRAS, Jun, 2004.
- [58] Anon., “Standard Test Methods for Determining Average Grain Size”, American Society for Testing and Materials (ASTM) E112 – 96 (2004).

## APÊNDICE A – Valores Medidos nos Ensaio de Tração

### CPs TRANSVERSAIS CONTENDO A SOLDA LONGITUDINAL

| CP                | $\sigma_y$ (0,5%) | $\sigma_u$ (nominal) | $\epsilon_v$ (max) | $\epsilon_r$ |
|-------------------|-------------------|----------------------|--------------------|--------------|
| S 11-1            | 367               | 452                  | 8,4                | 14,4         |
| S 11-2            | 378               | 468                  | 8,9                | 15,8         |
| S 11-3            | 388               | 465                  | 8,4                | 12,8         |
| S 11-4            | 384               | 453                  | 8,3                | 13,5         |
| <b>Média S 11</b> | <b>379</b>        | <b>460</b>           | <b>8,5</b>         | <b>14,1</b>  |
| S 13-1            | 404               | 539                  | 7,2                | 12,3         |
| S 13-2            | 399               | 540                  | 8,0                | 13,8         |
| S 13-3            | 407               | 541                  | 7,3                | 10,9         |
| S 13-4            | 403               | 534                  | 7,9                | 11,0         |
| <b>Média S 13</b> | <b>403</b>        | <b>539</b>           | <b>7,6</b>         | <b>12,0</b>  |
| S 14-1            | 394               | 470                  | 5,1                | 6,2          |
| S 14-2            | 391               | 465                  | 5,7                | 7,9          |
| S 14-3            | 406               | 483                  | 5,7                | 8,6          |
| S 14-4            | 402               | 476                  | 7,2                | 11,3         |
| <b>Média S 14</b> | <b>398</b>        | <b>474</b>           | <b>6,0</b>         | <b>8,5</b>   |
| S 15-1            | 371               | 440                  | 5,6                | 7,5          |
| S 15-2            | 399               | 458                  | 4,7                | 6,9          |
| S 15-3            | 390               | 447                  | 4,5                | 6,2          |
| S 15-4            | 376               | 444                  | 4,2                | 5,9          |
| <b>Média S 15</b> | <b>383</b>        | <b>447</b>           | <b>4,7</b>         | <b>6,6</b>   |
| S 16-1            | 330               | 443                  | 9,4                | 15,3         |
| S 16-2            | 332               | 444                  | 8,4                | 14,3         |
| S 16-3            | 346               | 445                  | 8,2                | 13,8         |
| S 16-4            | 346               | 452                  | 8,1                | 13,0         |
| <b>Média S 16</b> | <b>339</b>        | <b>446</b>           | <b>8,5</b>         | <b>14,1</b>  |

Legendas:  $\sigma_y$  (0,5%) – Resistência ao Escoamento medida a 0,5% de deformação total [MPa];  $\sigma_u$  (nominal) – Tensão Última de Resistência Nominal [MPa];  $\epsilon_v$  (max) – Deformação verdadeira na tensão máxima nominal [%];  $\epsilon_r$  – Deformação nominal no momento do início da ruptura [%]

### CPs LONGITUDINAIS RETIRADOS APENAS DO METAL DE SOLDA

| CP                | E                                                       | $\sigma_y$ (0,2%) | $\sigma_y$ (0,5%) | $\sigma_u$ (verd) | $\sigma_u$ (nom) | $\sigma_r$ |
|-------------------|---------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------|
| M 11-1            | 194                                                     | 374               | 373               | 601               | 528              | 383        |
| M 11-2            | 204                                                     | 376               | 390               | 577               | 518              | 362        |
| M 11-3            | 198                                                     | 372               | 371               | 574               | 512              | 356        |
| <b>Média M 11</b> | <b>199</b>                                              | <b>374</b>        | <b>378</b>        | <b>584</b>        | <b>519</b>       | <b>367</b> |
| M 13-1            | Resultados descartados por problemas na usinagem do CP. |                   |                   |                   |                  |            |
| M 13-2            | 195                                                     | 550               | 557               | 683               | 651              | 528        |
| M 13-3            | 193                                                     | 531               | 537               | 685               | 638              | 477        |
| M 13-4            | 199                                                     | 546               | 556               | 682               | 648              | 483        |
| <b>Média M 13</b> | <b>196</b>                                              | <b>542</b>        | <b>550</b>        | <b>683</b>        | <b>646</b>       | <b>496</b> |
| M 14-1            | 205                                                     | 400               | 416               | 586               | 536              | 379        |
| M 14-2            | 186                                                     | 391               | 390               | 602               | 538              | 378        |
| M 14-3            | 199                                                     | 379               | 386               | 589               | 529              | 365        |
| <b>Média M 14</b> | <b>197</b>                                              | <b>390</b>        | <b>397</b>        | <b>592</b>        | <b>534</b>       | <b>374</b> |
| M 15-1            | 193                                                     | 376               | 380               | 595               | 524              | 368        |
| M 15-2            | 180                                                     | 379               | 378               | 589               | 519              | 378        |
| M 15-3            | 164                                                     | 377               | 380               | 595               | 526              | 371        |
| <b>Média M 15</b> | <b>179</b>                                              | <b>377</b>        | <b>379</b>        | <b>593</b>        | <b>523</b>       | <b>372</b> |
| M 16-1            | 184                                                     | 370               | 367               | 573               | 510              | 366        |
| M 16-2            | 189                                                     | 383               | 383               | 586               | 526              | 378        |
| M 16-3            | 188                                                     | 399               | 411               | 583               | 521              | 366        |
| <b>Média M 16</b> | <b>187</b>                                              | <b>384</b>        | <b>387</b>        | <b>581</b>        | <b>519</b>       | <b>370</b> |

Legendas: **E** – Módulo de Elasticidade [GPa];  **$\sigma_y$  (0,2%)** – Resistência ao Escoamento medida a 0,2% de deformação plástica [MPa];  **$\sigma_y$  (0,5%)** – Resistência ao Escoamento medida a 0,5% de deformação total [MPa];  **$\sigma_u$  (verd)** – Tensão Última de Resistência Verdadeira [MPa];  **$\sigma_u$  (nominal)** – Tensão Última de Resistência Nominal [MPa];  **$\sigma_r$**  – Tensão nominal no início da Ruptura [MPa]



| CP                | $\epsilon_v$ (max)                                      | $\epsilon_n$ (max) | $\epsilon_r$ | Alongamento | Estricção   |
|-------------------|---------------------------------------------------------|--------------------|--------------|-------------|-------------|
| M 11-1            | 12,8                                                    | 13,7               | 24,9         | 31,3        | 67,1        |
| M 11-2            | 10,8                                                    | 11,4               | 24,1         | 30,7        | 63,6        |
| M 11-3            | 11,5                                                    | 12,2               | 24,3         | 31,0        | 66,8        |
| <b>Média M 11</b> | <b>12,0</b>                                             | <b>8,0</b>         | <b>24,0</b>  | <b>31,0</b> | <b>66,0</b> |
| M 13-1            | Resultados descartados por problemas na usinagem do CP. |                    |              |             |             |
| M 13-2            | 4,9                                                     | 5,0                | 17,2         | 23,3        | 51,2        |
| M 13-3            | 7,2                                                     | 7,4                | 19,9         | 24,7        | 56,5        |
| M 13-4            | 5,2                                                     | 5,3                | 18,3         | 23,3        | 54,9        |
| <b>Média M 13</b> | <b>5,8</b>                                              | <b>5,9</b>         | <b>18,5</b>  | <b>23,8</b> | <b>54,2</b> |
| M 14-1            | 8,8                                                     | 9,2                | 20,8         | 26,7        | 68,4        |
| M 14-2            | 11,3                                                    | 12,0               | 23,4         | 27,3        | 69,4        |
| M 14-3            | 10,8                                                    | 11,4               | 24,6         | 30,7        | 69,8        |
| <b>Média M 14</b> | <b>10,0</b>                                             | <b>11,0</b>        | <b>23,0</b>  | <b>28,0</b> | <b>69,0</b> |
| M 15-1            | 12,7                                                    | 13,6               | 25,9         | 32,3        | 66,6        |
| M 15-2            | 12,5                                                    | 13,3               | 24,2         | 30,7        | 66,9        |
| M 15-3            | 12,4                                                    | 13,2               | 26,3         | 31,3        | 68,2        |
| <b>Média M 15</b> | <b>13,0</b>                                             | <b>13,0</b>        | <b>25,0</b>  | <b>31,0</b> | <b>67,0</b> |
| M 16-1            | 11,8                                                    | 12,5               | 24,2         | 31,3        | 65,5        |
| M 16-2            | 10,8                                                    | 11,4               | 23,1         | 28,0        | 63,6        |
| M 16-3            | 11,2                                                    | 11,9               | 23,9         | 30,0        | 64,0        |
| <b>Média M 16</b> | <b>11,0</b>                                             | <b>12,0</b>        | <b>24,0</b>  | <b>30,0</b> | <b>64,0</b> |

Legendas:  $\epsilon_v$  (max) – Deformação verdadeira na tensão máxima nominal [%];  $\epsilon_n$  (max) – Deformação nominal na tensão máxima nominal [%];  $\epsilon_r$  – Deformação nominal no momento do início da ruptura [%]; **Alongamento** – Alongamento medido unido-se as duas partes do CP após o ensaio [%]; **Estricção** – Estricção medida unido-se as duas partes do CP após o ensaio [%].

## CPs LONGITUDINAIS RETIRADOS DO METAL BASE

| CP                | E          | $\sigma_y$ (0,2%) | $\sigma_y$ (0,5%) | $\sigma_u$ (verd) | $\sigma_u$ (noL) | $\sigma_r$ |
|-------------------|------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------|
| L 11-1            | 197        | 306               | 320               | 518               | 440              | 369        |
| L 11-2            | 195        | 310               | 321               | 525               | 446              | 370        |
| L 11-3            | 200        | 306               | 318               | 518               | 442              | 369        |
| L 11-4            | 201        | 318               | 328               | 524               | 447              | 203        |
| <b>Média L 11</b> | <b>198</b> | <b>310</b>        | <b>322</b>        | <b>521</b>        | <b>444</b>       | <b>328</b> |
| L 13-1            | 203        | 401               | 403               | 642               | 568              | 516        |
| L 13-2            | 181        | 432               | 434               | 622               | 557              | 508        |
| L 13-3            | 200        | 415               | 418               | 648               | 579              | 426        |
| L 13-4            | 198        | 424               | 422               | 641               | 574              | 519        |
| <b>Média L 13</b> | <b>196</b> | <b>418</b>        | <b>419</b>        | <b>638</b>        | <b>570</b>       | <b>492</b> |
| L 14-1            | 200        | 341               | 347               | 522               | 463              | 354        |
| L 14-2            | 194        | 346               | 352               | 535               | 466              | 358        |
| L 14-3            | 202        | 348               | 347               | 518               | 456              | 319        |
| L 14-4            | 199        | 363               | 366               | 546               | 483              | 395        |
| <b>Média L 14</b> | <b>199</b> | <b>350</b>        | <b>353</b>        | <b>530</b>        | <b>467</b>       | <b>357</b> |
| L 15-1            | 186        | 337               | 336               | 520               | 458              | 404        |
| L 15-2            | 169        | 335               | 338               | 489               | 436              | 380        |
| L 15-3            | 174        | 316               | 317               | 485               | 423              | 362        |
| L 15-4            | 198        | 319               | 320               | 482               | 422              | 406        |
| <b>Média L 15</b> | <b>182</b> | <b>327</b>        | <b>328</b>        | <b>494</b>        | <b>435</b>       | <b>388</b> |
| L 16-1            | 180        | 276               | 282               | 534               | 448              | 408        |
| L 16-2            | 198        | 270               | 277               | 528               | 444              | 325        |
| L 16-3            | 194        | 288               | 292               | 540               | 456              | 404        |
| L 16-4            | 184        | 279               | 283               | 535               | 449              |            |
| <b>Média L 16</b> | <b>189</b> | <b>278</b>        | <b>284</b>        | <b>534</b>        | <b>449</b>       | <b>294</b> |

Legendas: **E** – Módulo de Elasticidade [GPa];  **$\sigma_y$  (0,2%)** – Resistência ao Escoamento medida a 0,2% de deformação plástica [MPa];  **$\sigma_y$  (0,5%)** – Resistência ao Escoamento medida a 0,5% de deformação total [MPa];  **$\sigma_u$  (verd)** – Tensão Última de Resistência Verdadeira [MPa];  **$\sigma_u$  (nominal)** – Tensão Última de Resistência Nominal [MPa];  **$\sigma_r$**  – Tensão nominal no início da Ruptura [MPa]

| CP                | $\epsilon_v$ (max) | $\epsilon_n$ (max) | $\epsilon_r$ | Alongamento |
|-------------------|--------------------|--------------------|--------------|-------------|
| L 11-1            | 16,4               | 17,8               | 39,0         | 45,2        |
| L 11-2            | 16,1               | 17,5               | 38,9         | 44,6        |
| L 11-3            | 15,9               | 17,3               | 40,4         | 48,2        |
| L 11-4            | 15,9               | 17,3               | 40,2         | 45,6        |
| <b>Média L 11</b> | <b>16,1</b>        | <b>17,4</b>        | <b>39,6</b>  | <b>45,9</b> |
| L 13-1            | 12,2               | 13,0               | 24,0         | 29,4        |
| L 13-2            | 11,1               | 11,7               | 26,8         | 31,4        |
| L 13-3            | 11,2               | 11,9               | 29,8         | 33,8        |
| L 13-4            | 11,0               | 11,7               | 21,5         | 27,8        |
| <b>Média L 13</b> | <b>11,4</b>        | <b>12,1</b>        | <b>25,5</b>  | <b>30,6</b> |
| L 14-1            | 12,0               | 12,8               | 32,3         | 39,6        |
| L 14-2            | 13,6               | 14,6               | 34,4         | 39,0        |
| L 14-3            | 12,7               | 13,5               | 31,8         | 37,0        |
| L 14-4            | 12,3               | 13,1               | 36,2         | 42,4        |
| <b>Média L 14</b> | <b>12,7</b>        | <b>13,5</b>        | <b>33,7</b>  | <b>39,5</b> |
| L 15-1            | 12,8               | 13,7               | 28,3         | 34,6        |
| L 15-2            | 11,5               | 12,2               | 32,2         | 39,4        |
| L 15-3            | 13,6               | 14,6               | 35,9         | 42,2        |
| L 15-4            | 13,3               | 14,2               | 25,0         | 39,2        |
| <b>Média L 15</b> | <b>12,8</b>        | <b>13,6</b>        | <b>30,3</b>  | <b>38,9</b> |
| L 16-1            | 17,5               | 19,1               | 31,0         | 41,8        |
| L 16-2            | 17,3               | 18,9               | 34,7         | 39,8        |
| L 16-3            | 16,8               | 18,3               | 36,6         | 41,2        |
| L 16-4            | 17,5               | 19,2               | 37,2         | 36,4        |
| <b>Média L 16</b> | <b>17,3</b>        | <b>18,9</b>        | <b>34,8</b>  | <b>39,8</b> |

Legendas:  $\epsilon_v$  (max) – Deformação verdadeira na tensão máxima nominal [%];  $\epsilon_n$  (max) – Deformação nominal na tensão máxima nominal [%];  $\epsilon_r$  – Deformação nominal no momento do início da ruptura [%]; **Alongamento** – Alongamento medido unido-se as duas partes do CP após o ensaio [%].

### CPs TRANSVERSAIS RETIRADOS DO METAL BASE

| CP                | E          | $\sigma_y$ (0,2%) | $\sigma_y$ (0,5%) | $\sigma_u$ (verd) | $\sigma_u$ (nom) | $\sigma_r$ |
|-------------------|------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------|
| T 11-1            | 200        | 338               | 344               | 516               | 443              | 356        |
| T 11-2            | 201        | 336               | 341               | 504               | 442              | 389        |
| T 11-3            | 193        | 319               | 332               | 398               | 434              | 386        |
| T 11-4            | 198        | 335               | 342               | 497               | 439              | 389        |
| <b>Média T 11</b> | <b>198</b> | <b>332</b>        | <b>340</b>        | <b>504</b>        | <b>440</b>       | <b>380</b> |
| T 13-1            | 200        | 454               | 455               | 669               | 604              | 541        |
| T 13-2            | 201        | 430               | 435               | 637               | 584              | 529        |
| T 13-3            | 196        | 445               | 448               | 673               | 619              | 554        |
| T 13-4            | 199        | 428               | 435               | 657               | 593              | 531        |
| <b>Média T 13</b> | <b>199</b> | <b>439</b>        | <b>443</b>        | <b>659</b>        | <b>600</b>       | <b>539</b> |
| T 14-1            | 194        | 372               | 378               | 530               | 476              | 437        |
| T 14-2            | 206        | 404               | 407               | 563               | 505              | 453        |
| T 14-3            | 206        | 396               | 396               | 561               | 496              | 451        |
| T 14-4            | 202        | 388               | 389               | 545               | 492              | 453        |
| <b>Média T 14</b> | <b>202</b> | <b>390</b>        | <b>393</b>        | <b>550</b>        | <b>492</b>       | <b>449</b> |
| T 15-1            | 200        | 359               | 370               | 526               | 466              | 460        |
| T 15-2            | 198        | 375               | 379               | 537               | 477              | 422        |
| T 15-3            | 201        | 356               | 365               | 527               | 468              | 418        |
| T 15-4            | 200        | 367               | 373               | 525               | 468              | 416        |
| <b>Média T 15</b> | <b>200</b> | <b>364</b>        | <b>372</b>        | <b>529</b>        | <b>470</b>       | <b>429</b> |
| T 16-1            | 200        | 309               | 309               | 549               | 468              | 424        |
| T 16-2            | 198        | 311               | 314               | 558               | 473              | 423        |
| T 16-3            | 201        | 315               | 318               | 556               | 476              | 430        |
| T 16-4            | 199        | 308               | 314               | 549               | 475              | 429        |
| <b>Média T 16</b> | <b>200</b> | <b>311</b>        | <b>314</b>        | <b>553</b>        | <b>473</b>       | <b>427</b> |

Legendas: **E** – Módulo de Elasticidade [GPa];  **$\sigma_y$  (0,2%)** – Resistência ao Escoamento medida a 0,2% de deformação plástica [MPa];  **$\sigma_y$  (0,5%)** – Resistência ao Escoamento medida a 0,5% de deformação total [MPa];  **$\sigma_u$  (verd)** – Tensão Última de Resistência Verdadeira [MPa];  **$\sigma_u$  (nominal)** – Tensão Última de Resistência Nominal [MPa];  **$\sigma_r$**  – Tensão nominal no início da Ruptura [MPa]

| CP                | $\epsilon_v$ (max) | $\epsilon_n$ (max) | $\epsilon_r$ | Alongamento |
|-------------------|--------------------|--------------------|--------------|-------------|
| T 11-1            | 15,1               | 16,3               | 14,9         | 39,4        |
| T 11-2            | 13,1               | 14,0               | 31,1         | 37,0        |
| T 11-3            | 13,8               | 14,8               | 29,6         | 36,2        |
| T 11-4            | 12,4               | 13,3               | 24,5         | 32,8        |
| <b>Média T 11</b> | <b>13,6</b>        | <b>14,6</b>        | <b>30,0</b>  | <b>36,4</b> |
| T 13-1            | 10,1               | 10,6               | 25,9         | 30,6        |
| T 13-2            | 8,6                | 9,0                | 18,7         | 26,0        |
| T 13-3            | 8,3                | 8,7                | 19,0         | 28,2        |
| T 13-4            | 10,2               | 10,8               | 24,2         | 29,6        |
| <b>Média T 13</b> | <b>9,3</b>         | <b>9,8</b>         | <b>21,9</b>  | <b>28,6</b> |
| T 14-1            | 10,7               | 11,3               | 20,5         | 27,6        |
| T 14-2            | 10,8               | 11,3               | 22,6         | 31,6        |
| T 14-3            | 12,3               | 13,1               | 30,1         | 36,6        |
| T 14-4            | 10,1               | 10,8               | 21,4         | 27,4        |
| <b>Média T 14</b> | <b>11,0</b>        | <b>11,6</b>        | <b>23,6</b>  | <b>30,8</b> |
| T 15-1            | 12,0               | 12,7               | 18,9         | 34,0        |
| T 15-2            | 11,8               | 12,5               | 27,3         | 32,6        |
| T 15-3            | 11,9               | 12,6               | 26,9         | 32,2        |
| T 15-4            | 11,5               | 12,2               | 26,6         | 33,4        |
| <b>Média T 15</b> | <b>11,8</b>        | <b>12,5</b>        | <b>26,9</b>  | <b>33,1</b> |
| T 16-1            | 16,0               | 17,4               | 30,3         | 34,8        |
| T 16-2            | 16,6               | 18,1               | 33,1         | 36,6        |
| T 16-3            | 15,5               | 16,7               | 31,1         | 35,8        |
| T 16-4            | 14,5               | 15,6               | 28,8         | 33,8        |
| <b>Média T 16</b> | <b>15,6</b>        | <b>16,9</b>        | <b>30,9</b>  | <b>35,3</b> |

Legendas:  $\epsilon_v$  (max) – Deformação verdadeira na tensão máxima nominal [%];  $\epsilon_n$  (max) – Deformação nominal na tensão máxima nominal [%];  $\epsilon_r$  – Deformação nominal no momento do início da ruptura [%]; **Alongamento** – Alongamento medido unido-se as duas partes do CP após o ensaio [%].

## APÊNDICE B – Memória de Cálculo da Resistência Remanescente dos ETs com defeitos pelo Método da API 579

- 1) Cálculo executado com base na Seção 5 (*Assessment of a Local Metal Loss*) da Norma API 579;
- 2) Considerada espessura mínima igual a nominal, ou seja  
 $t_{\text{mínima}} = 6,35\text{mm}$ ;
- 3) Considerado FCA (*Future Corrosion Allowance*) igual a zero, ou seja, não se está prevendo nenhum progresso da corrosão na análise em questão;
- 4) Considerada espessura mínima medida ( $t_{mm}$ ) igual a espessura mínima de cada ET;
- 5) Com base nas informações anteriores é calculado o parâmetro  $R_t$  (*Remaining Thickness Ratio*);

$$\text{a. } R_t = \frac{t_{mm} - FCA}{t_{\text{mínima}}}$$

- 6) Condições dos parâmetros  $R_t$  e  $t_{mm} - FCA$  para que possa da continuidade aos cálculos
  - a.  $R_t \geq 0,20$
  - b.  $t_{mm} - FCA \geq 2,5 \text{ mm}$
- 7) Cálculo do parâmetro  $RSF$  (*Remaining Strength Factor*)

$$\text{a. } RSF = \frac{R_t}{1 - \frac{1}{M_t}(1 - R_t)}$$

$$\text{b. } M_t = \sqrt{1 + 0,48 \cdot \lambda^2}$$

$$\text{c. } \lambda = \frac{1,28 \cdot s}{\sqrt{D \cdot t_{\text{mín}}}}, \text{ onde } s \text{ é o comprimento longitudinal do defeito.}$$

- 8) Cálculo da Pressão Prevista de Ruptura

$$\text{a. } P_{\text{método}} = \sigma_{\text{flow}} \cdot \left( \frac{2t}{D} \right) \cdot RSF, \text{ onde } \sigma_{\text{flow}} [\text{MPa}] = \sigma_y + 69$$

9) Os resultados dos cálculos estão apresentados na Tabela abaixo.

| <b>ET</b> | $R_t$ | $\lambda$ | $M_t$ | $RSF$ | $\sigma_{flow}$ [MPa] | $P_{método}$ [kgf/cm <sup>2</sup> ] |
|-----------|-------|-----------|-------|-------|-----------------------|-------------------------------------|
| 11        | 0,34  | 3,23      | 2,44  | 0,47  | 411                   | 55,1                                |
| 13        | 0,31  | 4,45      | 3,24  | 0,39  | 504                   | 57,1                                |
| 14        | 0,32  | 5,82      | 4,15  | 0,39  | 462                   | 51,7                                |
| 15        | 0,31  | 4,25      | 3,11  | 0,40  | 441                   | 50,4                                |
| 16        | 0,29  | 5,63      | 4,03  | 0,35  | 383                   | 39,3                                |

## **APÊNDICE C – Fotos e Croquis dos ETs após Ruptura com Dimensões dos Alvéolos**

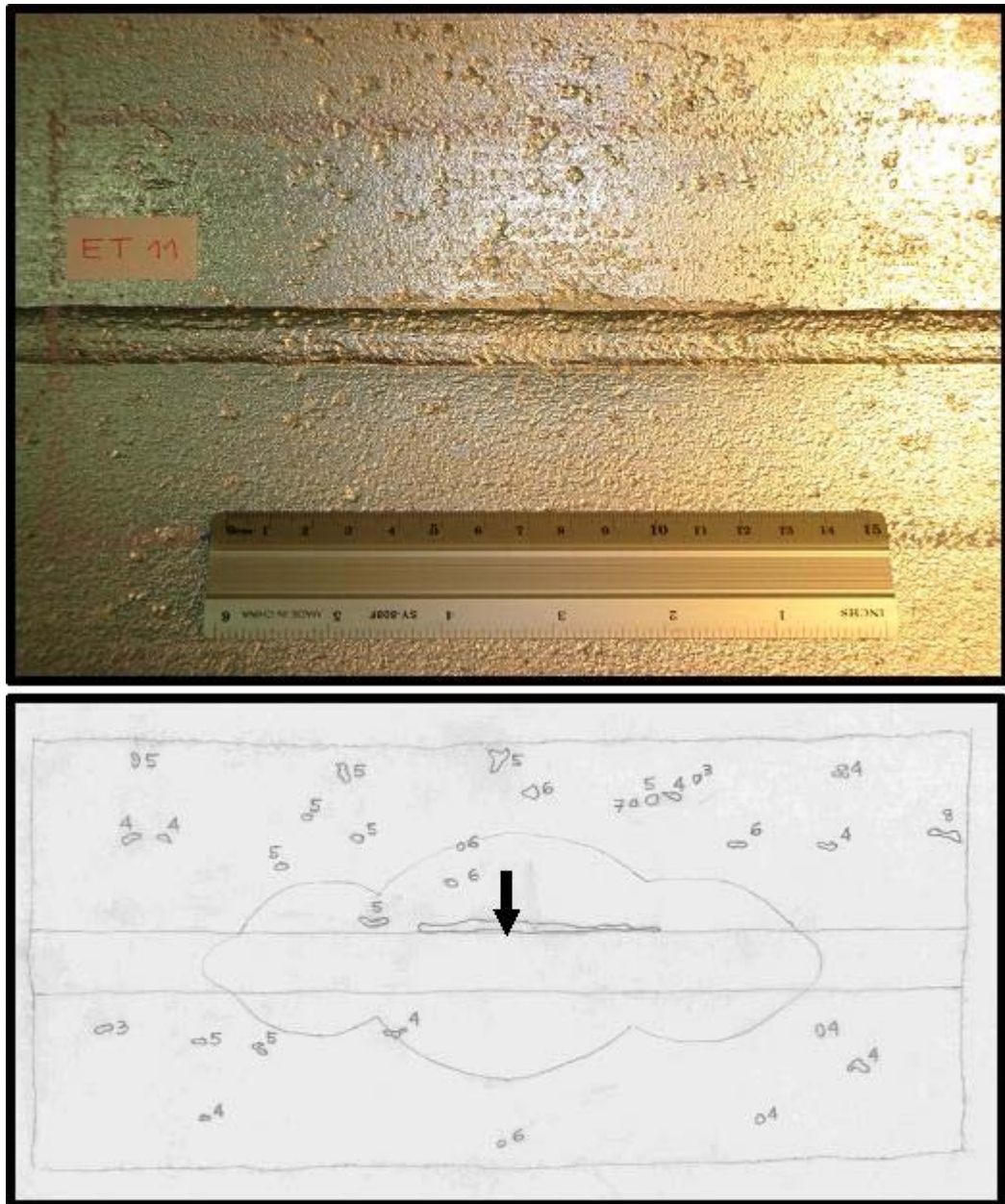
Foram realizadas medições para se estimar a contribuição dos alvéolos internos na redução da pressão de ruptura dos ensaios.

As medidas foram executadas com paquímetro e arredondadas sempre para valores maiores. O comprimento dos defeitos foi considerado como sendo a dimensão de início e fim de uma descontinuidade na direção longitudinal, mesmo que existissem variações de profundidade no seu interior.

Os valores inteiros apresentados nos croquis dos ETs 11 e 13 representam a profundidade dos alvéolos em décimos de milímetros. Nos ETs 15 e 16 as profundidades estão apresentadas em milímetros.

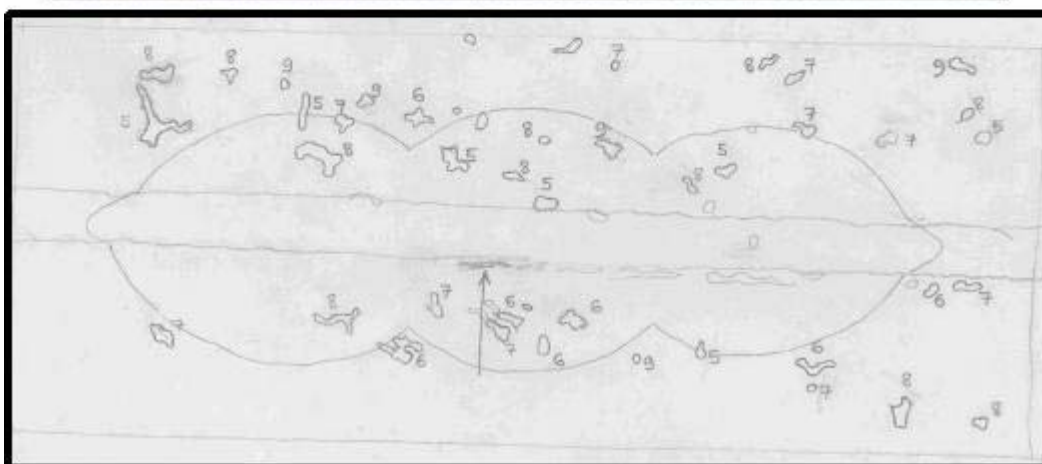


**(L=136,4 mm – t= 6,40 mm – d= 4,20 mm)**



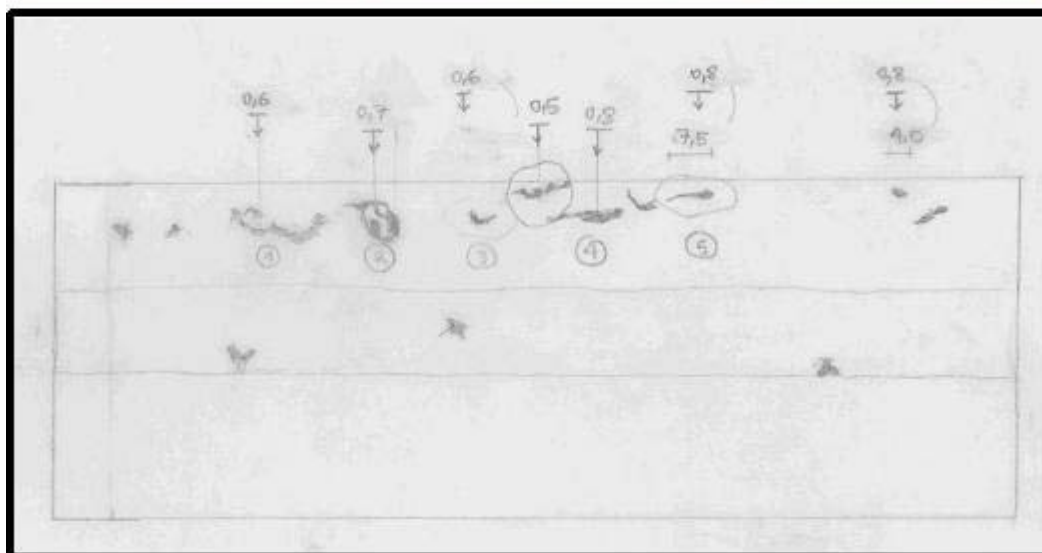
**ET 13**

(L=189,8 mm – t= 6,50 mm – d= 4,50 mm)



**ET 15**

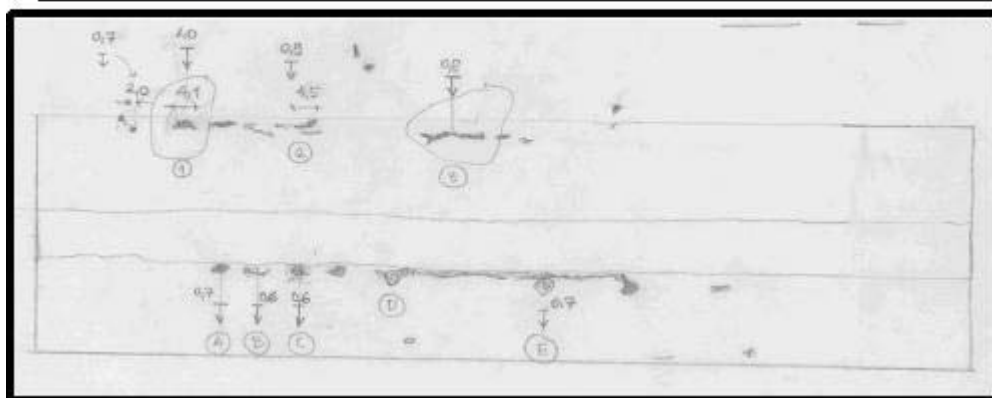
(L=180 mm – t= 6,40 mm – d= 4,40 mm)





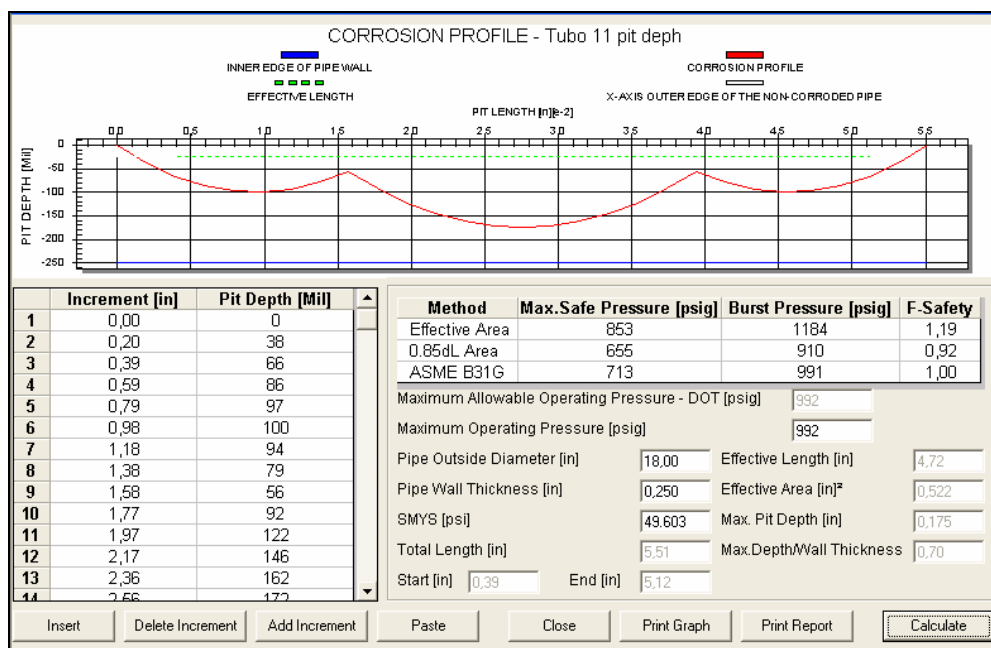
**ET 16**

(L=240 mm – t= 6,50 mm – d= 4,60 mm)

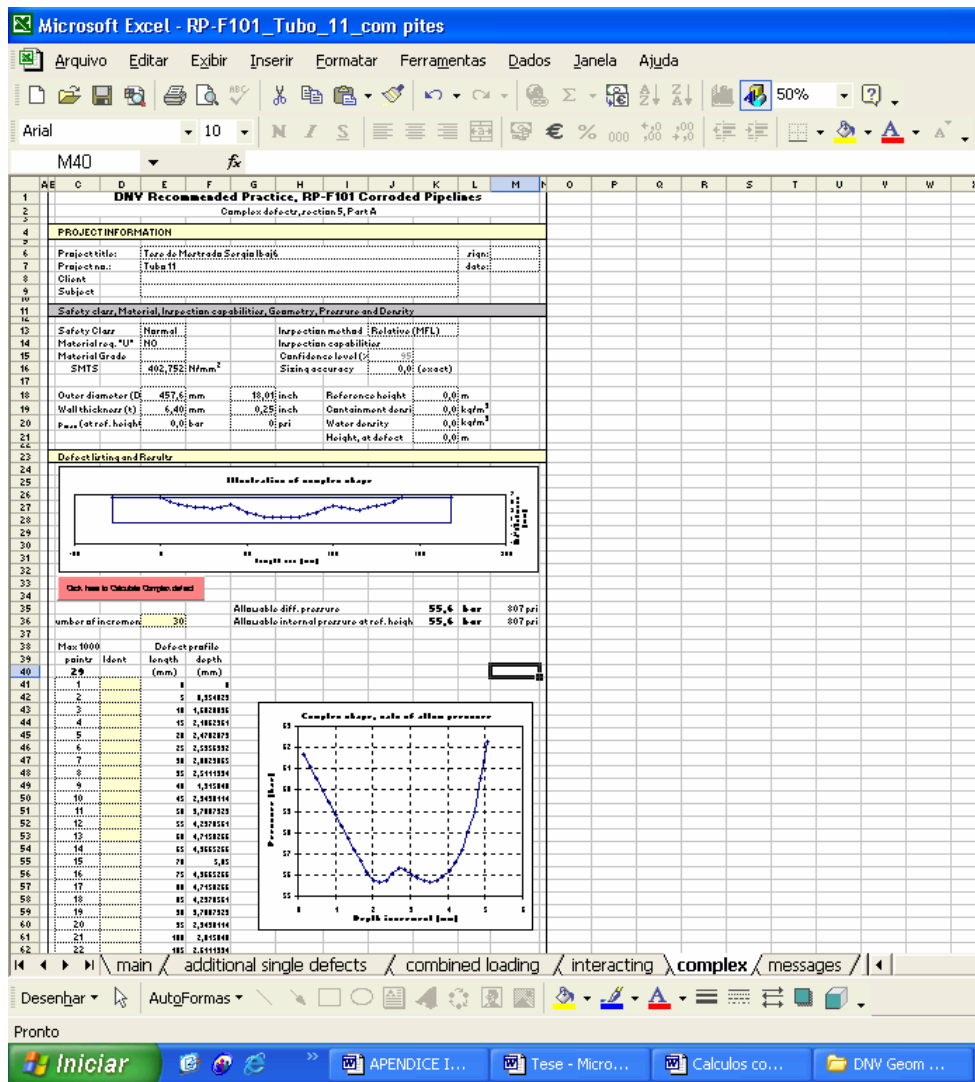


## APÊNDICE D – Telas dos Programas RSTRENG e DNV-RP-F101

### RSTRENG



**DNV-RP-F101**



## APÊNDICE E – Análise das Superfícies de Fratura dos CPs de Ensaio Charpy com auxílio do MEV

Foram realizadas análises das superfícies de fratura de alguns CPs com o objetivo de gerar subsídios para a compreensão do comportamento mecânico dos espécimes tubulares.

As análises foram realizadas com auxílio do microscópio eletrônico de varredura (MEV). Em algumas fraturas de característica dútil foram observadas microcavidades com inclusões não metálicas provavelmente refletindo as características do processo de refino de aços C-Mn da década de 60.

A Tabela abaixo apresenta as amostras escolhidas para a realização das análises no MEV.

| Amostra | ET | Temp [°C] | Local Entalhe | Característica Macroscópica                         |
|---------|----|-----------|---------------|-----------------------------------------------------|
| 1       | 15 | -20       | MB            | 100% frágil e brilhante.                            |
| 2       | 13 | -20       | MB            | Maior deformação plástica que a anterior.           |
| 3       | 14 | +20       | MB            | Maior % de área dútil.                              |
| 4       | 15 | -20       | CS            | Maior área dútil oposta ao entalhe.                 |
| 5       | 14 | +20       | CS            | Formato Taça-cone bastante dútil.                   |
| 6       | 11 | 0         | LF+1mm        | Formato Taça-cone com grande deformação lateral.    |
| 7       | 14 | 0         | LF+3mm        | Pouca deformação lateral e separações.              |
| 8       | 16 | 0         | LF+5mm        | Aproximadamente 50% de área frágil no centro do CP. |

Tabela E-1 – Características das amostras selecionadas para análise no MEV

Legendas: MB – metal base; CS – cordão de solda; LF+ x mm – x mm afastado da linha de fusão (x=1, 3 ou 5)

Nos ETS 13 e 15 foi observada fratura frágil concentrada no centro, com área compreendendo de 50 a 100% da superfície de fratura, nos CPs analisados com entalhes no MB e ensaiados a  $-20^{\circ}\text{C}$ . A faixa lateral dútil, medida com auxílio do MEV, teve largura variando de 80 a 800  $\mu\text{m}$ .

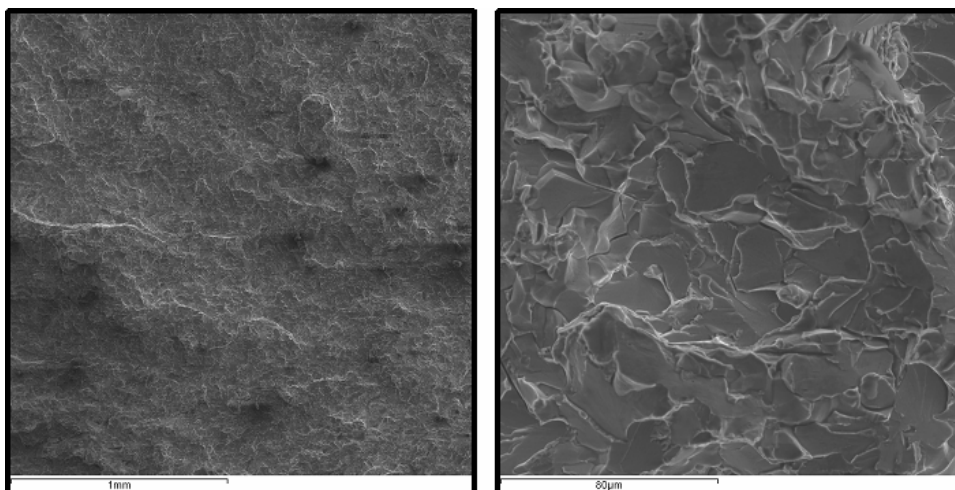


Figura E-1 – Regiões de clivagem (ET 15;  $-20^{\circ}\text{C}$ ; MB) – Aumentos 40X e 500X.

Na amostra 2, que apresentou maiores valores de energia absorvida em relação à amostra 1, foram observadas raias coincidentes com a direção de laminação e propagação da trinca. Estas raias são denominadas de separações (“*splits*” ou “*delaminations*”). A baixa tenacidade no sentido da espessura é a principal causa destas separações e pode ser causada pela presença de inclusões alongadas, segregações nos contornos de grãos, ou pela grande incidência de planos  $\{100\}$  de alta tendência à clivagem [56].



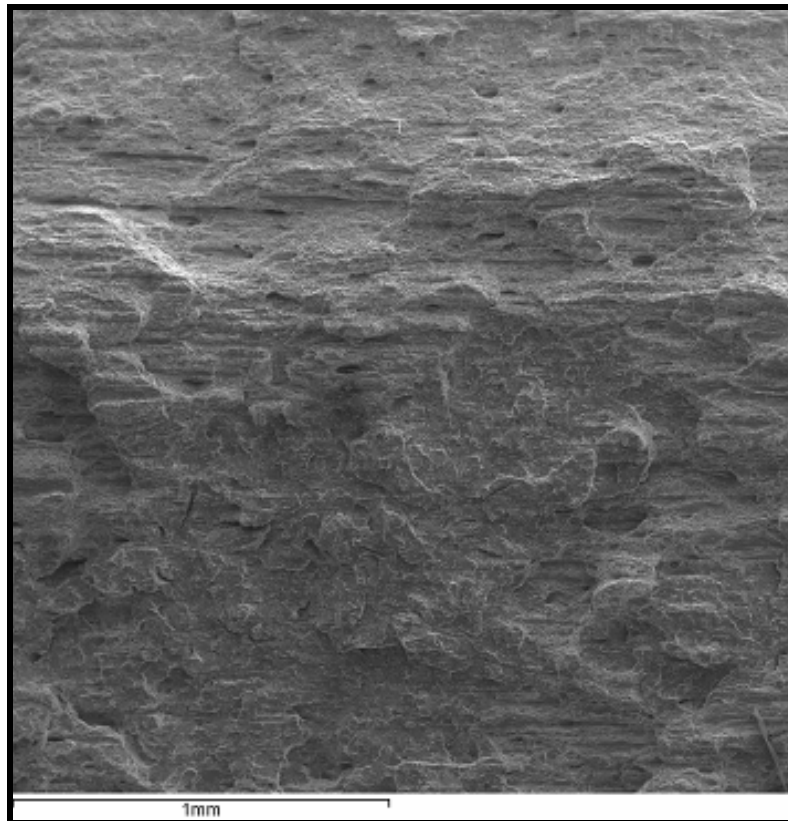


Figura E-2 – Parcela da fratura de característica dútil mostrando as cavidades e raias de rasgamento (ET 13;  $-20^{\circ}\text{C}$ ; MB)

Foi possível detectar uma inclusão de MnS na região dútil da fratura da amostra 2. Esta análise foi executada via espectrômetro dispersivo de energia (EDS). Na visualização da superfície de fratura é possível identificar diversas cavidades similares àquela onde se detectou a inclusão.

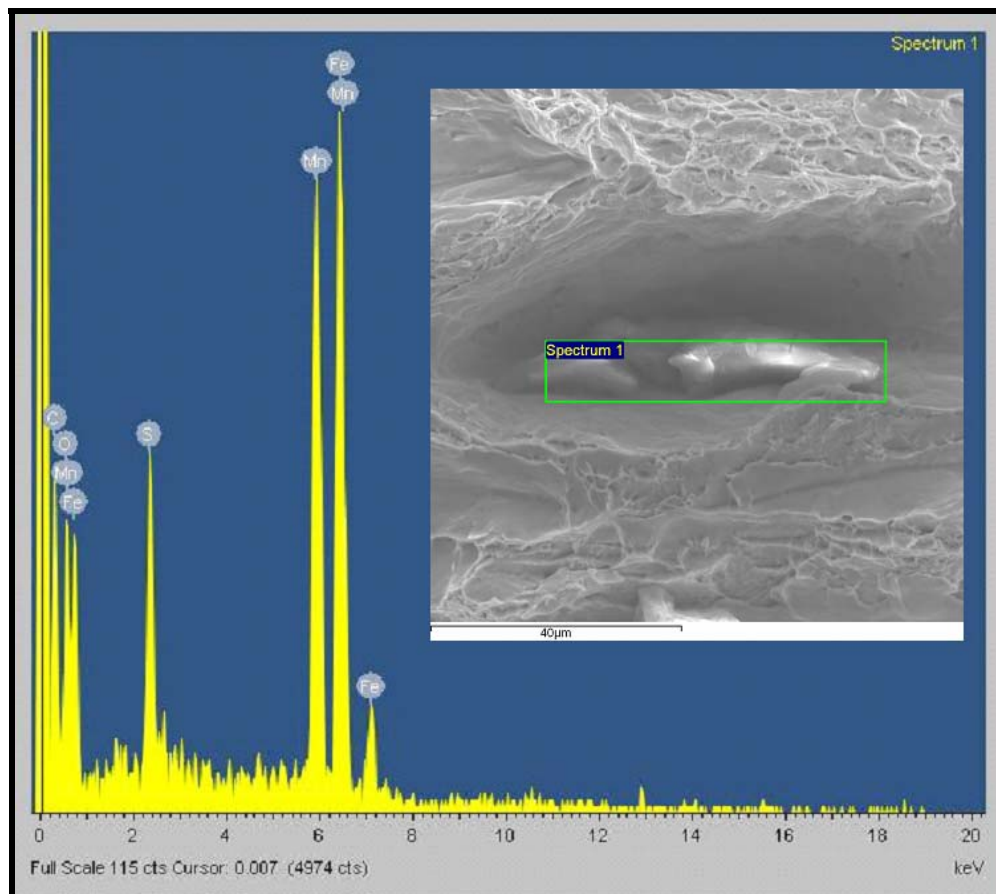


Figura E-3 – Inclusão de Mns observada na área dútil do CP (ET 13; -20°C; MB)

Os CPs com entalhe no MB ensaiados à temperatura ambiente apresentaram quase que 100% dútil com pequenas regiões de clivagem na superfície da fratura. As microcavidades apresentaram certo alinhamento segundo a direção de laminação formando um aspecto macroscópico das separações mencionadas anteriormente. Foram observadas inclusões e cavidades nas superfícies das fraturas típicas da presença de inclusões.

Foi observada a presença de inclusão de oxido em CP com entalhe coincidente com o cordão de solda. Uma possível origem desta inclusão seria a oxidação da poça de fusão durante a soldagem do passe interno. A origem desta inclusão do processo de solidificação do MB seria descartada pela ausência de alumínio na composição do aço.

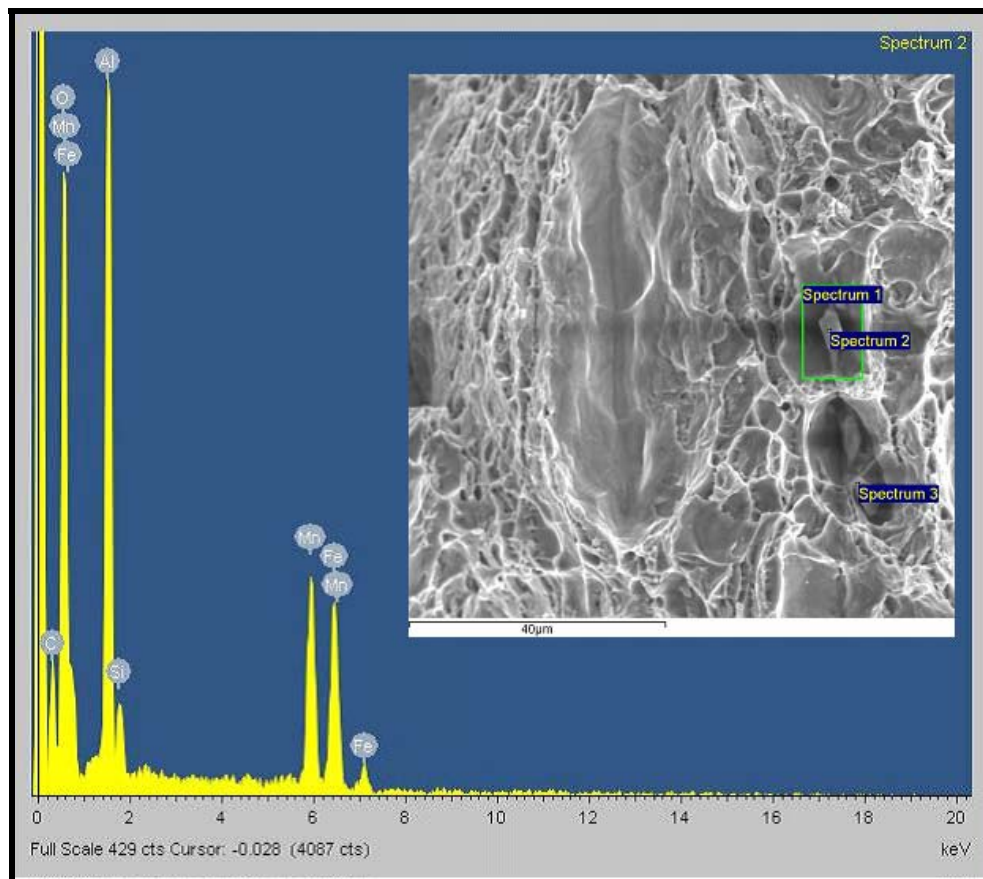


Figura E-4 – Inclusão de óxidos ( $\text{MnO-SiO}_2$ ) caracterizada pela análise EDS. (ET 14; +20°C; CS)

Também foram encontradas inclusões se MnS em CP ensaiado a temperatura ambiente (ET 14) com entalhe no MB, conforme mostrado na Figura E-5.

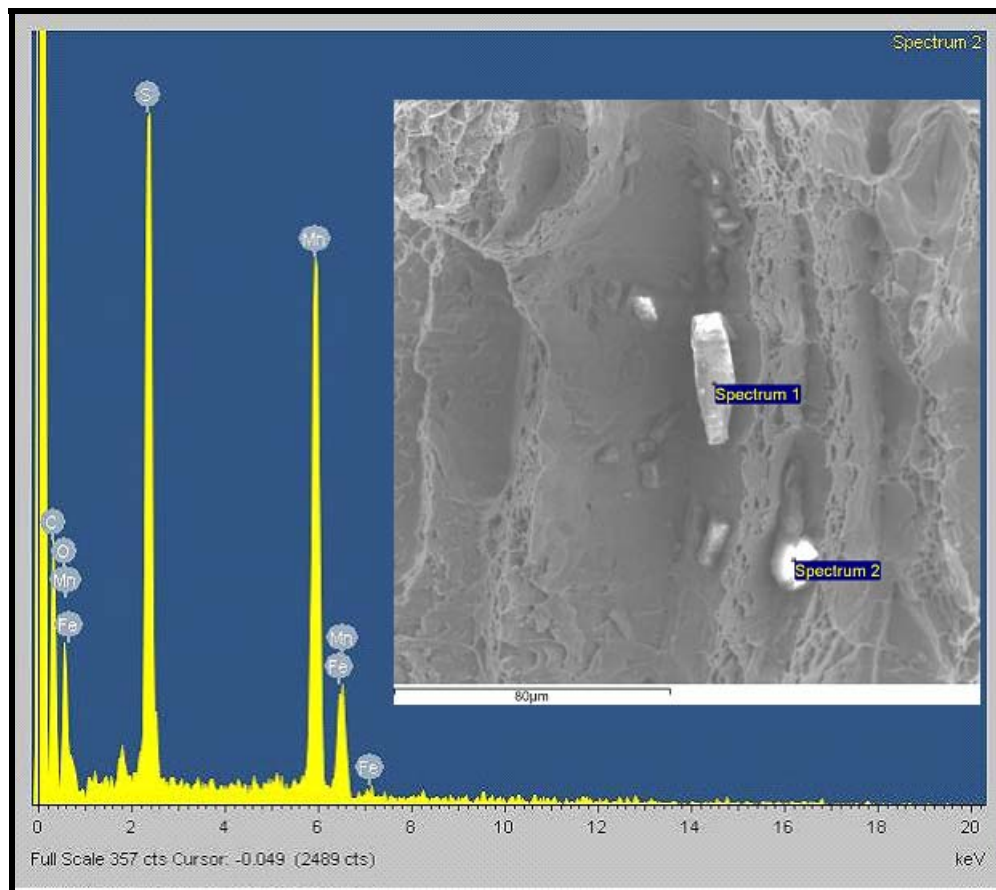


Figura E-5 – Inclusão de óxidos ( $\text{MnO-SiO}_2$ ) e sulfetos ( $\text{MnS}$ ) caracterizada pela análise EDS. (ET 14; +20°C; CS)

Em uma amostra ensaiada a  $-20^\circ\text{C}$  foi obtido percentual da área frágil estimado em 70%, porém mesmo nestas amostras pode-se verificar pequenas regiões de microcavidades dispersas pela superfície frágil da fratura, conforme mostrado na Figura a E-6.

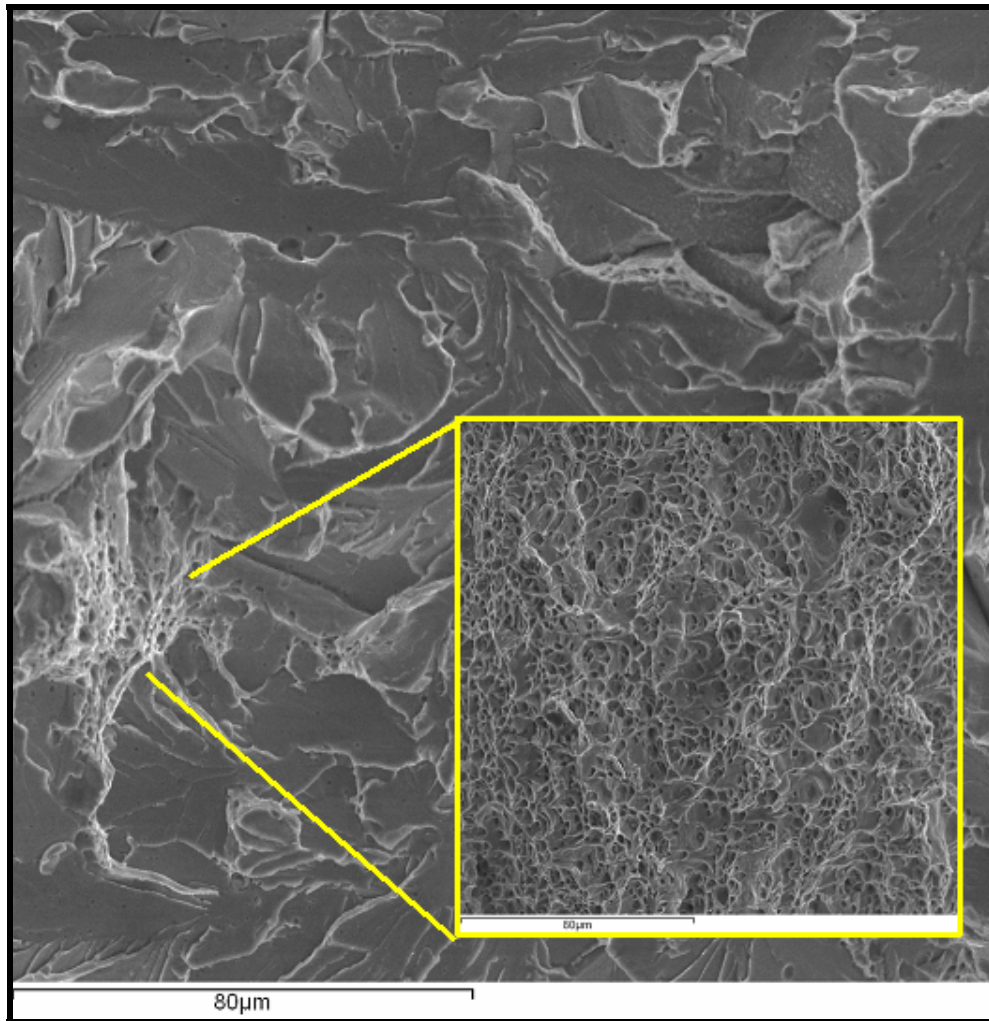


Figura E-6 – Pequena área dútil (microcavidades) em destaque circundada por uma grande região predominante de clivagem. (ET 15;  $-20^{\circ}\text{C}$ ; CS)

Na amostra 5 com entalhe no CS e ensaiada à temperatura ambiente foi possível se obter uma fratura dútil quase que 100% e ainda se verificar a presença de inclusões de óxidos de Mn e Si. Nesta amostra não se verificaram as raias associadas a microcavidades conforme àquelas fraturas com entalhe no MB.

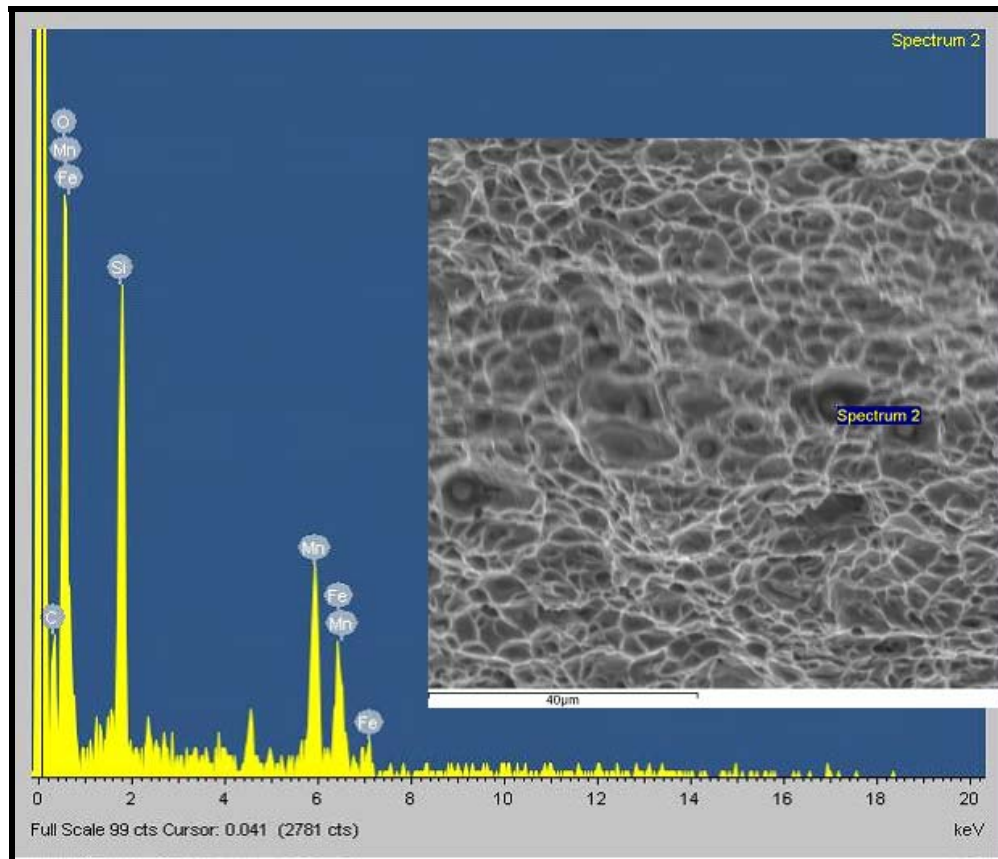


Figura E-7 – Inclusão de óxidos (MnO–SiO<sub>2</sub>) caracterizada pela análise EDS. (ET 14; 20°C; CS)

Nesta ultima amostra (ET 16) ensaiado a 0 °C com entalhe posicionado a 5 mm da linha de fusão foi possível se obter uma fratura mista. Na Figura E-8 se observa os planos de clivagem adjacentes as microcavidades.



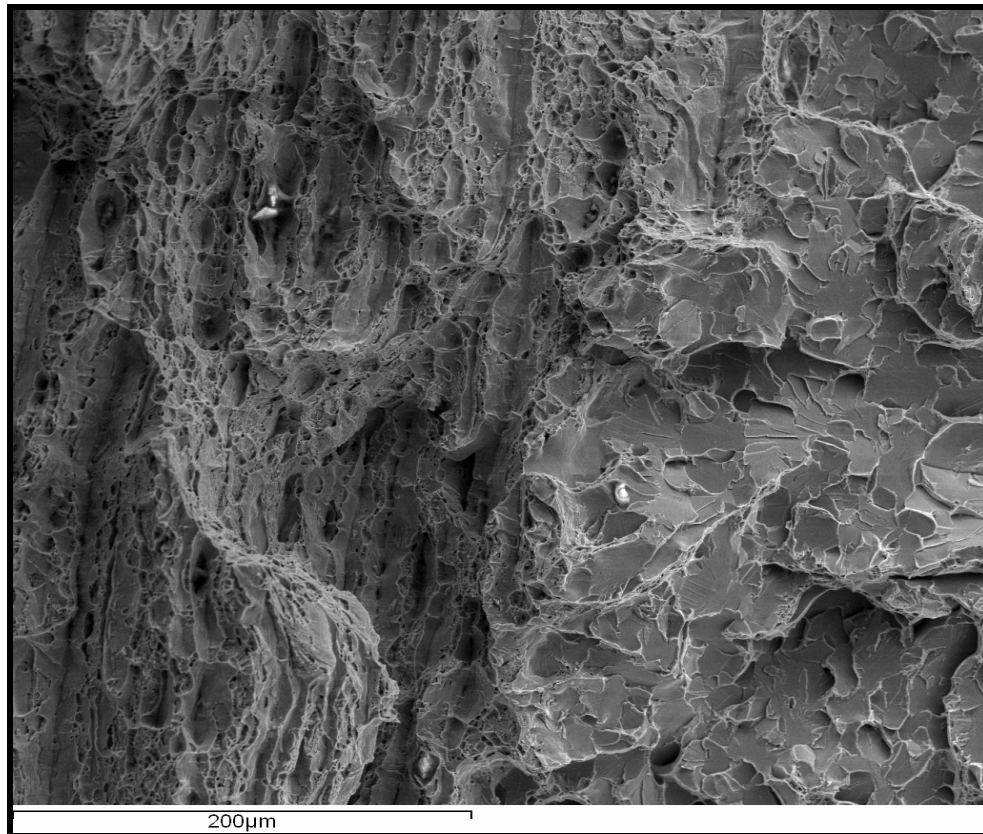


Figura E-8 – Planos de clivagem associados a microcavidades (ET 16; 0°C; LF+5mm)

Pode-se verificar que mesmo nos CPs que apresentaram a maior parte da superfície de fratura de características frágeis, foram observadas pequenas áreas dispersas de microcavidades. Da mesma forma pode-se verificar pequenas áreas de clivagem em amostras ensaiadas na temperatura ambiente que apresentaram superfície praticamente 100% dútil.

A temperatura de transição dos aços é certamente superior a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  e inferior a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

As fraturas, quando de característica dútil, foram provavelmente assistidas pela presença de inclusões alongadas de MnS e óxidos (Al, Mn, Si) que tiveram uma contribuição na diminuição da resistência dos espécimes ensaiados.

## **APÊNDICE F – Análise das Superfícies de Fratura do ET 14 com auxílio do MEV**

A análise macroscópica da fratura visualizada após o teste de pressão indicava o seu caráter dútil. A amostra foi preservada e pintada para se realçar a presença dos alvéolos. Posteriormente, decidiu-se examinar as superfícies de fratura com auxílio do MEV. Apesar da limpeza com solventes e acetona com auxílio de ultra-som não foi possível obter uma superfície isenta de óxidos e material orgânico para se fazer uma análise fractográfica comparável com as análises do APÊNDICE E. De qualquer forma, foi possível identificar pontos relativamente isentos de onde foram feitas as análises.

Ainda avaliando o aspecto macroscópico da fratura, observa-se nas regiões D e E uma superfície formando um ângulo de 45° com uma elevada estricção (Figura F-1). Também é visível nas regiões C e E (adjacentes) uma região de rasgamento também típica do mecanismo dútil.

Na intenção de se encaminhar a amostra para o MEV foi feita uma divisão da fratura identificando-se as regiões conforme demonstrado na Figura F-1.





Figura F-1 – Visualização dos segmentos da fratura a serem analisados no MEV

As amostras apresentaram as superfícies de fratura com marcas radiais coincidentes com a direção de laminação. Nas amostras A1, B1 e B2 puderam ser visualizadas estas “raias” que estão associada ao bandejamento observado na microestrutura e à baixa espessura remanescente no local da falha.

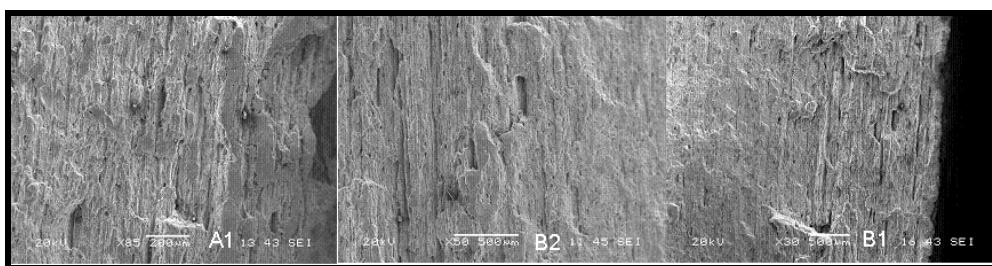


Figura F-2 – Visualização do bandejamento das amostras A1, B2 e B1

A ruptura teve início na região A que é o ponto de menor espessura. Nesta região foi possível visualizar áreas de microcavidades características de fratura dútil.

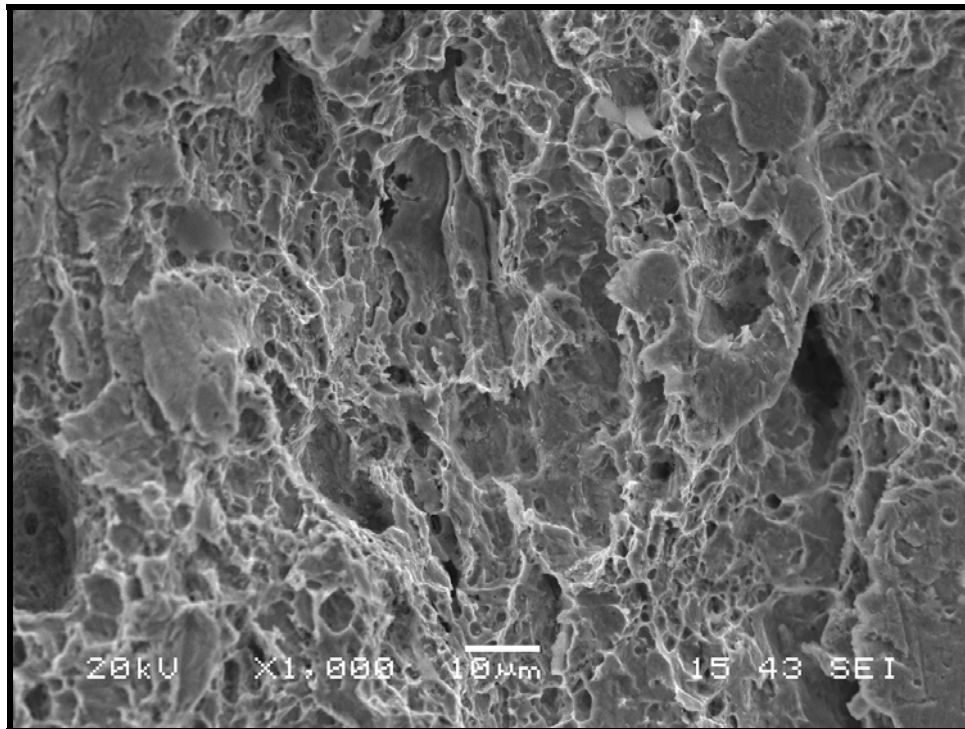


Figura F-3 – Visualização do aspecto dútil da fratura (microcavidades) no ponto de iniciação – região A1.

Também foi observado um aspecto de fratura dútil com microcavidades na amostra A1 em um local mais afastado (na direção longitudinal) do ponto de iniciação da fratura.

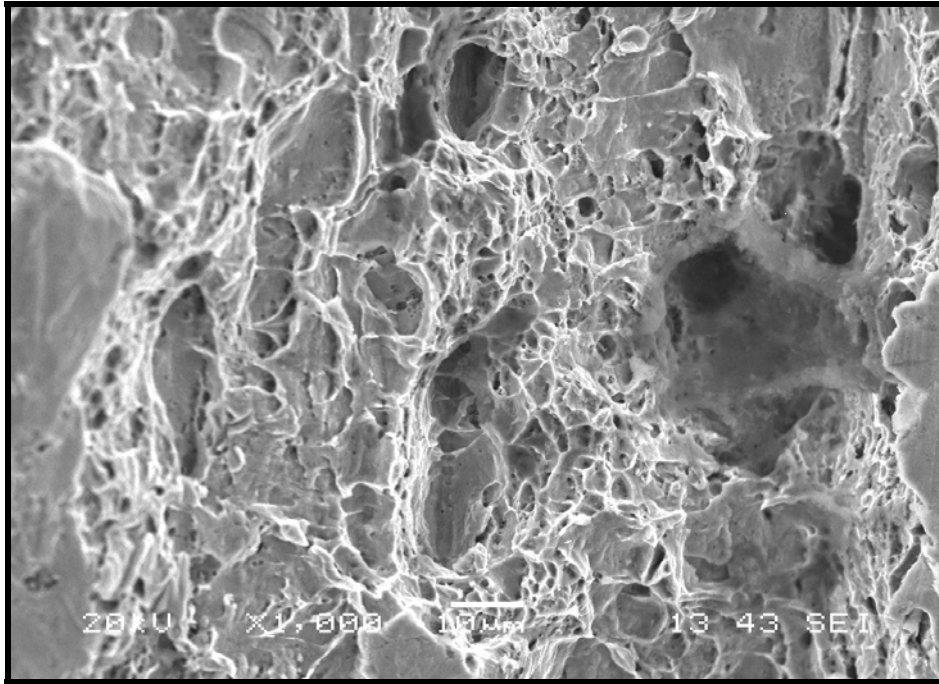


Figura F-4 – Visualização do aspecto dútil da fratura (microcavidades) afastado do ponto de iniciação – região A1.

Apesar das dificuldades de preparação das superfícies de fratura para análise no MEV, foi possível confirmar o mecanismo por nucleação e crescimento de microcavidades, típico de fratura dútil em aços C-Mn.

## APÊNDICE G – Equações dos Métodos de Avaliação da Resistência Remanescente de Dutos Corroídos

### G.1 – Métodos de Nível 1

1. A equação da NG-18 é originária da maioria dos métodos semiempíricos.

$$\bullet \quad \sigma_{rup} = \sigma_{flow} \cdot \left[ \frac{1 - A/A_0}{1 - \left( A/A_0 \right) \cdot M^{-1}} \right], \text{ onde}$$

$\sigma_{rup}$  – Tensão circunferencial da parede do duto corroído no instante da ruptura, numa região fora do defeito.

$\sigma_{flow}$  – Tensão de escoamento média do material (flow stress)

$A$  – Área longitudinal de material perdido

$A_0$  – Área original da região corroída

$M$  – Fator de dilatação<sup>xxxvi</sup> (*bulging factor* ou *Folias factor*) é expresso por:

$$M = \left[ 1 + 0,6275 \cdot \frac{L^2}{Dt} - 0,003375 \cdot \left( \frac{L^2}{Dt} \right)^2 \right]^{1/2}, \text{ onde}$$

$L$  – projeção longitudinal do defeito

$D$  – Diâmetro Externo do tubo

$t$  – espessura nominal do tubo

---

<sup>xxxvi</sup> O fator de dilatação foi inserido para contabilizar as tensões induzidas pelo

2. A equação da ASME B31G está expressa para a Pressão de Ruptura, conforme a seguir;

- $P_{rup} = 1,1 \cdot \sigma_y \cdot \frac{2t}{D} \cdot \left[ \frac{1 - (2/3) \cdot (d/t)}{1 - (2/3) \cdot (d/t) \cdot M^{-1}} \right]$ , onde
- $M = \left[ 1 + 0,8 \cdot \frac{L^2}{Dt} \right]^{1/2}$  para defeitos aproximados pela geometria parabólica, denominados também de curtos, onde  $L \leq \sqrt{20Dt}$ , ou
- $P_{rup} = 1,1 \cdot \sigma_y \cdot \frac{2t}{D} \cdot \left[ 1 - \frac{d}{t} \right]$  para defeitos grandes praticamente retangulares, denominados também de longos, onde  $L > \sqrt{20Dt}$ .

Obs.:  $\sigma_y$  – Tensão de escoamento utilizada nos cálculos.

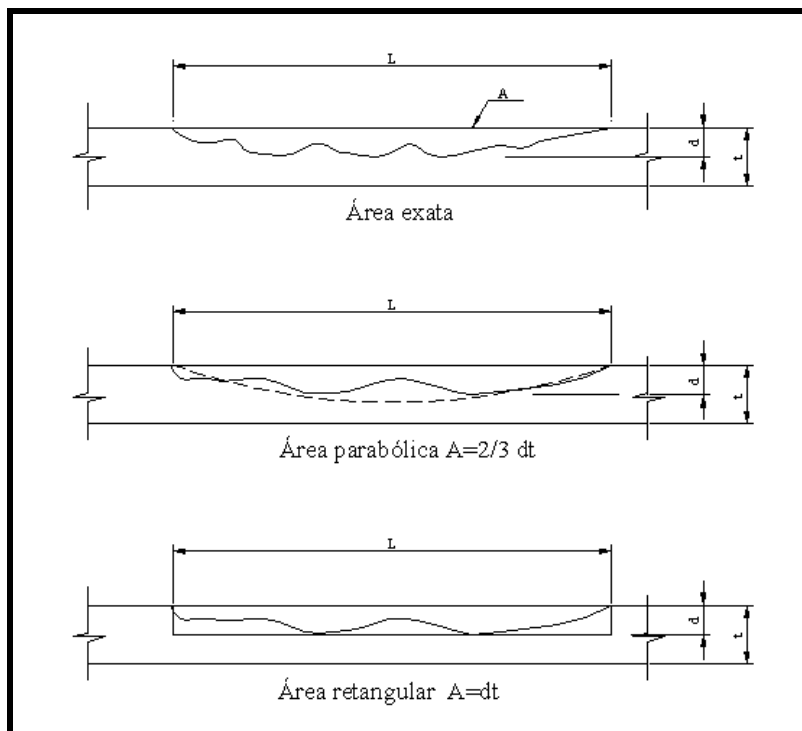


Figura G-1 – Representação da área longitudinal perdida por meio de uma área parabólica e retangular.

efeito de bolha (*bulging*) que ocorre no local do defeito de um tubo pressurizado.

3. O método da 085dL possui apenas uma equação variando o Fator de dilatação para defeitos parabólicos ou retangulares.

- $P_{rup} = (\sigma_y + 69) \cdot \frac{2t}{D} \cdot \left[ \frac{1 - 0,85 \cdot (d/t)}{1 - 0,85 \cdot (d/t) \cdot M^{-1}} \right]$ , para  $\sigma_y \leq 65ksi$ , ou
- $P_{rup} = (\sigma_y + \sigma_u) \cdot \frac{t}{D} \cdot \left[ \frac{1 - 0,85 \cdot (d/t)}{1 - 0,85 \cdot (d/t) \cdot M^{-1}} \right]$ , para  $\sigma_y > 65ksi$ , onde
- $M = \left[ 1 + 0,6275 \cdot \frac{L^2}{Dt} - 0,003375 \cdot \left( \frac{L^2}{Dt} \right)^2 \right]^{1/2}$  para defeitos onde  $L \leq \sqrt{50Dt}$  e
- $M = 3,3 + 0,032 \left( \frac{L^2}{Dt} \right)$  para defeitos onde  $L > \sqrt{50Dt}$ .

Obs.:  $\sigma_y$ ,  $\sigma_u$  e  $P_{rup}$  expressos em MPa.

4. Na equação do método RPA a Pressão de Ruptura está expressa conforme a seguir;

- $P_{rup} = (\sigma_y + 69) \cdot \frac{2t}{D} \cdot \left[ \frac{1 - 0,85 \cdot (d/t)}{1 - 0,85 \cdot (d/t) \cdot M^{-1}} \right]$ , para  $\sigma_y \leq 65ksi$ , ou
- $P_{rup} = (\sigma_y + \sigma_u) \cdot \frac{t}{D} \cdot \left[ \frac{1 - 0,85 \cdot (d/t)}{1 - 0,85 \cdot (d/t) \cdot M^{-1}} \right]$ , para  $\sigma_y > 65ksi$ , onde
- $M = \left[ 1 + 0,6275 \cdot \frac{L^2}{Dt} - 0,003375 \cdot \left( \frac{L^2}{Dt} \right)^2 \right]^{1/2}$  para defeitos onde  $L \leq \sqrt{20Dt}$  e
- $P_{rup} = (\sigma_y + 69) \cdot \frac{2t}{D} \cdot \left[ \frac{1 - \alpha \cdot (d/t)}{1 - \alpha \cdot (d/t) \cdot M^{-1}} \right]$ , para  $\sigma_y \leq 65ksi$ , ou
- $P_{rup} = (\sigma_y + \sigma_u) \cdot \frac{t}{D} \cdot \left[ \frac{1 - \alpha \cdot (d/t)}{1 - \alpha \cdot (d/t) \cdot M^{-1}} \right]$ , para  $\sigma_y > 65ksi$  onde
- $\alpha = 1 - 0,15 \cdot \frac{(64 \times 10^6)}{\left( \frac{L^2}{Dt} \right)^6}$  e  $M = 2,1 + 0,07 \cdot \frac{L^2}{Dt}$  para defeitos onde  $L > \sqrt{20Dt}$

5. Na equação do método da DNV a Pressão de Ruptura está expressa para defeitos isolados conforme a seguir;

$$\bullet \quad P_{rup} = \sigma_u \cdot \frac{2t}{(D-t)} \cdot \left[ \frac{1-(d/t)}{1-(d/t) \cdot M^{-1}} \right] \text{ onde } M = \left[ 1 + 0,31 \cdot \frac{L^2}{Dt} \right]^{1/2}$$

Obs.:  $\sigma_u$  é tensão de resistência utilizada nos cálculos

## G.2 – Métodos de Nível 2

### 1. Método iterativo da *Effective Area*

Este método se baseia em definir diversos comprimentos de defeitos  $(L_1, L_2, \dots, L_n)$ , no interior do defeito total de comprimento  $L$ , conforme ilustrado na Figura G-2. Com base nestes comprimentos denominados  $L_{efetivo}$  obtém-se varias relações  $\frac{A_{efetivo}}{A_0}$ . Ou seja, busca-se qual o segmento do defeito que mais contribui para a redução da  $P_{rup}$ . Para cada  $L_{efetivo}$  é associada uma  $A_0$  que é dada por  $A_0 = L_{efetivo} \cdot t$ , onde  $t$  é a espessura de parede do duto.

A pressão de ruptura do defeito de comprimento  $L$  é a menor das pressões calculadas.

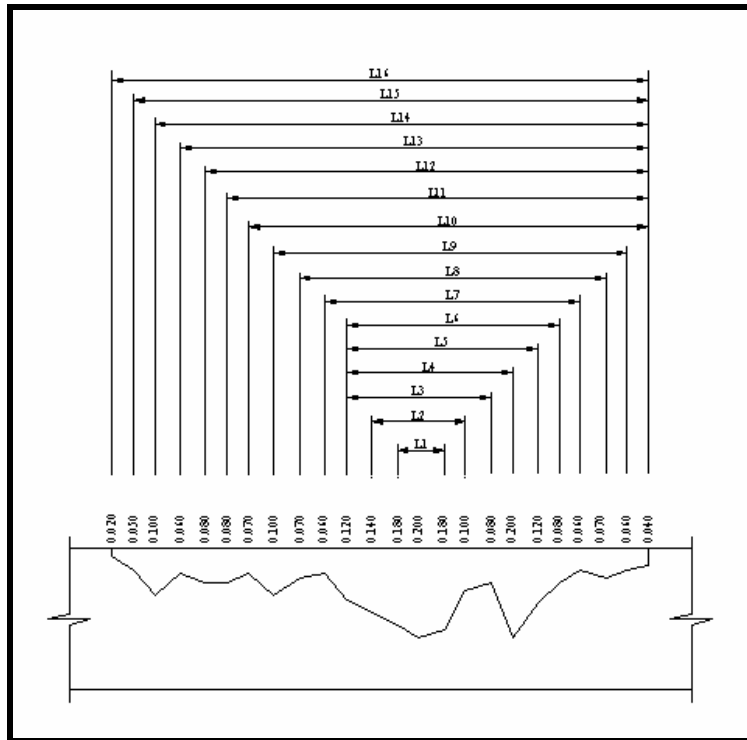


Figura G-2 – Detalhe dos comprimentos para o cálculo pelo método “*Effective Area*”.

Fonte: KIEFNER, J.F. e VIETH, P.H., “Modified criterion for evaluating the remaining strength of corroded pipe”

Neste método, a tensão média de escoamento  $\sigma_{flow}$ , o fator de dilatação  $M$  e a pressão de ruptura são calculados da seguinte forma:

- O valor da tensão de escoamento média é dada por  $\sigma_{flow} = \sigma_y + 69MPa$
- O defeito é classificado como curto se  $L \leq \sqrt{50Dt}$  e longo se  $L > \sqrt{50Dt}$ .
- $$M = \left[ 1 + 0,6275 \cdot \left( \frac{L_{efetivo}^2}{Dt} \right) - 0,003375 \cdot \left( \frac{L_{efetivo}^2}{Dt} \right)^2 \right]^{1/2}$$
 para defeitos curtos
- $$M = 3,3 + 0,032 \cdot \left( \frac{L_{efetivo}^2}{Dt} \right)$$
 para defeitos longos.
- A pressão de ruptura é determinada pela seguinte expressão:



$$P_{rup} = (\sigma_y + 69) \cdot \frac{2t}{D} \cdot \left[ \frac{1 - A_{efetiva}/A_0}{1 - \left( A_{efetiva}/A_0 \right) \cdot M^{-1}} \right]$$

A planilha eletrônica RSTRENG automatiza os cálculos.

## 2. Método iterativo da DNV Geometria Complexa

O princípio básico deste método é determinar se o defeito se comporta como um irregular “patch” ou se os “pits” localizados dentro de um “patch” dominam a falha. Interações potenciais entre pits também tem que ser consideradas.

Este método realiza uma progressiva análise em função da profundidade, onde a corrosão é dividida em um número de incrementos baseados na profundidade( $d_j$ ). Em cada incremento de profundidade, o defeito de corrosão é modelado de forma a ser representado por um “patch” contendo um número de “pits”. A Figura G-3 define bem o que é uma área de “patch” e uma área de “pit”.

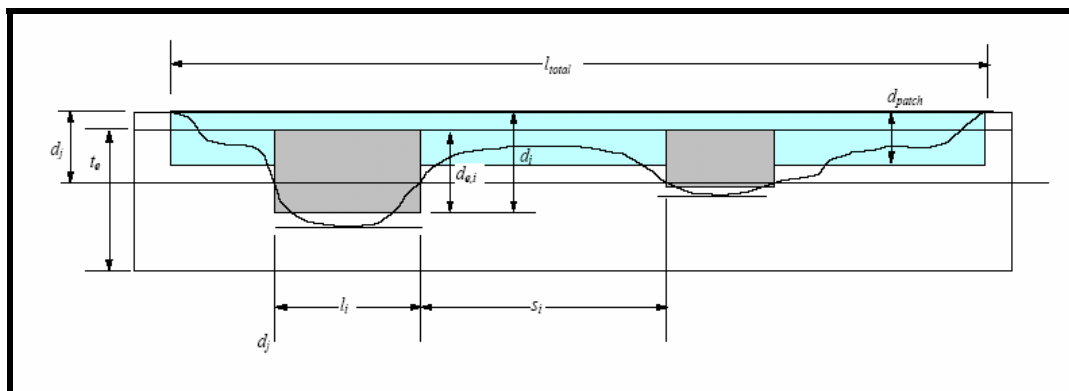


Figura G-3 – Subdivisão de um defeito de geometria complexa em “patch” e “pits”.

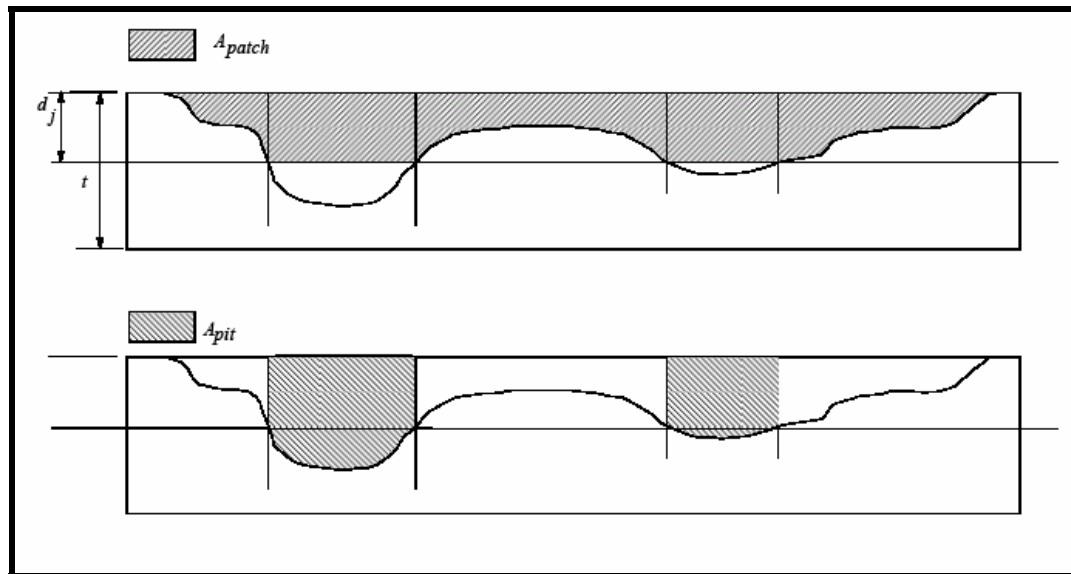


Figura G-4 – Definição da área de patch ( $A_{patch}$ ) e área de pit ( $A_{pit}$ ) para subdivisão de uma geometria complexa em “patch” e “pits” idealizados.

Fonte: Norma DNV-RP-F101

Possíveis interações entre “pits” são também consideradas nas avaliações, conforme ilustrado na figura G-4.

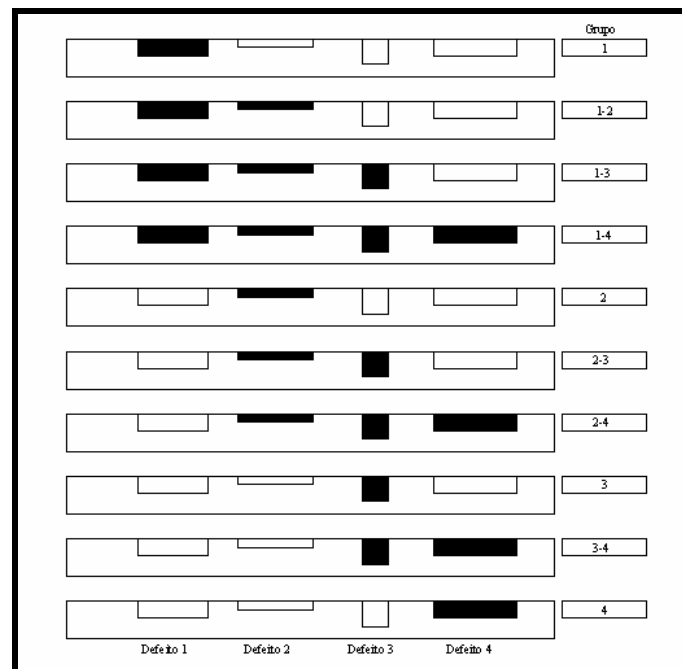


Figura G-5 – Exemplo de agrupamento de defeitos adjacentes para interação.

Fonte: Norma DNV-RP-F101

O cálculo da pressão de ruptura estimada pelo método DNV RP-F101 (complexo) é calculado seguindo o seguinte procedimento:

**Passo 1** - Calcular a profundidade média do defeito  $d_{ave} = \frac{A}{L_{total}}$ , onde

$A$  é a área longitudinal perdida, conforme Figura G-4 e  $L_{total}$  é o comprimento total do defeito.

**Passo 2** – Calcular a pressão de ruptura  $P_{total}$  considerando todo o comprimento do defeito  $L_{total}$  usando  $d_{ave}$  e a equação para defeito isolado.

$$P_{total} = \frac{2t \cdot \sigma_u \cdot (1 - d_{ave}/t)}{(D-t) \cdot \left(1 - \frac{d_{ave}}{t \cdot Q_{total}}\right)}, \text{ onde } Q_{total} = \left[1 + 0,31 \left(\frac{L_{total}^2}{Dt}\right)\right]^{1/2}$$

Obs.:  $\sigma_u$  é tensão de resistência utilizada nos cálculos

**Passo 3** – Dividir a profundidade máxima do defeito em incrementos  $d_j$  conforme figura G-3. O número ideal de incrementos varia de 10 a 50.

**Passo 4** – Calcular a profundidade média dos “patch”, correspondente ao incremento  $d_j$ , através da expressão  $d_{patch} = \frac{A_{patch}}{L_{total}}$

**Passo 5** – Calcular a pressão de ruptura para o “patch”  $P_{patch}$  relativo ao incremento  $d_j$ , usando  $L_{total}$  e  $d_{patch}$  na equação para defeitos isolados.

$$P_{patch} = \frac{2t \cdot \sigma_u \cdot (1 - (d_{patch}/t))}{(D-t) \cdot \left(1 - \left(\frac{d_{patch}}{t \cdot Q_{total}}\right)\right)}$$

**Passo 6** - Para cada “pit”, calcular a área perdida em relação à espessura nominal (Figura G-4), para o incremento correspondente. Estimar a profundidade

média de cada “pit”, considerando o seu comprimento  $l_i$ .

$$d_i = \frac{A_{i,pit}}{l_i}, \quad i=1,2,\dots,n$$

**Passo 7** – Estimar a espessura efetiva  $t_e$  de um duto equivalente com a mesma pressão de ruptura do “patch”  $P_{patch}$ , como calculado no Passo 5.

$$t_e = \frac{P_{patch} \cdot D}{2 \cdot (1,09 \cdot \sigma_u) + P_{patch}}$$

**Passo 8** – Corrigir a profundidade média de cada “pit” para a espessura efetiva  $t_e$ , conforme Figura G-3.

$$d_{e,i} = d_i - (t - t_e)$$

**Passo 9** – Calcular a pressão de ruptura de todos os “pits”, individualmente,  $(P_1, P_2, \dots, P_n)$ , como defeitos isolados, usando a profundidade média corrigida  $d_{e,i}$  e o comprimento  $l_i$  de cada “pit”.

$$P_i = \frac{2 \cdot t_e \cdot \sigma_u \cdot \left(1 - \frac{d_{e,i}}{t_e}\right)}{(D - t_e) \cdot \left(1 - \frac{d_{e,i}}{t_e \cdot Q_i}\right)}, \quad \text{onde } Q_i = \left[1 + 0,31 \left(\frac{l_i^2}{D t_e}\right)\right]^{1/2}$$

**Passo 10** – Calcular os comprimentos de todas as combinações de defeitos  $l_{nm}$ , conforme apresentado como na Figura G-6. O comprimento total do defeito de cada grupo equivale ao somatório dos comprimentos levantados individualmente mais as distâncias entre dois defeitos adjacentes.

$$l_{nm} = l_m + \sum_{i=n}^{m-1} (l_i + s_i)$$

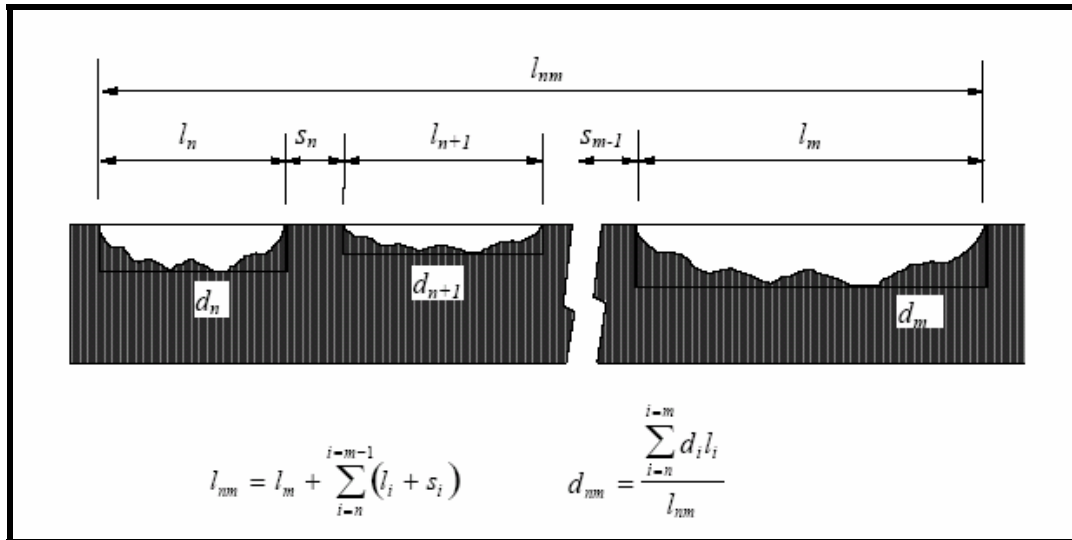


Figura G-6 – Combinação de defeitos em interação.

**Passo 11** – Calcular a profundidade efetiva de cada defeito combinado

$$d_{e,nm} = \frac{\sum_{i=n}^m d_i l_i}{l_{nm}}.$$

**Passo 12** – Calcular a pressão de ruptura para cada defeito combinado

$$P_{nm}.$$

$$P_{nm} = \frac{2 \cdot t_e \cdot \sigma_u \cdot \left(1 - \frac{d_{e,nm}}{t_e}\right)}{(D - t_e) \cdot \left(1 - \frac{d_{e,nm}}{t_e \cdot Q_{nm}}\right)},$$

$$\text{onde } Q_{nm} = \left[1 + 0,31 \cdot \left(\frac{l_{nm}^2}{D \cdot t_e}\right)\right]^{1/2}$$

**Passo 13** – A pressão de ruptura para um incremento ( $d_j$ ) é tomada como a mínima de todas as pressões de ruptura calculadas anteriormente.

$$P_{rup} = \text{Mínimo}(P_1, P_2, \dots, P_n, P_{nm}, P_{patch}, P_{total})$$

**Passo 14** – Repetir todos os passos de 4 a 13 para um novo incremento  $d_j$ , até a profundidade máxima do defeito seja alcançada.

**Passo 15** – A pressão de ruptura do defeito de geometria complexa é o menor dos valores encontrados para todos os intervalos de profundidade.

A DNV disponibiliza uma planilha eletrônica que automatiza os cálculos.

## **APÊNDICE H– Estimativa de Tensões atuantes nos defeitos dos ETs retangulares com a influência dos alvéolos**

Neste APÊNDICE procurou-se avaliar as tensões atuantes na região dos defeitos decorrentes da pressurização do ET com auxílio do método dos elementos finitos.

### **Modelagem da seção transversal sem considerar a presença de alvéolos**

Para o defeito sem alvéolos, foram utilizados carregamentos divididos em 1000 passos e 10000 sub passos. O modelo divergiu para uma pressão de 5 MPa (51 kgf/cm<sup>2</sup>) com a plastificação de todo o ligamento.

A Figura H-1 mostra a distribuição de tensões com um carregamento de pressão interna de 30 kgf/cm<sup>2</sup> para grandes deslocamentos.

A distribuição das tensões indica a existência de dois efeitos similares: tração e flexão. Nos diversos pontos ao longo da metade da largura do defeito pode se observar a interação entre o momento fletor e a tensão trativa.

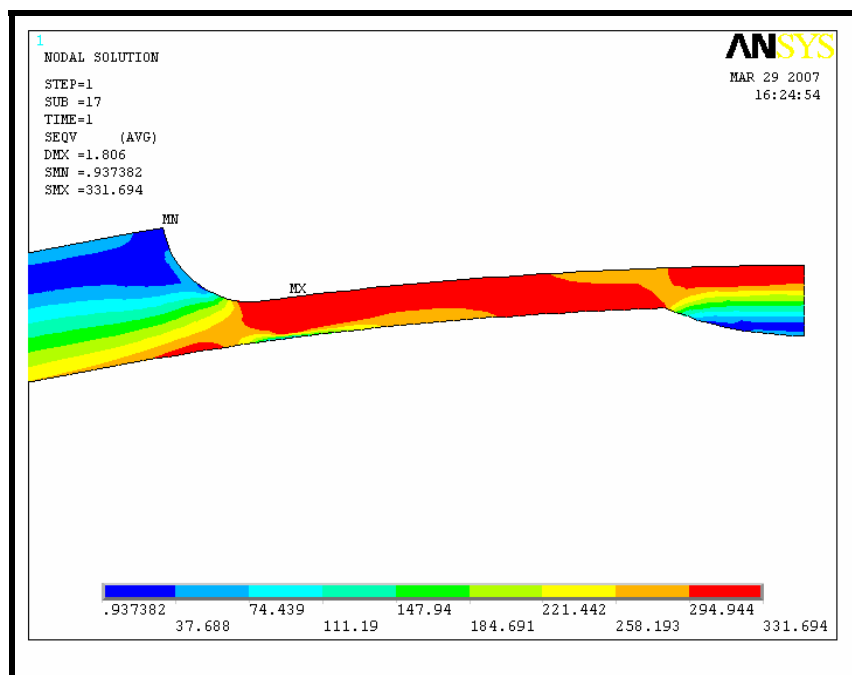


Figura H-1 – Simulação pelo MEF da seção transversal do defeito sem a influência de alvéolos

### Modelagem da seção transversal com 1 pite de corrosão interna

Na tentativa de avaliar a influência de um alvéolo de corrosão, foi feita uma retirada local de material com 0,5 mm de profundidade e 0,5 mm de largura e de comprimento infinito (estado plano de deformação), com refinamento local da malha (Figura H-2). Cabe ressaltar que foram medidos alvéolos internos de até 1 mm de profundidade no ET 16 (APÊNDICE C).

Observou-se que sob uma pressão interna de 41 kgf/cm<sup>2</sup> já ocorria elevada plastificação na região do alvéolo em todo o ligamento (região vermelha da Figura H-2). As Tensões Equivalentes (von Mises) mostradas para alguns pontos da seção onde ocorreu a falha alcançaram valores da ordem do Limite de Resistência à Tração verdadeira do material (573 MPa).



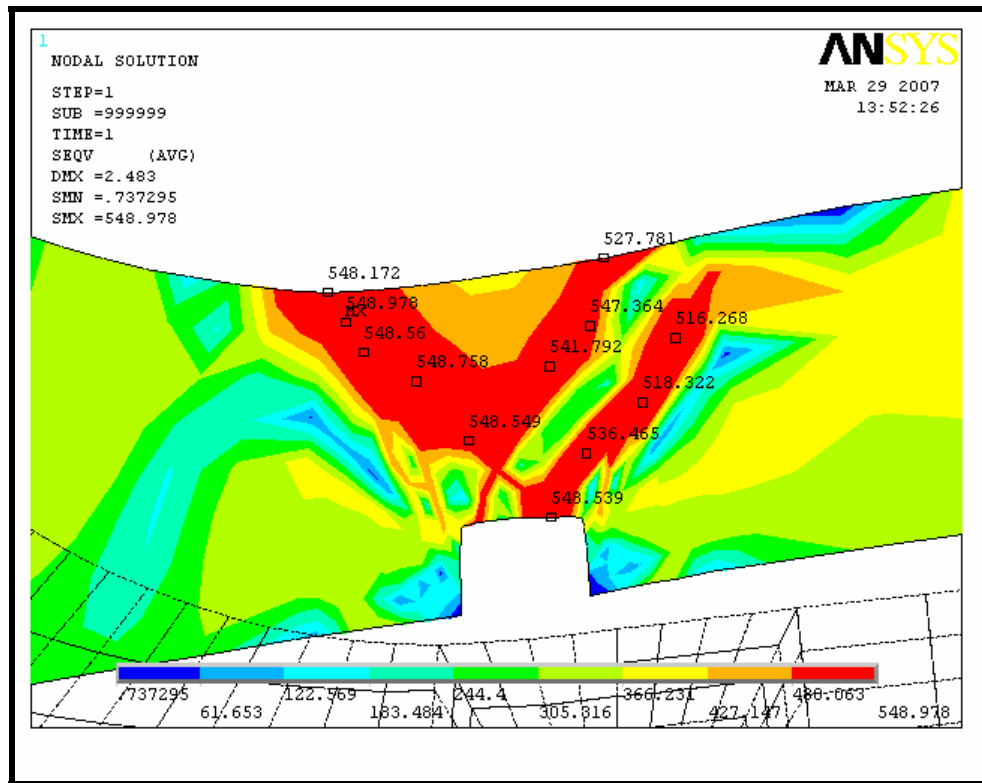


Figura H-2 – Plastificação do ligamento na presença de um alvéolo interno com tensão constante em toda a seção de aproximadamente 548 MPa para um carregamento de 41 kgf/cm<sup>2</sup> de pressão

### Modelagem da seção transversal para 3 pites de corrosão interna

Neste caso, para efeito de comparação, foram introduzidos na modelagem três alvéolos de corrosão com 0,5 mm de profundidade e 0,5 mm de largura e de comprimento infinito.

A distribuição dos valores de tensões é indica intensa plastificação nos ligamentos sob a pressão de 39 kgf/cm<sup>2</sup> conforme pode ser visualizado nas Figuras H-3. Cabe ressaltar que a pressão de ruptura medida no ensaio foi de 32 kgf/cm<sup>2</sup>.

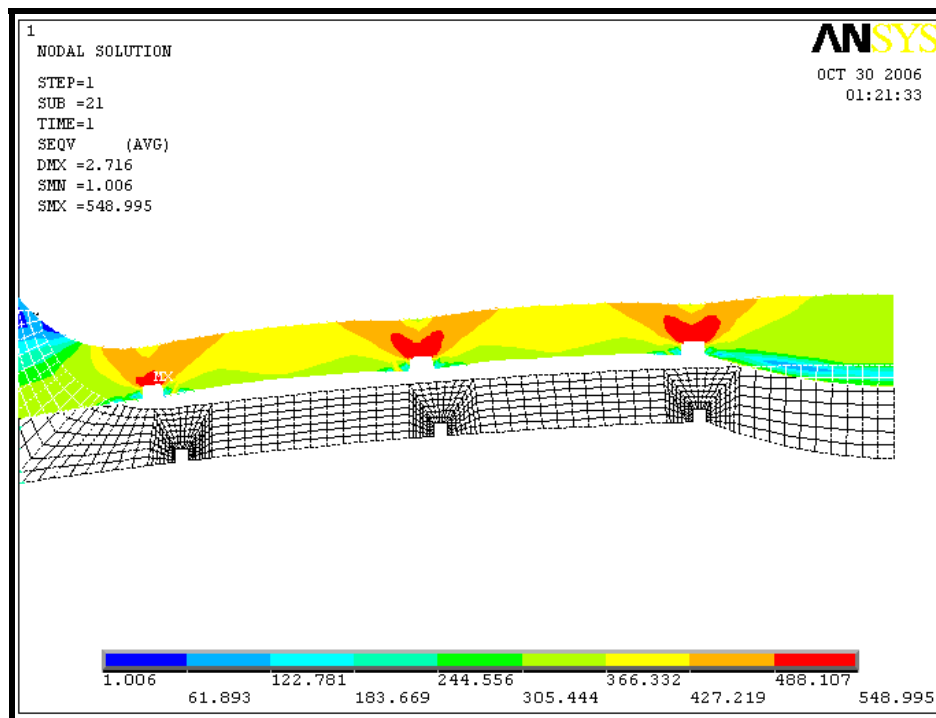


Figura H-3 – Plastificação do ligamento na presença de três alvéolo interno com tensão máxima de aproximadamente 548 MPa para um carregamento de 39 kgf/cm<sup>2</sup> de pressão

Desta forma, apesar das simplificações do modelo numérico utilizado, fica comprovada a intensificação de tensões na região dos alvéolos. Esta intensificação foi suficiente para gerar tensões no regime plástico do material e levar o ET 16 à falha.

Destaca-se a similaridade da distribuição das tensões e o plano de cisalhamento observado na análise fratógrfica do ET 16, conforme pode ser visualizado na Figura H-4.

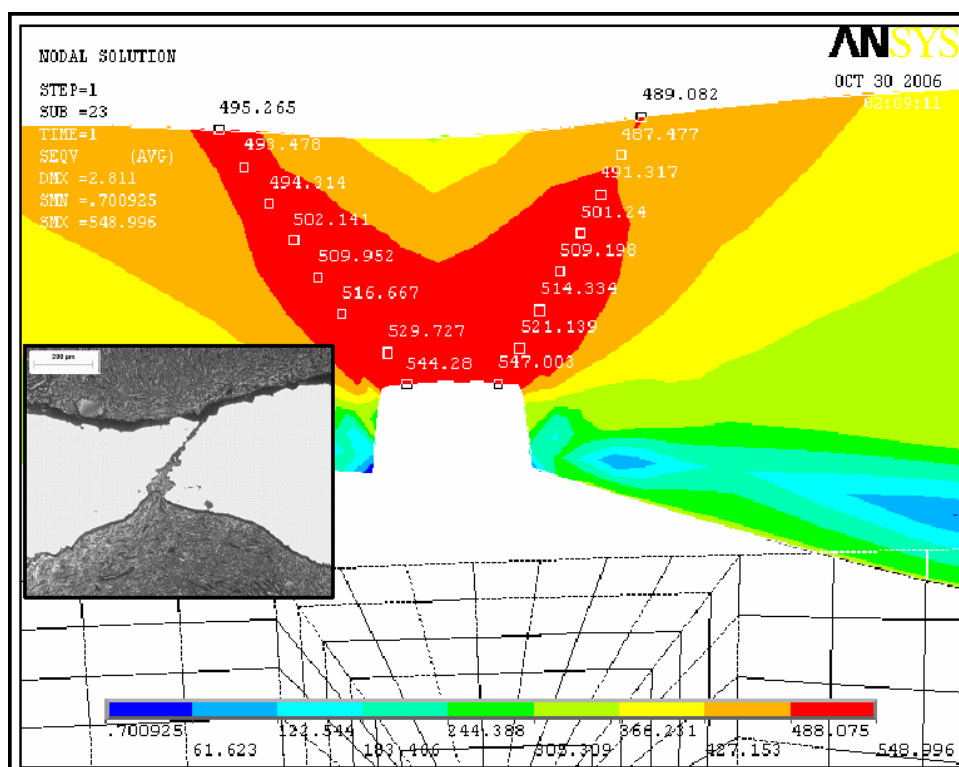


Figura H-4 – Detalhe da plastificação do ligamento na presença de três alvéolos internos para um carregamento de  $39 \text{ kgf/cm}^2$  de pressão.