

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Neste trabalho buscou-se o entendimento e a ampliação do conhecimento sobre a determinação de propriedades mecânicas de tração de aços através de ensaios de macroindentação instrumentada. Inúmeros ensaios foram realizados para avaliar a capacidade dos modelos de “Haggag *et al.*” e de “Ahn e Kwon”, assim como de diversas correlações que utilizam a dureza para calcular outras propriedades mecânicas, de estimar os limites de escoamento e de resistência de aços, especialmente os usados na indústria de óleo e gás. Os resultados obtidos permitem concluir que:

1. Os fatores “diâmetro do penetrador” e “força máxima” têm efeito significativo sobre o valor da dureza de indentação (H_{ABI}), que é similar à dureza Brinell (HBW), mas distingue-se desta na forma de medição do diâmetro da indentação e nos diâmetros de penetradores e forças usados para calculá-la. De uma forma geral, para os aços e condições de ensaios utilizados no presente trabalho, verificou-se que $H_{ABI} > HBW$. Apesar da diferença, a dureza de indentação pode ser usada como estimativa da dureza Brinell de aços;
2. A razão E_p/E_t , calculada a partir das curvas “força *versus* deslocamento” obtidas em ensaios de macroindentação instrumentada, mostrou-se dependente das condições de ensaio, sendo influenciada pelos fatores “diâmetro do penetrador” e “força máxima”. Foi verificada uma redução significativa no valor da razão E_p/E_t à medida que a resistência do aço aumenta, indicando que esta razão pode ser usada como parâmetro para avaliar a capacidade do aço de dissipar energia na forma plástica;
3. A utilização do “Modelo de Ahn e Kwon”, com os parâmetros de cálculo $\alpha = 0,14$ e $\psi = 3,0$, em associação com a equação $K\varepsilon_{YS}^n = E(\varepsilon_{YS} - 0,002)$, não fornece resultados satisfatórios para o limite de escoamento, pois os erros percentuais em relação aos ensaios de tração são superiores a 10%, chegando a 35%. No entanto,

assumindo que a deformação no escoamento é igual a 0,01, de uma forma geral os erros ficaram abaixo de 10%, especialmente quando os ensaios de macroindentação instrumentada foram realizados com o penetrador de 1,0 mm de diâmetro. Isso indica que o uso da equação de Hollomon no “Modelo de Ahn e Kwon” tende a subestimar os valores de tensão próximos ao limite de escoamento. No caso do limite de resistência à tração, os erros gerados ficaram abaixo de 10% na maior parte dos casos. Ressalta-se que o “Modelo de Ahn e Kwon” deve ser utilizado com cautela, pois os erros ultrapassaram 10% em alguns casos, principalmente na estimativa do limite de escoamento;

4. O uso do “Modelo de Haggag *et al.*”, adotando a equação $\sigma_{YS} = \beta_m \cdot A$ e os parâmetros de cálculo $\beta_m = 0,2285$ e $\alpha_m = 1,200$, não é satisfatório para todos os aços, pois os erros nas estimativas dos limites de escoamento e de resistência são superiores a 10%. Para aços de alta resistência, os erros atingiram 35% para o limite de escoamento e 25 % para o limite de resistência. Além disso, há influência do diâmetro do penetrador e da força máxima de ensaio nos resultados;
5. A equação $\sigma_{YS} = \beta_m \cdot A + b_m$ é mais adequada para estimar o limite de escoamento de aços utilizando o “Modelo de Haggag *et al.*”, pois os parâmetros de cálculo β_m e b_m tornam-se independentes da resistência do aço em análise. Contudo, os valores destes parâmetros dependem do diâmetro do penetrador e da força máxima usados no ensaio de macroindentação instrumentada. Valores de β_m e b_m foram determinados para diversas condições de ensaio;
6. Em relação ao parâmetro empírico α_m , duas metodologias para o cálculo do limite de resistência à tração de aços são propostas: (1) uso do “Modelo de Haggag *et al.*” e adoção de “ α_m médio”; (2) uso do parâmetro de teste A e da equação $\sigma_{UTS} = \Delta_m \cdot A + \delta_m$, com os parâmetros Δ_m e δ_m determinados empiricamente, dispensando a utilização de α_m . Em qualquer uma das alternativas, os valores de α_m , Δ_m e δ_m dependem da condição de ensaio (diâmetro do penetrador e força máxima);
7. A interferometria com luz branca mostrou-se útil como técnica experimental para medir a topografia superficial e quantificar a altura do *pile-up* de indentações;
8. O expoente de encruamento (n) calculado usando o “Modelo de Haggag *et al.*” tende a ser menor que o valor determinado via ensaio de tração;
9. Os valores dos parâmetros de cálculo empíricos determinados no presente trabalho viabilizam o uso do penetrador esferocônico de diamante, com diâmetro de ponta de 400 μm , em ensaios de macroindentação instrumentada realizados com o *PropInSitu* 2, visando à avaliação de propriedades mecânicas em microrregiões;

10. O uso de correlações para determinar os limites de escoamento e de resistência à tração de aços a partir da dureza, a qual pode ser estimada através do ensaio de macroindentação instrumentada, mostrou-se útil, apesar de o erro gerado ter ficado acima de 10% em alguns casos, pois permite estabelecer “valores de referência”, em ensaios *in situ*, para avaliar a correta utilização dos parâmetros de cálculo empíricos inseridos no “Modelo de Haggag *et al.*”;
11. Dentre todos os modelos/correlações/equações investigados, a utilização do “Modelo de Haggag *et al.*”, adotando os valores de β_m , b_m e “ α_m médio” propostos no presente trabalho, gerou os menores erros nas estimativas dos limites de escoamento e de resistência dos aços API 5L X65, L80, P110 e ABNT 8550, com os erros médios e máximos ficando abaixo de 5% e 10%, respectivamente. Erros inferiores a 10% também foram obtidos utilizando correlações/equações para estimar os limites de escoamento e de resistência a partir da dureza de indentação;
12. Os testes realizados em amostras do aço ABNT 8550 (temperado e revenido), nas condições “não hidrogenada” e “hidrogenada”, *indicam* que o ensaio de macroindentação instrumentada tem potencial para ser usado como técnica de detecção da fragilização por hidrogênio em aços. Porém, ensaios complementares são necessários para se confirmar este potencial.

É importante destacar que os valores dos parâmetros de cálculo empíricos propostos no presente trabalho, como por exemplo, os valores de β_m , b_m e α_m utilizados no “Modelo de Haggag *et al.*”, não são “universais”, e sim “sistêmicos”, pois são válidos apenas para:

- A faixa de propriedades mecânicas e microestruturas dos aços investigados;
- Ensaio realizado com o *PropInSitu 2*, pois possíveis efeitos associados à complacência do equipamento estão embutidos nos valores dos parâmetros;
- As condições de ensaio analisadas, especialmente os diâmetros de penetrador e forças máximas empregadas;
- Aços para os quais é válida a hipótese de que o comportamento mecânico do material é ditado pela lei constitutiva de Hollomon.

CAPÍTULO VI

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As sugestões para trabalhos futuros estão divididas em quatro linhas de atuação, listadas a seguir. Em alguns casos a sugestão está acompanhada da indicação de artigo(s) que trata(m) do assunto em questão.

- **Linha de atuação (1):** melhoramentos no *PropInSitu 2*, sugestões para o *PropInSitu 3* e alterações na infraestrutura para ensaios de macroindentação instrumentada em amostras hidrogenadas;
- **Linha de atuação (2):** continuação da realização de ensaios de macroindentação instrumentada visando “aperfeiçoar” os modelos de “Haggag *et al.*” e “Ahn e Kwon”; aprofundar a avaliação das correlações para cálculo de propriedades mecânicas de tração a partir da dureza de indentação; analisar outras condições de ensaio; avaliar a utilização dos modelos propostos na literatura para estimar a tenacidade à fratura (K_{Ic}) a partir de ensaios de macroindentação instrumentada;
- **Linha de atuação (3):** análise da incerteza de medição e correção do efeito de complacência do equipamento;
- **Linha de atuação (4):** modelagem em elementos finitos do ensaio de macroindentação instrumentada com penetradores esféricos.

Linha de Atuação (1)

- Implementar no *software* de controle a opção de utilizar a profundidade como critério de parada do ensaio, ao invés da força, como é adotado atualmente, e avaliar as propriedades mecânicas de diferentes aços calculadas a partir de indentações com a mesma profundidade. Isso permitirá estudar, por exemplo, o efeito da profundidade

de penetração na altura do *pile-up* e sua influência no cálculo dos limites de escoamento e de resistência (KIM *et al.*, 2006a e 2006b);

- Avaliar o uso de dois LVDT's, trabalhando simultaneamente e posicionados em lados opostos do equipamento, para medição do deslocamento, com o objetivo de reduzir os erros de medição em ensaios de bancada realizados em amostra de pequenas dimensões, nas quais sua movimentação durante o ensaio, devido à inexistência de paralelismo entre faces, é mais crítica. Além disso, a utilização de dois LVDT's também pode reduzir erros devido à movimentação do equipamento de macroindentação originada por folgas em acoplamentos;
- Adicionar um sistema de purga com N₂ à infraestrutura de hidrogenação de amostras para remoção de ar do interior da câmara (LEE *et al.*, 2011).

Linha de Atuação (2)

- Na unidade de análise do *software* de controle do *PropInSitu 2*, introduzir as equações associadas às correlações que permitem estimar os limites de escoamento e de resistência a partir da dureza de indentação, mostrando os resultados na tela de interface com o usuário, juntamente com as propriedades mecânicas calculadas pelos modelos de "Haggag *et al.*" e de "Ahn e Kwon";
- Realizar ensaios de macroindentação instrumentada em outras "classes de materiais", por exemplo, aços inoxidáveis austeníticos, ligas de níquel, ligas de cobre e ligas de alumínio, com o objetivo de determinar os parâmetros de cálculo empíricos para estes materiais. No caso do aço inoxidável austenítico, para o qual o fenômeno de *sink-in* ocorre (KARTHIK *et al.*, 2012), verificar o efeito deste comportamento no cálculo das propriedades mecânicas;
- Realizar ensaios de macroindentação instrumentada usando penetrador Vickers, ao invés de penetrador esférico, visando obter diretamente a dureza HV10, a qual pode ser usada para calcular os limites de escoamento e de resistência a partir de correlações com a dureza;
- Avaliar o efeito da rugosidade superficial da amostra em ensaios de macroindentação instrumentada que envolvem pequenas profundidades de penetração, como é o caso da utilização do penetrador esferocônico de diamante, com diâmetro da ponta de 400 µm, visando verificar se a preparação da superfície com lixa de 1200 *mesh* é necessária / suficiente;

- Realizar ensaios de macroindentação instrumentada em amostras de aços hidrogenadas através de carregamento catódico, em célula eletroquímica, e comparar os resultados (propriedades mecânicas) com aqueles obtidos a partir de ensaios na câmara de hidrogenação (uso de H_2 pressurizado);
- Avaliar o uso de outras leis constitutivas, além da equação de Hollomon, como a de Swift ou de Voce, para traçar/ajustar a curva “tensão *versus* deformação” (fase plástica) a partir das tensões e deformações calculadas via ensaio de macroindentação instrumentada, usando o “Modelo de Ahn e Kwon” ou o “Modelo de Haggag *et al.*” (KARTHIK *et al.*, 2010; KANG *et al.*, 2014);
- Avaliar a adoção de ciclos intermediários com descarregamento total, visando minimizar o erro na determinação de h_p (YAMAMOTO *et al.*, 1996). Confrontar essa metodologia com a proposta por Haggag (HAGGAG, 2009a), que utiliza ciclos intermediários com descarregamento parcial, já que ele afirmou que o uso de descarregamento total para calcular a profundidade plástica de indentação é incorreto, devido à presença de uma não linearidade que ocorre nos últimos 20-30% da curva de descarregamento total;
- Verificar se existe uma correlação, com aplicação prática para aços, entre a energia absorvida em ensaios de impacto Charpy e as energias de deformação total e plástica em ensaios de macroindentação instrumentada;
- Realizar ensaios de macroindentação instrumentada em baixas temperaturas (nitrogênio líquido), com o objetivo de avaliar a alteração, em comparação com os ensaios em temperatura ambiente, no limite de escoamento e nas energias de deformação plástica e elástica (MATHEW; MURTY, 1999);
- No programa de análise, para o “Modelo de Ahn e Kwon”, introduzir a equação para cálculo da área de contato real que considera, além do expoente de encruamento do material, a relação h_{max}/R (KIM *et al.*, 2006a e 2006b);
- Avaliar a possibilidade de uso do “Modelo de Ahn e Kwon” para estimar o coeficiente de resistência (K) e o expoente de encruamento (n) de aços;
- Avaliar o uso do conceito de IEF (*Indentation Energy to Fracture*) para estimar a tenacidade à fratura de aços a partir de ensaios de macroindentação instrumentada (HAGGAG *et al.*, 1998; MURTY *et al.*, 1998a e 1998b; BYUN; KIM; HONG, 1998; MATHEW; MURTY, 1999; BYUN *et al.*, 2000; LEE *et al.*, 2006; HAGGAG, 2009a;). Além disso, associar a técnica de emissão acústica ao ensaio de macroindentação, visando detectar o aparecimento de microtrincas (VON STEBUT *et al.*, 1999);
- Avaliar a utilização de ensaios de nano/microindentação instrumentada para determinação de propriedades mecânicas de tração (limites de escoamento e de

resistência à tração) de aços (RODRÍGUEZ; GUTIERREZ, 2003), comparando os resultados com as propriedades obtidas a partir de ensaios de macroindentação.

Linha de Atuação (3)

- Determinar a incerteza de medição associada às propriedades mecânicas obtidas por meio de ensaios de macroindentação instrumentada realizados com o *PropInSitu 2* (ULLNER, 2004);
- Avaliar e corrigir o efeito da complacência do equipamento nos ensaios de macroindentação realizados com o *PropInSitu 2*, especialmente quando este estiver posicionado sobre a câmara de hidrogenação (COSTA *et al.*, 2004; ULLNER *et al.*, 2010; KARTHIK *et al.*, 2012).

Linha de Atuação (4)

- Construção e validação de um modelo de elementos finitos para simular ensaios de macroindentação instrumentada visando:
 - Estudar os fenômenos de *pile-up* e *sink-in* para diferentes condições de ensaio e avaliar a influência destes sobre a área de contato real e as propriedades mecânicas (KIM *et al.*, 2006a; KARTHIK *et al.*, 2012);
 - Determinar as propriedades mecânicas através dos métodos 2 (análise inversa usando modelo de elementos finitos) e 3 (utilização de redes neurais) sugeridos pela norma ISO/TR 29381 (2008) (YAMAMOTO; KURISHITA; MATSUI, 1999; CAO; LU, 2004; LEE; LEE; PHARR, 2005; BEGHINI; BERTINI; FONTANARI, 2006; CHUNG *et al.*, 2009; MAHMOUDI; NOURBAKHSH, 2011; SHARMA *et al.*, 2011b; LE, 2012; SUN *et al.*, 2014);
 - Comparar as curvas “força *versus* deslocamento” resultantes de simulações em elementos finitos com as obtidas em ensaios de macroindentação instrumentada realizados em aços com propriedades mecânicas de tração conhecidas. Destaca-se que essa comparação só é possível se a complacência do equipamento for corrigida (KARTHIK *et al.*, 2012).

CAPÍTULO VII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHN, J. H.; KWON, D. **Derivation of Plastic-Strain Relationship from Ball Indentations: Examination of Strain Definition and Pileup Effect.** *Journal of Materials Research*, v. 16, n° 11, p. 3170-3178, 2001.

ALCALÁ, J.; BARONE, A. C.; ANGLADA, M. **The Influence of Plastic Hardening on Surface Deformation Modes Around Vickers and Spherical Indents.** *Acta Materialia*, 48, p. 3451-3464, 2000.

AMBRIZ, R. R.; CHICOT, D.; BENSEDDIQ, N.; MESMACQUE, G.; TORRE, S. D. **Local Mechanical Properties of the 6061-T6 Aluminium Weld Using Micro-Traction and Instrumented Indentation.** *European Journal of Mechanics A/Solids*, 30, p. 307-315, 2011.

AMEND, B. **Using Hardness to Estimate Pipe Yield Strength – Field Application of ASME CRTD – Vol. 91.** *Proceedings of the 2012 9th International Pipeline Conference*, IPC2012-90262, Calgary, Canada, 2012.

API Specification 5L. **Specifications for Line Pipe.** Forty-fourth ed.. *American Petroleum Institute*, 2008.

ASTM E10. **Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials.** *American Society for Testing and Materials*, 2012.

ASTM E8/E8M. **Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.** *American Society for Testing and Materials*, 2011.

ASTM E92. **Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials.** *American Society for Testing and Materials*, 2003.

AZEVEDO, E. C.; NETO, S. C.; CHIERICE, G. O.; LEPIENSKI. **Aplicação de Indentação Instrumentada na Caracterização Mecânica de Poliuretana Derivada de Óleo de Mamona.** *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 19, n° 4, p. 336-343, 2009.

BANNISTER, A. C.; OCEJO, J. R.; SOLANA, F. G. **Implications of the Yield Stress/Tensile Stress Ratio to the SINTAP Failure Assessment Diagrams for Homogeneous Materials.** *Engineering Fracture Mechanics*, 67, p. 547-562, 2000.

BARBADIKAR, D. R.; BALLAL, A. R.; PESHWE, D. R.; GANESHKUMAR, J.; LAHA, K.; MATHEW, M. D. **Investigation on Mechanical Properties of P92 Steel Using Ball Indentation Technique.** *Materials Science & Engineering A*, a, 2014a.

BARBADIKAR, D. R.; BALLAL, A. R.; PESHWE, D. R.; GANESHKUMAR, J.; LAHA, K.; MATHEW, M. D. **A Study on the Effect of Tempering Temperature on Tensile Properties of P92 Steel by Automated Ball Indentation Technique.** *Procedia Engineering*, 86, p. 910-918, 2014b.

BARROZO, M. A. S. **Planejamento de Experimentos.** Faculdade de Engenharia Química - Universidade Federal de Uberlândia. 2014. 110 p. Apostila.

BARTHÉLÉMY, H. **Effects of Pressure and Purity on the Hydrogen Embrittlement of Steels.** *International Journal of Hydrogen Energy*, 36, p. 2750-2758, 2011.

BEGHINI, M.; BERTINI, L.; FONTANARI, V. **Evaluation of the Stress-Strain Curve of Metallic Materials by Spherical Indentation.** *International Journal of Solids and Structures*, 43, p. 2441-2459, 2006.

BILMES, P. D.; SOLARI, M.; LLORENTE, C. L. **Characteristics and Effects of Austenite Resulting from Tempering of 13Cr-NiMo Martensitic Steel Weld Metals.** *Materials Characterization*, 46, p. 285-296, 2001.

BOLSHAKOV, A.; PHARR, G. M. **Influences of Pileup on the Measurement of Mechanical Properties by Load and Depth Sensing Indentation Techniques.** *Journal of Materials Research*, Vol. 13, No. 4, 1998.

BOX, G. E. P.; HUNTER, J. S.; HUNTER, W. G. **Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery.** 2^a ed. John Wiley & Sons, Inc. 2005.

BUSBY, J. T.; HASH, M. C.; WAS, G. S. **The Relationship Between Hardness and Yield Stress in Irradiated Austenitic and Ferritic Steels.** *Journal of Nuclear Materials*, 336, p. 267-278, 2005.

- BYUN, T. S.; HONG, J. H.; HAGGAG, F. M.; FARRELL, K.; LEE, E. H. **Measurement of Through-the-Thickness Variations of Mechanical Properties in SA508 Gr.3 Pressure Vessel Steels Using Ball Indentation Test Technique.** *Internatonal Journal of Pressure Vessels and Piping*, 74, p. 231-238, 1997.
- BYUN, T. S.; KIM, J. W.; HONG, J. H. **A Theoretical Model for Determination of Fracture Toughness of Reactor Pressure Vessel Steels in the Transition Region from Automated Ball Indentation Test.** *Journal of Nuclear Materials*, 252, p. 187-194, 1998.
- BYUN, T. S.; KIM, S. H.; LEE, B. S.; KIM, I. S.; HONG, J. H. **Estimation of Fracture Toughness Transition Curves of RPV Steels from Ball Indentation and Tensile Test Data.** *Journal of Nuclear Materials*, 277, p. 263-273, 2000.
- CAHOON, J. R.; BROUGHTON, W. H.; KUTZAK, A. R. **The Determination of Yield Strength from Hardness Measurements.** *Metallurgical Transactions*, v. 2, p. 1979-1983, 1971.
- CAHOON, J. R. **An Improved Equation Relating Hardness to Ultimate Strength.** *Metallurgical Transaction*, v. 3, p. 3040, 1972.
- CALADO, V.; MONTGOMERY, D. C. **Planejamento de Experimentos usando o Statistica.** Rio de Janeiro: E-papers, 2003.
- CALLEGARI, V. A.; FERREIRA, F. M.; RAMOS NETO, F. F.; FILHO, B. G. S.; PAES, M. T. P.; FRANCO, S. D. **Influência da Topografia Superficial nas Propriedades Mecânicas Medidas Através de Ensaio de Macroindentação Instrumentada.** In: *15º Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica*, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005.
- CALLISTER, W. D. **Materials Science and Engineering.** 5 ed., John Wiley and Sons. 2000.
- CAO, Y. P.; LU, J. **A New Method to Extract the Plastic Properties of Metal Materials from an Instrumented Spherical Indentation Loading Curve.** *Acta Materialia*, 52, p. 4023-4032, 2004.
- CARDOSO, F. C. **Desenvolvimento do Sistema de Instrumentação e Controle de um Macroindentador Portátil para Avaliação de Propriedades Mecânicas de Dutos.** 2004, 99 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2004.
- CARTER, T. J.; CORNISH, L. A. **Hydrogen in Metals.** *Engineering Failure Analysis*, 8, p. 113-121, 2001.

CHATTERJEE, S.; PANWAR, S.; MADHUSOODANAN, K. **Qualification of In-Situ Property Measurement System Using Heat Treated Spool Pieces of Zr 2.5 wt% Nb Pressure Tube.** *Procedia Engineering*, 86, p. 892-898, 2014.

CHUDOBA, T.; SCHWARZER, N.; RICHTER, F. **Determination of Elastic Properties of Thin Films by Indentation Measurements with a Spherical Indenter.** *Surface and Coatings Technology* 127, p. 9-17, 2000.

CHUNG, K.-H.; LEE, W.; KIM, J. H.; KIM, C.; PARK, S. H.; KWON, D.; CHUNG, K. **Characterization of Mechanical Properties by Indentation Tests and FE Analysis – Validation by Application to a Weld Zone of DP590 Steel.** *International Journal of Solids and Structures*, 46, p. 344-363, 2009.

CIPRIANO, G. L. **Determinação do Coeficiente de Encruamento de Metais Através da Morfologia das Impressões de Dureza na Escala Macroscópica.** 2008, 125p. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

CLARK, E. B.; AMEND, W. E. **Applications Guide for Determining the Yield Strength of In-Service Pipe by Hardness Evaluation – Final Report.** *American Society of Mechanical Engineers (ASME)*, CRTD-Vol. 91, 2009.

CONTRERAS, M. A.; RODRÍGUEZ, C.; BELZUNCE, F. J.; BETEGÓN, C. **Use of Small Punch Test to Determine the Ductile-to-Brittle Transition Temperature of Structural Steels.** *Fatigue & Fracture Engineering Materials & Structures*, 31, p. 727-737, 2008.

COSTA, A. L. M.; SHUMAN, D. J.; MACHADO, R. R.; ANDRADE, M. S. **Determination of the Compliance of an Instrumented Indentation Testing Machine.** *Proceedings of HARDMEKO 2004*, Washington DC, USA, 11-12 November, 2004.

DA SILVA, F. J. **Erosão, Corrosão, Erosão-Corrosão e Cavitação do ABNT 8550 Nitretado a Plasma.** 2008, 252 p. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

DAS, G.; GHOSH, S.; GHOSH, S.; GHOSH, R. N. **Materials Characterization and Classification on the Basis of Materials Pile-up Surrounding the Indentation.** *Materials Science and Engineering A*, 408, p. 158-164, 2005.

DAS, G.; GHOSH, S. SAHAY, S. K. **Use of Ball Indentation Technique to Determine the Change of Tensile Properties of SS316L Steel Due to Cold Rolling.** *Materials Letters*, 59, p. 2246-2251, 2005.

DAS, G.; GHOSH, S.; GHOSH, S. **Structure-Property Correlation of EM Steel and Evaluation of Mechanical Properties through BIT**. *NDT&E International*, 39, p. 155-161, 2006.

DAS, G.; GHOSH, S.; BOSE, S. C.; GHOSH, S. **Use of Ball Indentation Technique to Evaluate Room Temperature Mechanical Properties of a Gas Turbine Blade**. *Materials Science and Engineering A*, 424, p. 326-332, 2006.

DAS, G.; DAS, M.; SINHA, S.; GUPTA, K. K.; CHAKRABARTY, S.; RAY, A. K. **Characterization of Cast Stainless Steel Weld Pools by Using Ball Indentation Technique**. *Materials Science and Engineering A*, 513-514, p. 389-393, 2009.

DAS, G.; DAS, M.; GHOSH, S.; DUBEY, P.; RAY, A. K. **Effect of Aging on Mechanical Properties of 6063 Al Alloy Using Instrumented Ball Indentation Technique**. *Materials Science and Engineering A*, 527, p. 1590-1594, 2010.

DAS, M.; PAL, T. K.; DAS, G. **Use of Portable Automated Ball Indentation System to Evaluate Mechanical Properties of Steel Pipes**. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 65(2), p. 197-203, 2012.

DATSKO, J.; HARTWIG, L.; McCLODY, B. **On the Tensile Strength and Hardness Relation for Metals**. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 10, p. 718-722, 2001.

DAVIS, H. E.; TROXELL, G. E.; HAUCK, G. F. W. **The Testing of Engineering Materials**. 4th ed., McGraw-Hill. 1982.

DIETER, G. E. **Mechanical Metallurgy**. 2nd ed., McGraw-Hill. 1976.

DOENER, M. F.; NIX, W. D. **A Method for Interpreting the Data from Depth-Sensing Indentation Instruments**. *Journal of Materials Research*, 1, p. 601-609, 1986.

DOWNING, D.; CLARK, J. **Estatística Aplicada**. Editora Saraiva, 3^a ed., 2011. São Paulo.

DUARTE, M. A. V.; MEOLA, T. **Curso de Planejamento Experimental**. Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Uberlândia. 2007. 131 p. Apostila.

FERREIRA, F. M. **Avaliação Tribomecânica via Esclerometria Retilínea e Indentação Instrumentada do Aço ABNT 8550**. 2010, 138 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

FRANCIS, H. A. **Phenomenological Analysis of Plastic Spherical Indentation**. *Trans. ASME*, p. 272-281, 1976.

FRANCO, S. D. **Avaliação de Propriedades Mecânicas In Situ Através de Macroindentação Instrumentada – Parte II**. Uberlândia: Laboratório de Tribologia e Materiais – FEMEC – Universidade Federal de Uberlândia. 2007. 124 p. Relatório.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; DOS SANTOS, C. A. **Ensaaios dos Materiais**. Editora LTC, 2008. Rio de Janeiro.

GEORGE, R. A.; DINDA, S.; KASPER, A. S. **Estimating Yield Strength from Hardness Data**. *Met. Prog.*, p. 30-35, 1976.

GHOSH, S.; PAL, T. K.; MUKHERJEE, S.; DAS, G.; GHOSH, S. **Comparative Study of Heat-Affected Zone with Weld and Base Material After Post-Weld Heat Treatment of HSLA Steel Using Ball Indentation Technique**. *J. Mater. Sci.*, 43, p. 5474-5482, 2008.

GHOSH, S.; YADAV, S.; DAS, G. **Study of Standard Heat Treatment on Mechanical Properties of Inconel 718 Using Ball Indentation Technique**. *Material Letters*, 62, p. 2619-2622, 2008a.

GHOSH, S.; YADAV, S.; DAS, G. **Ball Indentation Technique: A Currently Developed Tool to Study the Effect of Various Heat Treatments on the Mechanical Properties of En24 Steel**. *Materials Letters*, 62, p. 3966-3968, 2008b.

GUBBI, A. N.; ROWCLIFFE, A. F. **Evaluation of Flow Properties in Weldments of Vanadium Alloys Using Novel Indentation Technique**. *Science and Technology of Welding and Joining*, v. 2, n° 3, p. 103-107, 1997.

HAGGAG, F. M.; NANSTAD, R. K.; BRASKI, D. N. **Structural Integrity Evaluation Based on an Innovative Field Indentation Microprobe**. *ASME – The American Society of Mechanical Engineers – PVP.*, v. 170, in: Innovative Approaches to Irradiation Damage, and Fracture Analysis, p. 101-107, 1989.

HAGGAG, F. M.; NANSTAD, R. K.; HUTTON, J. T.; THOMAS, D. L.; SWAIN, R. L. **Use of Automated Ball Indentation to Measure Flow Properties and Estimate Fracture Toughness in Metallic Materials**. *American Society for Testing and Materials*, ASTM 1092, Philadelphia, p. 188-208, 1990.

HAGGAG, F.M. **In-Situ Measurements of Mechanical Properties Using Novel Automated Ball Indentation System**. *ASTM STP 1204*, pp. 27-44, 1993.

HAGGAG, F. M.; BYUN, T.-S.; HONG, J. H.; MIRAGLIA, P. Q.; MURTY, K. L. **Indentation-Energy-to-Fracture (IEF) Parameter for Characterization of DBTT in Carbon Steels Using Nondestructive Automated Ball Indentation (ABI) Technique.** *Scripta Materialia*, v. 38, n° 4, p. 645-651, 1998.

HAGGAG, F. M. **Non-destructive Determination of Yield Strength and Stress-Strain Curves of In-Services Transmission Pipelines Using Innovative Stress-Strain Microprobe Technology.** ATC Report, ATC/DOT/990901. 1999. 65 p.

HAGGAG, F. M. **In-Situ Monitoring of Hydrogen Embrittlement in Ferritic Steel Pipelines.** *International Conference on Fracture*, ICF12, Canada, Ottawa, July 12-17, 2009a.

HAGGAG, F. M. **Standard Test Methods Automated Ball Indentation (ABI) Testing of Metallic Materials and Structures to Determine Tensile Properties and Stress-Strain Curves.** Advanced Technology Corporation (ATC), Oak Ridge, TN, USA, 2009b.

HAGGAG, F. M. **In-Situ ABI Testing to Determine Yield Strength, Pipe Grade, and Fracture Toughness on In-Service Oil and Gas Pipelines.** *Russian Oil and Gas Technology*, p. 22-29, April, 2011.

HAMADA, A. S.; HAGGAG, F. M.; PORTER, D. A. **Non-Destructive Determination of the Yield Strength and Flow Properties of High-Manganese Twinning-Induced Plasticity Steel.** *Materials Science & Engineering A*, 558, p. 766-770, 2012.

HASHEMI, S. H. **Strength-Hardness Statistical Correlation in API X65 Steel.** *Materials Science and Engineering A*, 528, p. 1648-1655, 2011.

HBM. **Data Sheet – WI Displacement Transducer.** Disponível em: <<http://www.hbm.com/en/menu/products/transducers-sensors/displacement/wi/>>. Acesso em: 05/06/2014a.

HBM. **Data Sheet – U2B Force Transducer.** Disponível em: <<http://www.hbm.com/en/menu/products/transducers-sensors/force/u2b/>>. Acesso em: 05/06/2014b.

HERNOT, X.; BARTIER, O.; BEKOUICHE, Y.; EL ABDI, R.; MAUVOISIN, G. **Influence of Penetration Depth and Mechanical Properties on Contact Radius Determination for Spherical Indentation.** *International Journal of Solids and Structures*, 43, p. 4136-4153, 2006.

HILL, R.; STORAKERS, F. R. S.; ZDUNEK, A. B. **A Theoretical Study of the Brinell Hardness Test.** *Proceedings of the Royal Society of London*, A 423, p. 301-330, 1989.

IOST, A. **Détermination de la ténacité de matériaux fragiles ou ductiles à partir de l'essai d'indentation.** *Revue de Métallurgie*, 110, p. 215-233, 2013.

ISO 14577-1. **Metallic Materials – Instrumented Indentation Test for Hardness and Materials Parameters – Part 1: Test Method.** *International Organization for Standardization*, 2002.

ISO/TR 29381. **Metallic Materials – Measurement of Mechanical Properties by an Instrumented Indentation Test – Indentation Tensile Properties.** *International Organization for Standardization*, 2008.

ISO 18265. **Metallic Materials – Conversion of Hardness Values.** *International Organization for Standardization*, 2013.

JAENSSON, B. O.; SUNDSTRÖM B. O. **Determination of Young's Modulus and Poisson's Ratio for WC-Co Alloys by the Finite Element Method.** *Materials Science and Engineering*, 9, p. 217-222, 1972.

JANG, J.; CHOI, Y.; LEE, Y.; KWON, D.; KIM, D.; KIM, J. **Nondestructive Observation on Tensile Property Change of Hydrogen-Exposed Cr-Mo-V Steel HAZ Using an Instrumented Indentation Technique.** *Journal of Materials Science Letters*, 22, p. 499-502, 2003.

JANG, J.; CHOI, Y.; LEE, Y.; KWON, D. **Instrumented Microindentation Studies on Long-Term Aged Materials: Work-Hardening Exponent and Yield Ratio as New Degradation Indicators.** *Materials Science and Engineering A*, 395, p. 295-300, 2005.

JEON, E.-c.; KIM, J.-Y.; BAIK, M.-K.; KIM, S.-H.; PARK, J.-S.; KWON, D. **Optimum Definition of True Strain Beneath a Spherical Indenter for Deriving Indentation Flow Curves.** *Materials Science and Engineering A*, 419, p. 196-201, 2006.

KANG, S.-K.; KIM, Y.-C.; KIM, K.-H.; KWON, D. KIM, J.-Y. **Constitutive Equations Optimized for Determining Strengths of Metallic Alloys.** *Mechanics of Materials*, accepted manuscript, 2014.

KANIA, R.; RUSSELL, A.; GAO, M. **Advanced Indentation Systems for Tensile Properties Evaluation of In-Service Pipelines.** *NACE – Corrosion 2004*, N° 04170, Nova Orleans, USA, 2004.

KARTHIK, V.; LAHA, K.; CHANDRAVATHI, K. S.; PARAMESWARAM, P.; KASIVISWANATHAN, K. V.; RAJ, B. **Ball-Indentation Test Technique for Evaluating Thermal and Creep Damage of Modified 9Cr-1Mo Steel**. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, v. 63, p. 431-436, April-June, 2010.

KARTHIK, V.; VISWESWARAN, P.; BHUSHAN, A.; PAWASKAR, D. N.; KASIVISWANATHAN, K. V.; JAYAKUMAR, T.; RAJ, B. **Finite Element Analysis of Spherical Indentation to Study Pile-up/Sink-in Phenomena in Steels and Experimental Validation**. *International Journal of Mechanical Sciences*, 54, p. 74-83, 2012.

KAYANO, H.; KURISHITA, H.; KIMURA, A.; NARUI, M.; YAMAZARI, M.; SUZUKI, Y. **Charpy Impact Testing Using Miniature Specimens and its Application to the Study of Irradiation Behavior of Low-Activation Ferritic Steels**. *Journal of Nuclear Materials*, 179-181, p. 425-428, 1991.

KHANDELWAL, H. K. **Evaluation of Mechanical Behavior of Nuclear Component Materials Using Automated Ball Indentation Approach**. Master's Thesis. Department of Mechanical Engineering, Thapar University, Patiala, India, 2011.

KHANDELWAL, H. K.; SHARMA, K.; CHHIBBER, R. **Mechanical Property Estimation of Similar Weld Using Ball Indentation Technique**. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 11, p. 1095-1100, 2012.

KHOSHNAW, F. M.; HAMAKHAN, I. A. **Determination of the Mechanical Properties of Austenitic Stainless Steel Weldments by Using Stress Strain Microprobe**. *Materials Science and Engineering A*, 426, p. 1-3, 2006.

KIM, S.-H.; LEE, J.-S.; LEE, Y.-H.; KIM, K.-H.; CHOI, Y.; KWON, D. **Nondestructive Evaluation of Mechanical Properties Using Instrumented Indentation Techniques: Strength, Fracture Toughness, and Residual Stress**. *Proceedings of the Fifteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*, Seoul, Korea, 2005.

KIM, S.-H.; LEE, B. W.; CHOI, Y.; KWON, D. **Quantitative Determination of Contact Depth During Spherical Indentation of Metallic Materials – A FEM Study**. *Materials Science and Engineering A*, 415, p. 59-65, 2006a.

KIM, J.-Y.; LEE, K.-W.; LEE, J.-S.; KWON, D. **Determination of Tensile Properties by Instrumented Indentation Technique: Representative Stress and Strain Approach**. *Surface & Coatings Technology*, 201, p. 4278-4283, 2006b.

KIM, Y.-C.; KIM, K.-H.; KWON, D. **Application of the Instrumented Indentation Technique to Estimate Mechanical Properties.** *Proceedings of the Nineteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*, Osaka, Japan, 2009.

KIM, Y.-C.; KIM, K.-H.; KWON, D. **Nondestructive Mechanical Property Assessment Using Instrumented Indentation Testing.** *Proceedings of the Twentieth International Offshore and Polar Engineering Conference*, Beijing, China, 2010.

KIM, K.-H.; KIM, Y.-C.; JEON, E.-c., KWON, D. **Evaluation of Indentation Tensile Properties of Ti Alloys by Considering Plastic Constraint Effect.** *Materials Science and Engineering A*, 528, p. 5259-5263, 2011a.

KIM, Y.-C.; SONG, W.-S.; KIM, J.-H.; KIM, K.-H.; KWON, D. **Quantitative Characterization of Mechanical Properties Using Instrumented Indentation.** *Procedia Engineering*, 10, p. 3162-3172, 2011b.

KRISHNA, S.C.; GANGWAR, N. K.; JHA, A. K.; PANT, B. **On the Prediction of Strength from Hardness for Copper Alloys.** *Hindawi Journal of Materials*, ID 352578, 6 p., 2013.

KULKARNI, R. V.; KRISHNA, K. V. M.; NEOGY, S.; SRIVASTAVA, D.; RAMADASAN, E.; DEY, G. K.; SAIBABA, N.; JHA, S. K.; SHRIWASTAW, R. S.; ANANTHARAMAN, S. **Determination of Correlation Parameters for Evaluation of Mechanical Properties by Small Punch Test and Automated Ball Indentation Test for Zr-2,5%Nb Pressure Tube Material.** *Nuclear Engineering and Design*, 265, p. 1101-1112, 2013.

KUMAR, K.; MADHUSOODANAN, R.; RUPANI, B. B. **Miniature Specimen Technique as an NDT Tool for Estimation of Service Life of Operating Pressure Equipment.** *International Conference & Exhibition on Pressure Vessel and Piping*, 2006.

KUMAR, K.; POOLEERY, A.; MADHUSOODANAN, K. **Use of Miniature Tensile Specimen and Video Extensometer for Measurement of Mechanical Properties.** Bhabha Atomic Research Centre, Mumbai, India, 2014. Relatório.

KURISHITA, H.; KAYANO, H.; NARUI, M.; YAMAZAKI, M. **Current Status of Small Specimen Technology in Charpy Impact Testing.** *Journal of Nuclear Materials*, 212-215, p. 1682-1687, 1994.

KWON, D.; LEE, J.-S.; HAN, J.-H.; KIM, K.-H.; AYER, R.; JIN, H.; KOO, J. **Residual Stress Evaluation for Weldment of Structural Components Using Instrumented Indentation Technique.** *Proceedings of the Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*, San Francisco, USA, 2006.

LACALLE, R.; ÁLVAREZ, J. A.; SOLANA, F. G. **Analysis of Key Factors for the Interpretation of Small Punch Tests.** *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 31, p. 841-849, 2008.

LAI, M. O.; LIM, K. B. **On the Prediction of Tensile Properties from Hardness Tests.** *Journal of Materials Science*, 26, p. 2031-2036, 1991.

LE, M.-Q. **Material Characterization by Instrumented Spherical Indentation.** *Mechanics of Materials*, 46, p. 42-56, 2012.

LEE, Y.-H.; JI, W.-j.; KWON, D. **Stress Measurement of SS400 Steel Beam Using the Continuous Indentation Technique.** *Experimental Mechanics*, v. 44, n° 1, p. 55-61, 2004.

LEE, H.; LEE, J. H.; PHARR, G. M. **A Numerical Approach to Spherical Indentation Techniques for Material Property Evaluation.** *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 53, p. 2037-2069, 2005.

LEE, J.-S.; JANG, J.; LEE, B.-W.; CHOI, Y.; LEE, S. G.; KWON, D. **An Instrumented Indentation Technique for Estimating Fracture Toughness of Ductile Materials: A Critical Indentation Energy Model Based on Continuum Damage Mechanics.** *Acta Materialia*, 54, p. 1101-1109, 2006.

LEE, K.-W.; KIM, K.-H.; KIM, J.-Y.; KIM, K.-H.; CHOI, B.-H.; KWON, D. **Safety Assessment Based on Mapping of Degraded Mechanical Properties of Materials for Power Plant Pipeline Using Instrumented Indentation Technique.** *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22, p. 868-872, 2009.

LEE, J. H.; KIM, T.; LEE, H. **A Study on Robust Indentation Techniques to Evaluate Elastic-Plastic Properties of Metals.** *International Journal of Solids and Structures*, 47, p. 647-664, 2010.

LEE, Y.-H.; LEE, H. M.; KIM, Y.-i.; NAHM, S.-H. **Mechanical Degradation of API X65 Pipeline Steel by Exposure to Hydrogen Gas.** *Met. Mater. Int.*, 17, n° 3, p. 389-395, 2011.

LEEM, D. S.; LEE, Y. D.; JUN, J. H.; CHOI, C. S. **Amount of Retained Austenite at Room Temperature after Reverse Transformation of Martensite to Austenite in an Fe-13%Cr-7%Ni-3%Si Martensite Stainless Steel.** *Scripta Materialia*, 45, p. 767-772, 2001.

LOUTHAN, M. R.; CASKEY, G.R. **Hydrogen Transport and Embrittlement in Structural Metals.** *International Journal of Hydrogen Energy*, 1, p. 291-305, 1976.

LOUTHAN, M. R.; SWANSON, R. E. **Material Defects, Gas Purity and Hydrogen Embrittlement.** *International Journal of Hydrogen Energy*, 10, p. 551-554, 1985.

LUCAS, G. E. **The Development of Small Specimen Mechanical Test Techniques.** *Journal of Nuclear Materials*, 117, p. 327-339, 1983.

MA, X. P.; WANG, L. J.; LIU, C. M.; SUBRAMANIAN, S. V. **Role of Nb in Low Interstitial 13Cr Super Martensitic Stainless Steel.** *Materials Science and Engineering A*, 528, p. 6812-6818, 2011.

MAGALHÃES, H. L. G.; **Melhoria da Limpeza do Aço SAE 1045 Desoxidado ao Alumínio com Aplicação na Indústria Automobilística, Utilizando Termodinâmica Computacional.** 2010, 127 p. Dissertação de Mestrado. REDEMAT-UFOP, Ouro Preto, 2010.

MAGALHÃES, L. R.; **Desenvolvimento e Fabricação de Penetradores para Avaliação da Resistência ao Desgaste Abrasivo de Polímeros Protetores de Risers.** 2013, 127 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

MAHMOUDI, A. H.; NOURBAKHS, S. H. **A Neural Networks Approach to Characterize Material Properties Using the Spherical Indentation Test.** *Procedia Engineering*, 10, p. 3062-3067, 2011.

MATHEW, M. D.; MURTY, K. L. **Non-destructive Studies on Tensile and Fracture Properties of Molybdenum at Low Temperatures (148 to 423 K).** *Journal of Materials Science*, v. 34, p. 1497-1503, 1999.

MATHEW, M. D.; MURTY, K. L.; RAO, K. B. S.; MANNAN, S. L. **Ball Indentation Studies on the Effect of Aging on Mechanical Behavior of Alloy 625.** *Materials Science and Engineering A*, 264, p. 159-166, 1999.

MATTHEWS, J. R. **Indentation Hardness and Hot Pressing.** *Acta Metallurgica*, 28, p. 311-318, 1980.

MOK, C. H. **The Dependence of Yield Stress on Strain Rate as Determined from Ball Indentation Tests**. *Experimental Mechanics*, v. 6, n° 2, p. 87-92, 1966.

MORAES, M. A. F.; FRANCO, S. D.; SOARES, A. B. **Definição de Nova Eletrônica e Estratégia para Ensaios de Macroindentação Instrumentada Portátil**. In: *29° Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica*, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

MURTY, K. L.; MATHEW, M. D.; MIRAGLIA, P. Q.; SHAH, V. N.; HAGGAG, F. M. **Non-Destructive Evaluation of Deformation and Fracture Properties of Materials Using Stress-Strain Microprobe**. *Non-Destructive Characterization of Materials in Aging System*, *Materials Research Society*, Pennsylvania, USA, 1998a.

MURTY, K. L.; MATHEW, M. D.; WANG, Y.; SHAH, V. N.; HAGGAG, F. M. **Nondestructive Determination of Tensile Properties and Fracture Toughness of Cold Worked A36 Steel**. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 75, p. 831-840, 1998b.

MURTY, K.L.; MIRAGLIA, P. Q.; MATHEW, M. D.; SHAH, V. N.; HAGGAG, F. M. **Characterization of Gradients in Mechanical Properties of SA-533B Steel Welds Using Ball Indentation**. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 76, p. 361-369, 1999.

MURTY, K. L.; MATHEW, M. D. **Nondestructive Monitoring of Structural Materials Using Automated Ball Indentation (ABI) Technique**. *Nuclear Engineering and Design*, 228, p. 81-96, 2004.

NIWA, M.; SHIKAMA, T.; YONEZU, A. **Mechanism of Hydrogen Embrittlement Cracking Produced by Residual Stress from Indentation Impression**. *Materials Science & Engineering A*, accepted manuscript, 2014.

N'JOCK, M. Y.; CHICOT, D.; DECOOPMAN, X.; LESAGE, J.; NDJAKA, J.M.; PERTUZ, A. **Mechanical Tensile Properties by Spherical Macroindentation Using an Indentation Strain-Hardening Exponent**. *International Journal of Mechanical Sciences*, 75, p. 257-264, 2013.

OLIVER, W. C.; PHARR, G. M. **An Improved Technique for Determining Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments**. *Journal of Materials Research*, 7, p. 1564-1583, 1992.

PARKER, J. D.; WILSHIRE, B. **Non-Destructive Life Assessment of High Temperature Components and Weldments**. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 50, p. 337-347, 1992.

PATIL, D. C.; DAS, M.; DAS, G.; KORI, S. A.; VENKATESWARLU, K. **Evaluating the Mechanical Properties of HPT Processed Aluminium Alloys Using Automated Ball-Indentation Technique**. *Procedia Materials Science*, 5, p. 379-386, 2014.

PAVLINA, E. J.; TYNE, C. J. **Correlation of Yield Strength and Tensile Strength with Hardness for Steels**. *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 17, p. 888-893, 2008.

RAMOS NETO, F. F.; CARDOSO, F. C.; SOARES, A. B.; FRANCO, S. D.; FRANCO, V. L. D. S.; PAES, M. T. P. **Instrumentação e Controle de um Macroindentador Portátil para Avaliação de Propriedades Mecânicas de Dutos**. In: *13º Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica*, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2003.

RAMOS NETO, F. F.; FILHO, B. G. S.; PAES, M. T. P.; FRANCO, S. D. **Gradientes de Propriedades Mecânicas em Estruturas de Condução de Petróleo**. In: *14º Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica*, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2004.

RO, D.; KIM, K.-h.; SONG, S.-m.; KWON, D. **Using the Instrumented Indentation Technique (IIT) on API Pipe**. *Proceedings of the Twentieth International Offshore and Polar Engineering Conference*, Beijing, China, 2010.

RODRIGUES, R. M. **Pesquisa Acadêmica: Como Facilitar o Processo de Preparação e suas Etapas**. São Paulo: Atlas S.A., 2007. 177 p.

RODRÍGUEZ, R.; GUTIERREZ, I. **Correlation Between Nanoindentation and Tensile Properties – Influence of the Indentation Size Effect**. *Materials Science and Engineering A361*, p. 377-384, 2003.

RODRÍGUEZ, J.; MANEIRO, M. A. G. **A Procedure to Prevent Pile up Effects on the Analysis of Spherical Indentation Data in Elastic-Plastic Materials**. *Mechanics of Materials*, 39, p. 987-997, 2007.

ROSADO, D. B. **Comparação do Efeito da Fragilização por Hidrogênio em Aços com Resistência à Tração Acima de 1000 MPa**. 2011, 92 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SCHÖN, C. G. **Mecânica dos Materiais: Fundamentos e Tecnologia do Comportamento Mecânico**. Editora Campus, 1ª ed., 2013. Rio de Janeiro.

SHARMA, K.; SINGH, P. K.; BHASIN, V.; VAZE, K. K. **Application of Automated Ball Indentation for Property Measurement of Degraded Zr2.5Nb**. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, v. 10, n° 7, p. 661-669, 2011a.

SHARMA, K.; BHASIN, V.; VAZE, K. K.; GHOSH, A. K. **Numerical Simulation with Finite Element and Artificial Neural Network of Ball Indentation for Mechanical Property Estimation**. *Sādhanā – Indian Academy of Sciences*, v. 36, part 2, p. 181-192, 2011b.

SILVA, A. L. V. C.; MEI, P. R. **Aços e Ligas Especiais**. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2006. 646 p.

SINTAP. **Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry. Sub-Task 2.1: The Significance of the Yield Stress/Tensile Stress Ratio to Structural Integrity**. 1996. Disponível em: <www.eurofitnet.org/sintap_BRITISH_STEEL_The_Significance_of_y-t_ratio.pdf>. Acesso em: 15/12/2014.

SINTAP. **Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry. Task 5: Recommendations from Y/T Working Group for SINTAP Procedure**. 1998. Disponível em: <www.eurofitnet.org/sintap_BRITISH_STEEL_BS-23.pdf>. Acesso em: 15/12/2014.

SINTAP. **Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry. Sub-Task 2.3: Yield Stress/Tensile Stress Ratio: Results of Experimental Programme**. 1999. Disponível em: <www.eurofitnet.org/sintap_BRITISH_STEEL_BS-25.pdf>. Acesso em: 15/12/2014.

SONG, P. S.; SHEU, G. L. **Retardation of Fatigue Crack Propagation by Indentation Technique**. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 79, p. 725-733, 2002.

SONG, W.-S.; CHOI, M.-J.; KIM, Y.-C.; KWON, D. **Using Instrumented Evaluation of Residual Stress Perpendicular to a Weld**. *Proceedings of Twentieth International Offshore and Polar Engineering Conference*, Beijing, China, 2010.

SOUSA, J. V.; SOARES, A. B.; FRANCO, S. D. **Controle e Interfaceamento de um Macroindentador Portátil para Avaliação *In-Situ* de Propriedades Mecânicas de Dutos Metálicos Utilizando DSP e Tecnologia Wireless.** In: *XVIII Congresso Brasileiro de Automática*, Bonito-MS, 12 a 16 de setembro, 2010.

SOUSA, J. V. **Desenvolvimento de um Sistema de Controle e Interfaceamento para um Macroindentador Portátil para Avaliação de Propriedades Mecânicas de Dutos Baseado em Tecnologias DSP e Wireless.** 2011, 137p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

SOUZA, S. A. **Composição Química dos Aços.** 1ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1989. 134 p.

STROE, M. E. **Hydrogen Embrittlement of Ferrous Materials.** Ph.D. Thesis. Department of Matter and Materials, Faculty of Applied Sciences, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium, 2006.

SUN, G.; XU, F.; LI, G.; HUANG, X.; LI, Q. **Determination of Mechanical Properties of the Weld Line by Combining Micro-Indentation with Reverse Modeling.** *Computational Materials Science*, 85, p. 347-362, 2014.

TABOR, D. **The Hardness and Strength of Metals.** *J. Inst. Metals*, v. 19, p. 1-18, 1951.

TALJAT, B.; ZACHARIA, T.; KOSEL, F. **New Analytical Procedure to Determine Stress-Strain Curve from Spherical Indentation Data.** *International Journal of Solids and Structures*, v. 35, No. 33, p. 4411-4426, 1998.

TALJAT, B.; PHARR, G. M. **Development of Pile-up During Spherical Indentation of Elastic-Plastic Solids.** *International Journal of Solids and Structures*, 41, p. 3891-3904, 2004.

TEKKAYA, A. E. **An Improved Relationship Between Vickers Hardness and Yield Stress for Cold Formed Materials and its Experimental Verification.** *Annals of the CIRP*, v. 49, 2000.

THOMPSON, A. W. **Selection of Structural Materials for Hydrogen Pipelines and Storage Vessels.** *International Journal of Hydrogen Energy*, 2, p. 163-173, 1977.

ULLNER, C. **Critical Points in ISO 14577 Part 2 and 3 Considering the Uncertainty in Measurement.** *Proceedings of HARDMEKO 2004*, Washington DC, USA, 11-12 November, 2004.

ULLNER, C.; REIMANN, E.; KOHLHOFF, H.; SUBARIC-LEITIS, A. **Effect and Measurement of the Machine Compliance in the Macro Range of Instrumented Indentation Test.** *Measurement*, 43, p. 216-222, 2010.

VANLANDINGHAM, M. R. **Review of Instrumented Indentation.** *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, v. 108, n° 4, p. 249-265, 2003.

VENKATESWARLU, K.; DAS, G.; PRAMANIK, A. K.; XU, C.; LANGDON, T. G. **Using Ball-Indentation to Evaluate the Properties of an Ultrafine-Grained Al-2% Si Alloy Processed by ECAP.** *Materials Science and Engineering A*, 427, p. 188-194, 2006.

V&M do BRASIL. **Catálogo OCTG.** Vallourec & Mannesmann Tubes, 2014.

VIM 2012 – **Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados.** Primeira edição Luso-Brasileira. *Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO)*, 2012. 95 p.

VON STEBUT, J.; LAPOSTOLLE, F.; BUCSA, M.; VALLEN, H. **Acoustic Emission Monitoring of Single Cracking Events and Associated Damage Mechanism Analysis in Indentation and Scratch Testing.** *Surface and Coatings Technology*, 116-119, p. 160-161, 1999.

XU, Y.; NING, G.; ZHANG, C.; YU, Q.; XU, Y. **Application of the Miniature Specimen Technique to Material Irradiation Tests and Surveillance for Reactor Components.** *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 77, p. 715-721, 2000.

YAMAMOTO, T.; KURISHITA, H.; MATSUSHIMA, T.; KAYANO, H. **Development of Innovative Indentation System and its Application to Cyclic Ball Indentation Test for Small-Sized Specimens.** *Journal of Nuclear Materials*, 239, p. 219-227, 1996.

YAMAMOTO, T.; KURISHITA, H.; MATSUI, H.; **Modeling of the Cyclic Ball Indentation Test for Small Specimens Using the Finite Element Method.** *Journal of Nuclear Materials*, 271-272, p. 440-444, 1999.

ZHANG, P.; LI, S. X.; ZHANG, Z. F. **General Relationship Between Strength and Hardness.** *Materials Science and Engineering A*, 529, p. 62-73, 2011.

ZHENG, J.; LIU, X.; XU, P.; LIU, P.; ZHAO, Y.; YANG, J. **Development of High Pressure Gaseous Hydrogen Storage Technologies.** *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, p. 1048-1057, 2012.

ANEXO I

CERTIFICADOS DE CALIBRAÇÃO DOS PENETRADORES

Certificado de calibração do penetrador esférico ($D = 1,5 \text{ mm}$).

DEUTSCHER KALIBRIERDIENST **DKD**

Kalibrierlaboratorium für Härtevergleichsplatten und Eindringkörper für die Härteprüfung
Calibration laboratory for hardness reference blocks and indenters for hardness test

Akkreditiert durch / accredited by

Akkreditierungsstelle des DKD bei der

PHYSIKALISCH-TECHNISCHEN BUNDESANSTALT (PTB)



MPA NRW.
Materialprüfungsamt Nordrhein-Westfalen
PRÜFEN · ÜBERWACHEN · ZERTIFIZIEREN

Deutscher
Akkreditierungs-
Rat
DAR
DKD-K-06301

Kalibrierschein
Calibration Certificate

Kalibrierzeichen
Calibration label

WK1,5 1
DKD-K-06301
2005 - 7

Gegenstand
Object Hartmetallkugel

Hersteller
Manufacturer DIXI GmbH

Typ
Type HL40

Fabrikat/Serien-Nr.
Serial number

Auftraggeber
Customer Stiefelmayer

Auftragsnummer
Order No. 430008837

Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines
Number of pages of the certificate 2

Datum der Kalibrierung
Date of calibration 13.7.2005

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI).

Der DKD ist Unterzeichner der multilateralen Übereinkommen der European co-operation for Accreditation (EA) und der International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) zur gegenseitigen Anerkennung der Kalibrierscheine.

Für die Einhaltung einer angemessenen Frist zur Wiederholung der Kalibrierung ist der Benutzer verantwortlich.

This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).

The DKD is signatory to the multilateral agreements of the European co-operation for Accreditation (EA) and of the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of calibration certificates.

The user is obliged to have the object recalibrated at appropriate intervals.

Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Änderungen bedürfen der Genehmigung sowohl der Akkreditierungsstelle des DKD als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit.

This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the Accreditation Body of the DKD and the issuing laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.



Stempel
Seal

Datum
Date

Stellv.
Leiter des Kalibrierlaboratoriums
Head of the calibration laboratory

Bearbeiter
Person in charge

Dieser Kalibrierschein wurde über EDV erstellt und gilt ohne Unterschrift.

This certificate was produced by EDP and is valid without signature.

13.7.2005

gez. Dipl.-Masch.-Ing. Schwenk

MPA NRW · Marsbruchstraße 186 · D-44287 Dortmund · Telefon +49(0) 231 4502 440 · Fax +49(0) 231 4502 666 · E-Mail: schwenk@mpanrw.de
Informationen und ein Programm zur periodischen Prüfung von Härteprüfmaschinen
und zur Bestimmung der Messunsicherheit stehen für Sie bereit unter der URL:

www.mpanrw.de/crm

Certificado de calibração do penetrador esférico ($D = 1,5 \text{ mm}$) – continuação.



MPA NRW.
Materialprüfungsamt Nordrhein-Westfalen
PRÜFEN · ÜBERWACHEN · ZERTIFIZIEREN

MPA NRW · Marsbruchstraße 186 · D-44287 Dortmund · Telefon +49(0) 231 4502 440 · Fax +49(0) 231 4502 666 · E-Mail: schwenk@mpanrw.de

Kalibrierschein / Certificate / Certificat 430008837 WK1,5 1 2005-7

Über die Kalibrierung einer Prüfkugel aus Hartmetall nach DIN EN ISO 6506-2 für Härteprüfungen nach Brinell /
Regarding calibration of a hardmetal ball according to standard DIN EN ISO 6506-2 for hardness test Brinell /
De l'étalonnage d'une bille de métal dur selon norme DIN EN ISO 6506-2 pour essai de dureté Brinell /

Zeichen der Kalibrierstelle
Sign of the calibration institute
Signe de l'institut d'étalonnage

MPA NRW WK1,5 1 2005-7

Kennzeichen des Herstellers / Sign of the producer / Marque de producteur: -

Kalibrierbedingungen / Calibration Conditions / Conditions d'étalonnage

Feinzeigermeßschraube / micrometer screw / vis micrométrique
Mikroskop / microscope / microscope

Prüftemperatur / Temperature / Température: $21^\circ + 1,5^\circ$ Celsius

Ergebnisse der Kalibrierung / Results of the calibration / Résultats de l'étalonnage

Härte der Referenzkugel / hardness of the reference ball / dureté de la bille de référence 1603 HV10
(Sollwert nach/ nominal value according to/ valeur nominale selon DIN EN ISO 6506-2 Härte/ hardness/ dureté $\geq 1500 \text{ HV10}$)

Masse der Kugel / Mass of the ball / masse de la bille ($0,0263 \pm 0,0002$) g
(Berechneter Sollwert / calculated value / valeur calculée $0,0262 \text{ g}$)

Einzelmeßwerte der Mesungen / Single test values / Valeurs particulières

Längen der in 5 Richtungen durchgeführten Messung der Durchmesser/ Lengths of the Diameters measured in 5 directions
Longeurs des diamètres mesurés en 5 directions

No.	1	2	3	4	5
d mm	1.4995	1.4999	1.4997	1.4995	1.4996

Mittelwert / mean value / valeur moyenne (1.4996 ± 0.001) mm

Sollwert / nominal value / valeur nominal 1,5 mm

Spannweite / range / répétabilité 0.0004 mm
Maximale Abweichung / maximum deviation / déviation maximale 0.0003 mm

Meßunsicherheit / uncertainty of measurement / incertitude de mesurage 2-Sigma $1,0 \mu\text{m}$

Datum der Kalibrierung / date of calibration / date d'étalonnage
D 44287 Dortmund, 13.7.2005

Certificado de calibração do penetrador esférico ($D = 1,0 \text{ mm}$).

DEUTSCHER KALIBRIERDIENST **DKD**

Kalibrierlaboratorium für Härtevergleichsplatten und Eindringkörper für die Härteprüfung
Calibration laboratory for hardness reference blocks and indenters for hardness test

Akkreditiert durch / accredited by

Akkreditierungsstelle des DKD bei der

PHYSIKALISCH-TECHNISCHEN BUNDESANSTALT (PTB)



MPA NRW.
Materialprüfungsamt Nordrhein-Westfalen
PRÜFEN • ÜBERWACHEN • ZERTIFIZIEREN



DKD-K-06301

Kalibrierschein
Calibration Certificate

Kalibrierzeichen
Calibration label

WK1,0 44
DKD-K-06301
2005 - 7

Gegenstand Object	Hartmetallkugel
Hersteller Manufacturer	DIXI GmbH
Typ Type	HL40
Fabrikat/Serien-Nr. Serial number	DI1,0Los2/2000
Auftraggeber Customer	Stiefelmayer
Auftragsnummer Order No.	430008837
Anzahl der Seiten des Kalibrierscheines Number of pages of the certificate	2
Datum der Kalibrierung Date of calibration	13.7.2005

Dieser Kalibrierschein dokumentiert die Rückführung auf nationale Normale zur Darstellung der Einheiten in Übereinstimmung mit dem Internationalen Einheitensystem (SI).

Der DKD ist Unterzeichner der multilateralen Übereinkommen der European co-operation for Accreditation (EA) und der International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) zur gegenseitigen Anerkennung der Kalibrierscheine.

Für die Einhaltung einer angemessenen Frist zur Wiederholung der Kalibrierung ist der Benutzer verantwortlich.

This calibration certificate documents the traceability to national standards, which realize the units of measurement according to the International System of Units (SI).

The DKD is signatory to the multilateral agreements of the European co-operation for Accreditation (EA) and of the International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC) for the mutual recognition of calibration certificates.

The user is obliged to have the object recalibrated at appropriate intervals.

Dieser Kalibrierschein darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Änderungen bedürfen der Genehmigung sowohl der Akkreditierungsstelle des DKD als auch des ausstellenden Kalibrierlaboratoriums. Kalibrierscheine ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit.

This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of both the Accreditation Body of the DKD and the issuing laboratory. Calibration certificates without signature and seal are not valid.



Datum Date	Stellv. Head of the calibration laboratory	Bearbeiter Person in charge
---------------	---	--------------------------------

Dieser Kalibrierschein wurde über EDV erstellt und gilt ohne Unterschrift.

This certificate was produced by EDP and is valid without signature.

13.7.2005 gez. Dipl.-Masch.-Ing. Schwenk

MPANRW · Marsbruchstraße 186 · D-44287 Dortmund · Telefon +49(0) 231 4502 440 · Fax +49(0) 231 4502 666 · E-Mail: schwenk@mpanrw.de
Informationen und ein Programm zur periodischen Prüfung von Härteprüfmaschinen
und zur Bestimmung der Messunsicherheit stehen für Sie bereit unter der URL:

www.mpanrw.de/crm

Certificado de calibração do penetrador esférico ($D = 1,0 \text{ mm}$) – continuação.



MPA NRW · Marsbruchstraße 186 · D-44287 Dortmund · Telefon +49(0) 231 4502 440 · Fax +49(0) 231 4502 666 · E-Mail: schwenk@mpanrw.de

Kalibrierschein / Certificate / Certificat 430008837 WK1,0 44 2005-7

Über die Kalibrierung einer Prüfkugel aus Hartmetall nach DIN EN ISO 6506-2 für Härteprüfungen nach Brinell /
Regarding calibration of a hardmetal ball according to standard DIN EN ISO 6506-2 for hardness test Brinell /
De l'étalonnage d'une bille de métal dur selon norme DIN EN ISO 6506-2 pour essai de dureté Brinell /

Zeichen der Kalibrierstelle
Sign of the calibration institute
Signe de l'institut d'étalonnage

MPA NRW WK1,0 44 2005-7

Kennzeichen des Herstellers / Sign of the producer / Marque de producteur: -

Kalibrierbedingungen / Calibration Conditions / Conditions d'étalonnage

Feinzeigermeßschraube / micrometer screw / vis micrométrique
Mikroskop / microscope / microscope

Prüftemperatur / Temperature / Température: $21^\circ + 1,5^\circ$ Celsius

Ergebnisse der Kalibrierung / Results of the calibration / Résultats de l'étalonnage

Härte der Referenzkugel / hardness of the reference ball / dureté de la bille de référence 1539 HV10
(Sollwert nach/ nominal value according to/ valeur nominale selon DIN EN ISO 6506-2 Härte/ hardness/ dureté $\geq 1500 \text{ HV10}$)

Masse der Kugel / Mass of the ball / masse de la bille $(0,0079 \pm 0,0002) \text{ g}$
(Berechneter Sollwert / calculated value / valeur calculée $0,0079 \text{ g}$)

Einzelmeßwerte der Messungen / Single test values / Valeurs particulières

Längen der in 5 Richtungen durchgeführten Messung der Durchmesser/ Lengths of the Diameters measured in 5 directions
Longeurs des diamètres mesurés en 5 directions

No.	1	2	3	4	5
d mm	1.0002	1.0000	1.0001	1.0000	0.9999

Mittelwert / mean value / valeur moyenne $(1.0000 \pm 0.001) \text{ mm}$

Sollwert / nominal value / valeur nominal 1,0 mm

Spannweite / range / répétabilité 0.0003 mm

Maximale Abweichung / maximum deviation / déviation maximale 0.0002 mm

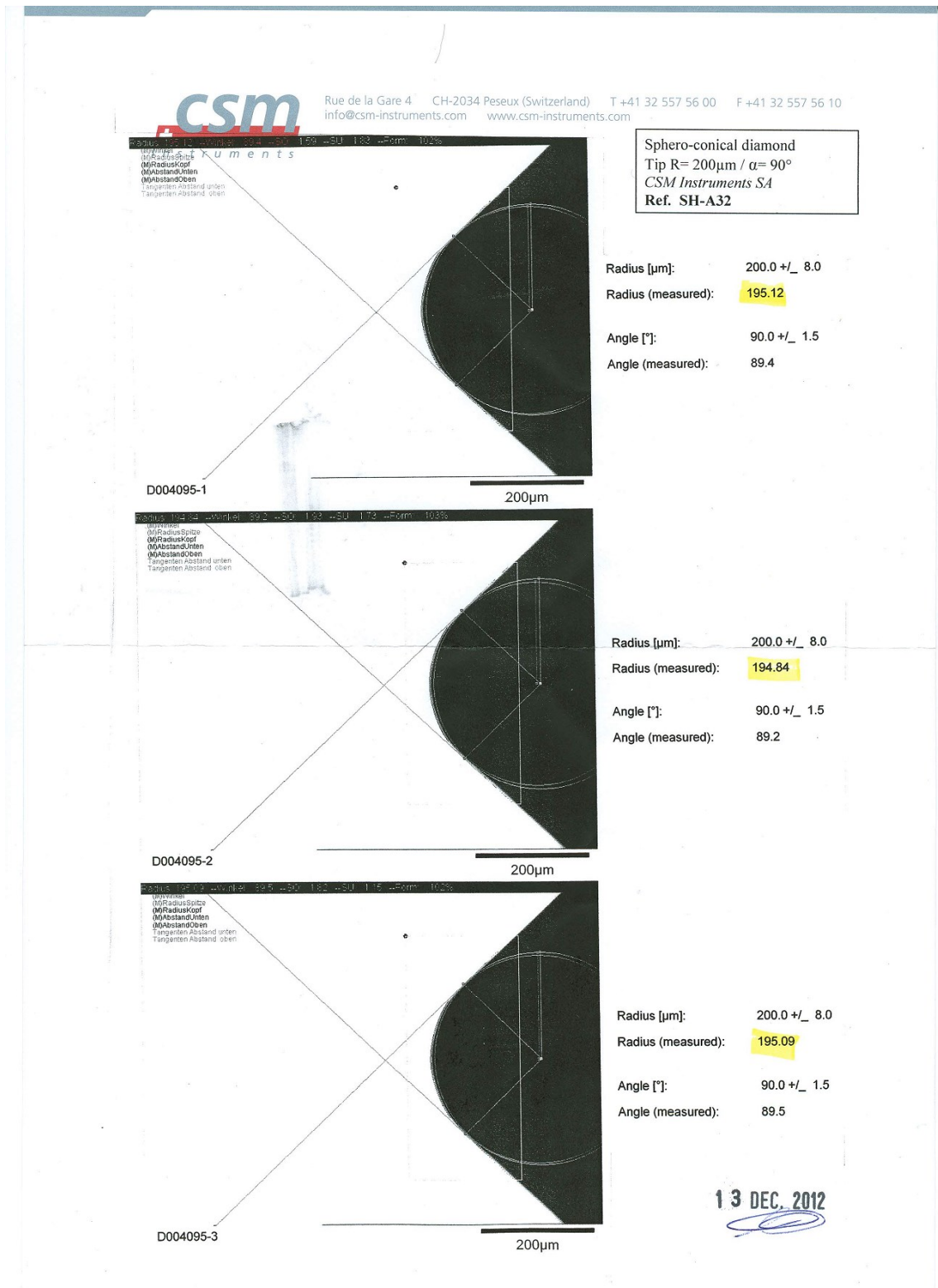
Meßunsicherheit / uncertainty of measurement / incertitude de mesurage 2-Sigma $1,0 \mu\text{m}$

Datum der Kalibrierung / date of calibration / date d'étalonnage

D 44287 Dortmund, 13.7.2005



Certificado de calibração do penetrador esferocônico ($D = 400 \mu\text{m}$).



APÊNDICE I

RELAÇÃO DE CONSIDÈRE

A Figura Al.1 mostra uma representação esquemática das curvas “tensão *versus* deformação” real e de engenharia de um aço.

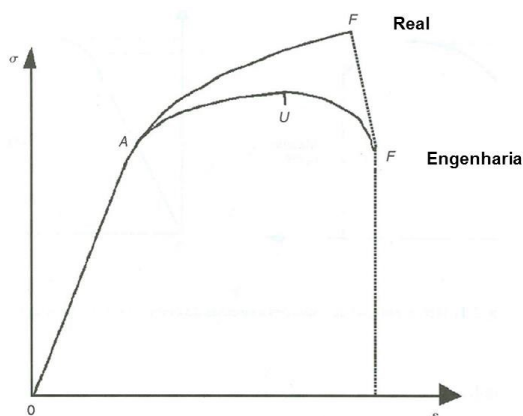


Figura Al.1 – Curvas “tensão *versus* deformação” real e de engenharia (GARCIA *et al.*, 2008).

Na curva de engenharia, a tensão convencional (σ_c) e a deformação convencional (ε_c) são dadas, respectivamente, por:

$$\sigma_c = \frac{P}{S_0} \quad (\text{Al.1})$$

$$\varepsilon_c = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (\text{Al.2})$$

Onde: P é a força aplicada (N), S_0 é a área da seção transversal original (m²), l_0 é o comprimento inicial de referência do corpo de prova de tração (m) e l é o comprimento de referência para a força P aplicada (m).

Já para a curva real, a tensão real (σ_r) e a deformação real (ε_r) são dadas, respectivamente, por:

$$\sigma_r = \frac{P}{S} \quad (\text{Al.3})$$

$$d\varepsilon_r = \frac{dl}{l} = -\frac{dS}{S} \rightarrow \varepsilon_r = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \frac{S_0}{S} \quad (\text{Al.4})$$

Onde: S é a área da seção transversal instantânea (m^2).

A tensão real e a deformação real podem ser determinadas a partir da tensão convencional e da deformação convencional através das seguintes relações:

$$\sigma_r = \sigma_c (1 + \varepsilon_c) \quad (\text{Al.5})$$

$$\varepsilon_r = \ln(1 + \varepsilon_c) \quad (\text{Al.6})$$

A curva “tensão real *versus* deformação real” pode ser representada pelas seguintes relações:

- Na região elástica (OA): $\sigma_r = E \cdot \varepsilon_r$ (Al.7)

- Na região plástica (AU): $\sigma_r = K \cdot \varepsilon_r^n$ (Al.8)

Onde: E é o módulo de elasticidade, K é o coeficiente de resistência e n é o expoente de encruamento do material. A Eq. (Al.8) é denominada de Equação de Hollomon.

A princípio, apenas a parcela plástica da deformação real ($\varepsilon_{r/p}$) é considerada na Eq. (Al.8). Porém, na maioria dos casos a parcela elástica é desprezível e, portanto, $\varepsilon_{r/p} \approx \varepsilon_r$ (SCHÖN, 2013).

O expoente de encruamento (n) pode ser determinado a partir da região de deformação plástica da curva real. Na região plástica, a Eq. (Al.8) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$P = SK\varepsilon_r^n \quad (\text{Al.9})$$

A diferenciação da Eq. (Al.9) leva a:

$$dP = K(Sn\varepsilon_r^{n-1}d\varepsilon_r + \varepsilon_r^n dS) \quad (\text{Al.10})$$

Mas, da Eq. (Al.4), tem-se:

$$d\varepsilon_r = -\frac{dS}{S} \quad (\text{Al.11})$$

Isolando dS e substituindo na Eq. (Al.10), chega-se a:

$$dP = K(Sn\epsilon_r^{n-1}d\epsilon_r - S\epsilon_r^n d\epsilon_r) \quad (\text{Al.12})$$

No ponto U da curva “tensão *versus* deformação” há um ponto de inflexão correspondente à máxima força, ou seja, $dP = 0$. Assim, da Eq. (Al.12), tem-se:

$$n\epsilon_{r_U}^{n-1} = \epsilon_{r_U}^n \quad (\text{Al.13})$$

Ou seja:

$$n = \epsilon_{r_U} \quad (\text{Al.14})$$

Portanto, o coeficiente de encruamento corresponde à deformação real no ponto de máxima força do diagrama “tensão *versus* deformação” (GARCIA *et al.*, 2008) e, conseqüentemente, n está intimamente associado ao alongamento uniforme. A Eq. (Al.14) é conhecida como relação de Considère (SCHÖN, 2013).

Deve-se atentar, entretanto, que a verificação experimental da Eq. (Al.14) depende da hipótese de que o comportamento mecânico do material é ditado pela Equação de Hollomon (Eq. (Al.8)), o que não é necessariamente verdade para a maioria dos materiais (SCHÖN, 2013).

Em conseqüência, a tensão real no ponto U (σ_{r_U}) pode ser escrita como:

$$\sigma_{r_U} = K.\epsilon_{r_U}^n \rightarrow \sigma_{r_U} = K.n^n \quad (\text{Al.15})$$

Mas, a partir da Eq. (Al.6), tem-se que:

$$\epsilon_{r_U} = \ln(1 + \epsilon_{c_U}) \rightarrow 1 + \epsilon_{c_U} = e^{\epsilon_{r_U}} \rightarrow 1 + \epsilon_{c_U} = e^n \quad (\text{Al.16})$$

E da Eq. (Al.5), chega-se a:

$$\sigma_{r_U} = \sigma_{c_U} (1 + \epsilon_{c_U}) \quad (\text{Al.17})$$

Substituindo a Eq. (Al.16) na Eq. (Al.17), tem-se:

$$\sigma_{r_U} = \sigma_{c_U} . e^n \quad (\text{Al.18})$$

Por fim, substituindo a Eq. (Al.15) na Eq.(1.18), tem-se:

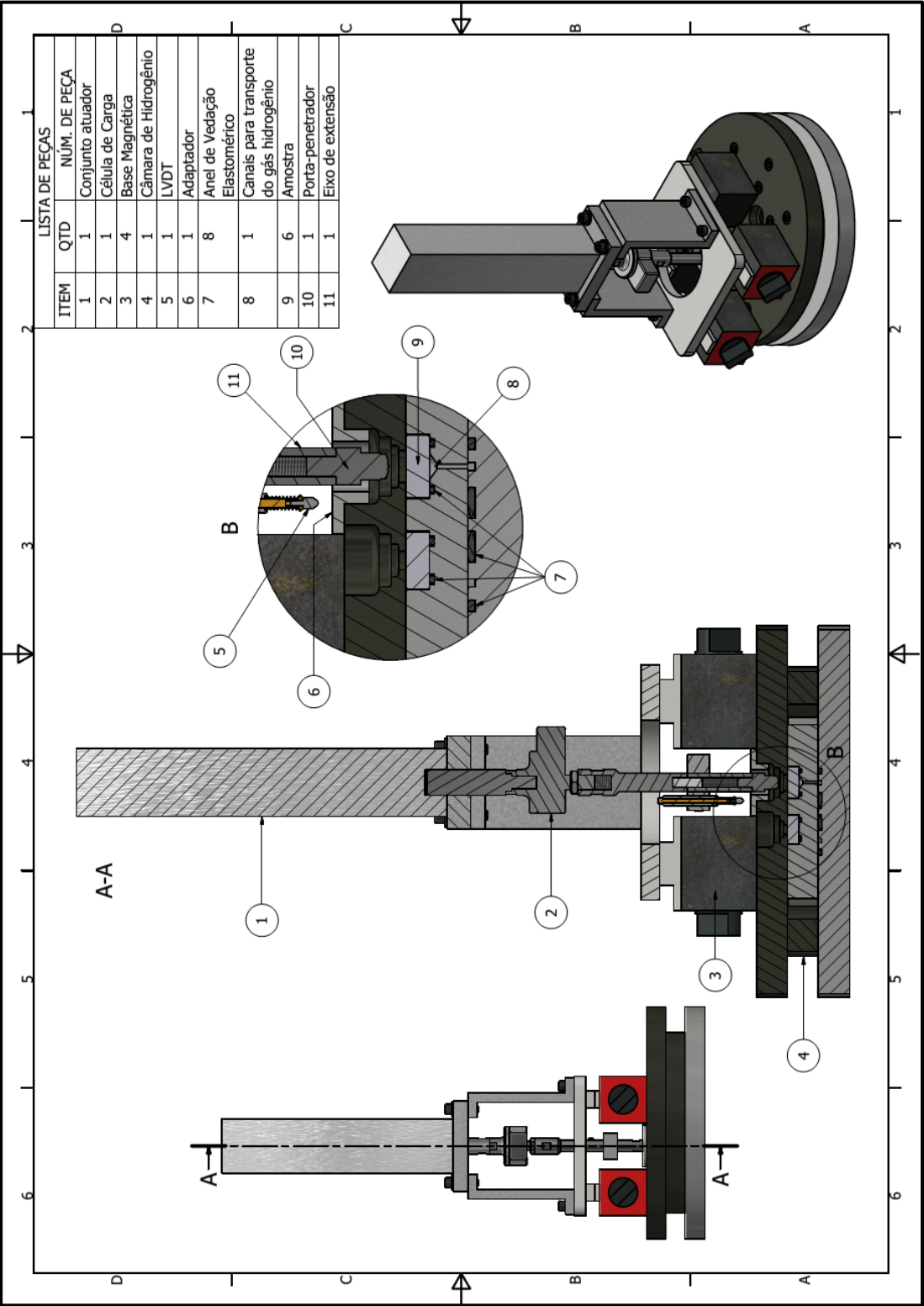
$$\sigma_{c_U} . e^n = K.n^n \rightarrow \sigma_{c_U} = K.\left(\frac{n}{e}\right)^n \quad (\text{Al.19})$$

Onde: $\sigma_{c_U} = \sigma_{UTS}$, ou seja, o limite de resistência à tração (de engenharia).

APÊNDICE II

ADAPTAÇÃO DO *PROPINSITU 2*

Adaptação do *PropInSitu 2* para realização de ensaios na câmara de hidrogenação.



APÊNDICE III

ANÁLISE MICROESTRUTURAL

Aço “A”:

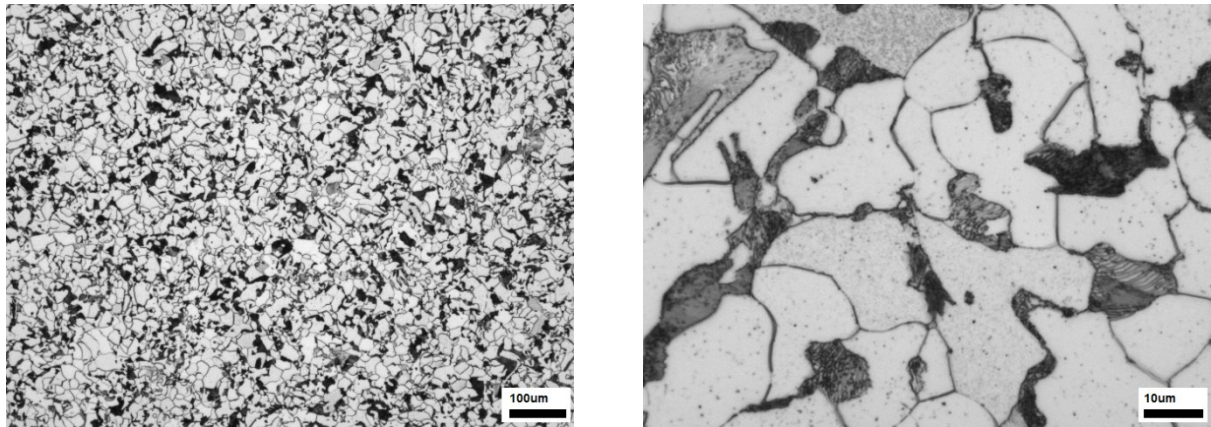


Figura AIII.1 – Fotomicrografias (MO) do aço “A” mostrando a microestrutura composta por ferrita equiaxial + perlita (ataque químico: Nital 6% - 5 segundos).

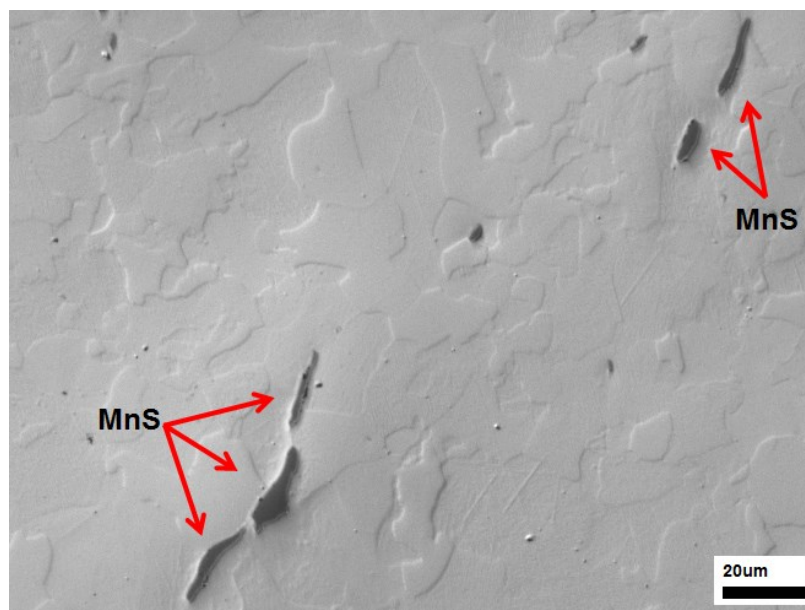


Figura AIII.2 – Fotomicrografia (MO) do aço “A” mostrando a presença de inclusões de MnS (sem ataque químico).

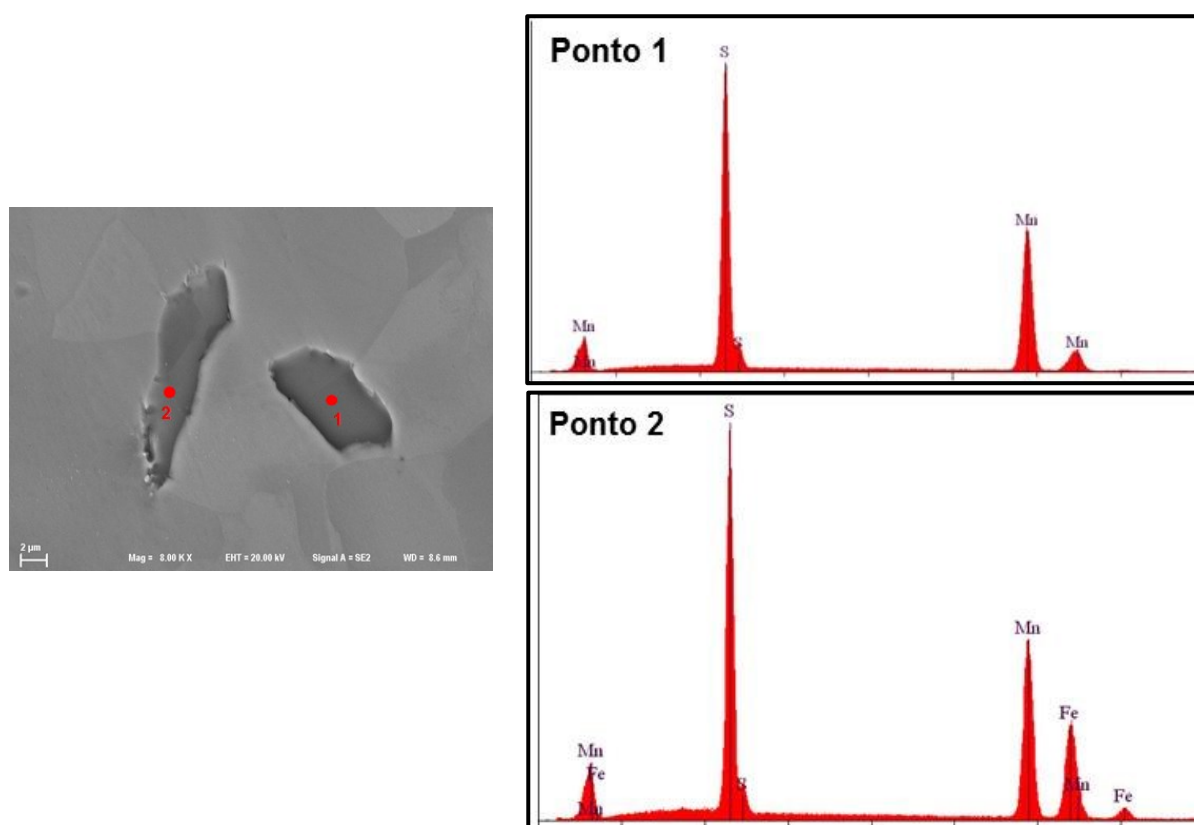


Figura AIII.3 – Imagem de elétrons secundários obtida em MEV e espectros de EDS de inclusões de sulfeto de manganês (MnS) presentes no aço “A” (sem ataque químico).

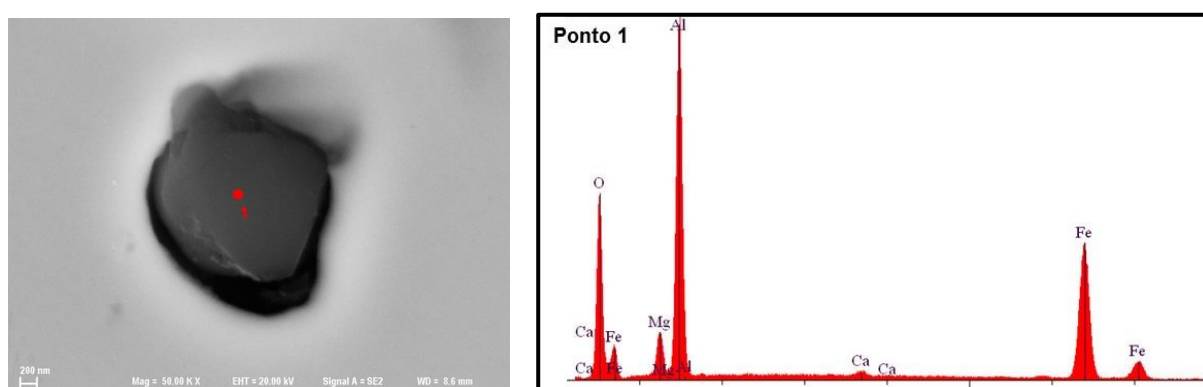


Figura AIII.4 – Imagem de elétrons secundários obtida em MEV e espectros de EDS de inclusão não-metálica de óxido complexo presente no aço “A” (sem ataque químico).

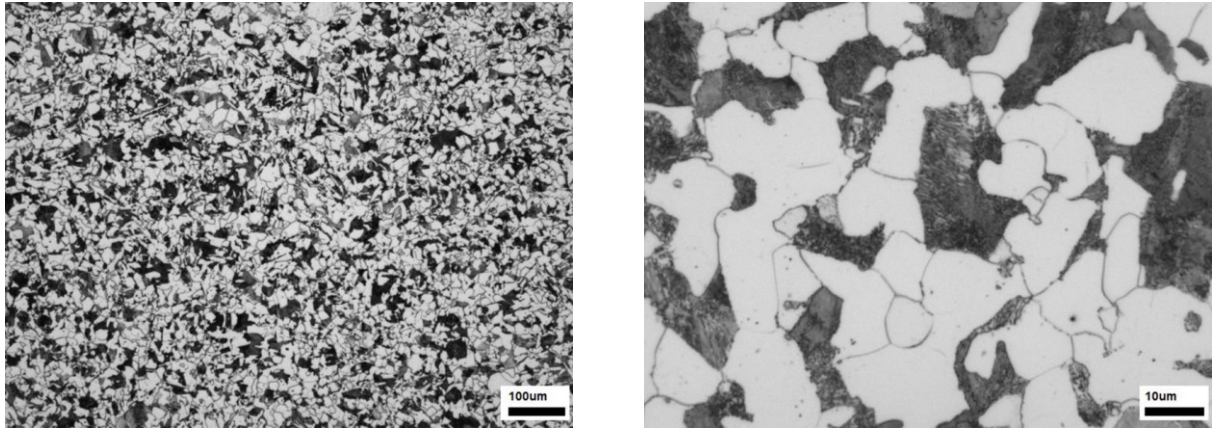
Aço “B”:

Figura AIII.5 – Fotomicrografias (MO) do aço “B” mostrando a microestrutura composta por ferrita equiaxial + perlita (ataque químico: Nital 6% - 5 segundos).

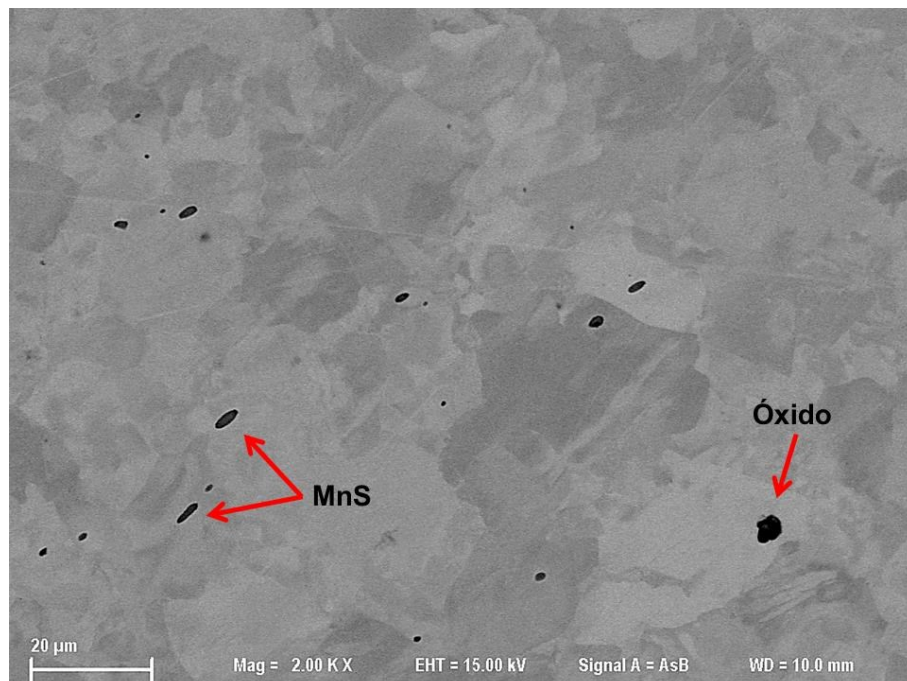


Figura AIII.6 – Imagem de elétrons retroespalhados obtida em MEV mostrando a presença de inclusões de sulfeto de manganês (MnS) e de óxidos no aço “B” (sem ataque químico).

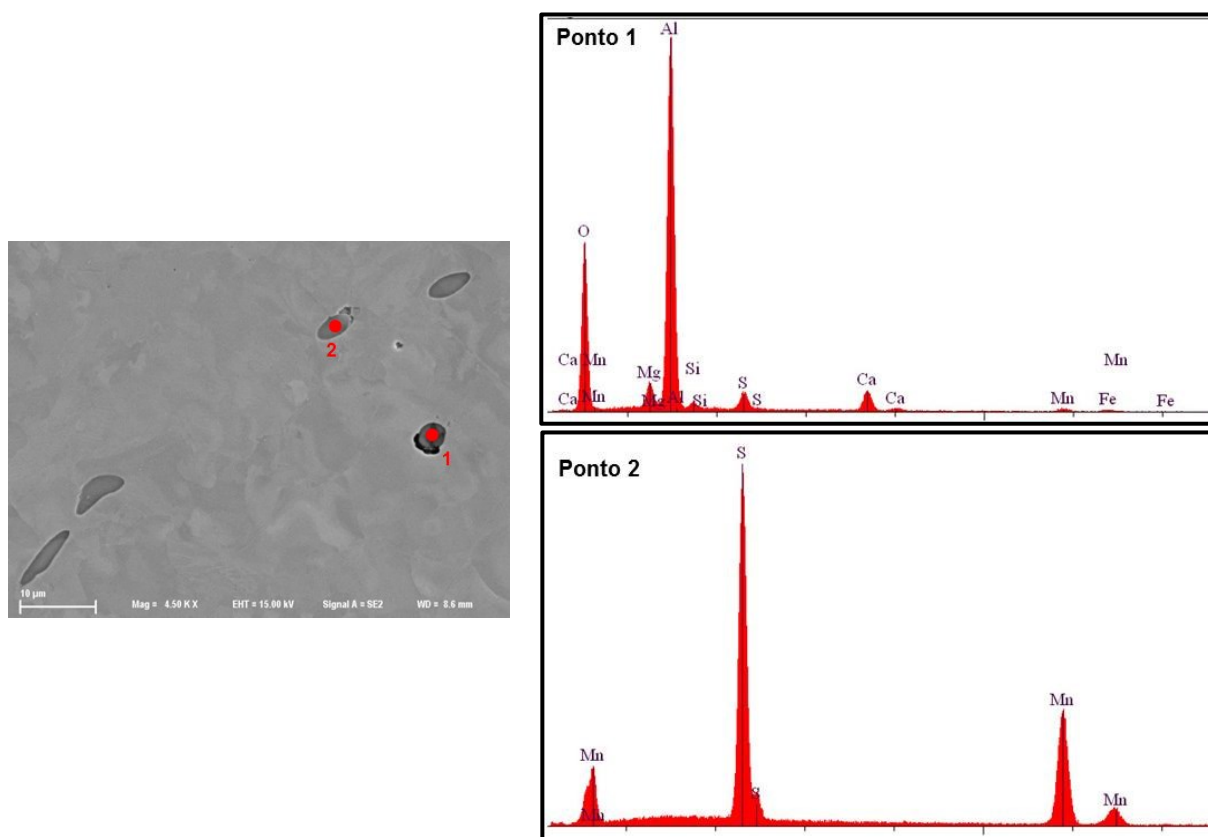


Figura AIII.7 – Imagem de elétrons secundários obtida em MEV e espectros de EDS de inclusões de oxissulfetos (ponto 1) e de sulfeto de manganês (ponto 2) presentes no aço “B” (sem ataque químico).

Aço “C”:

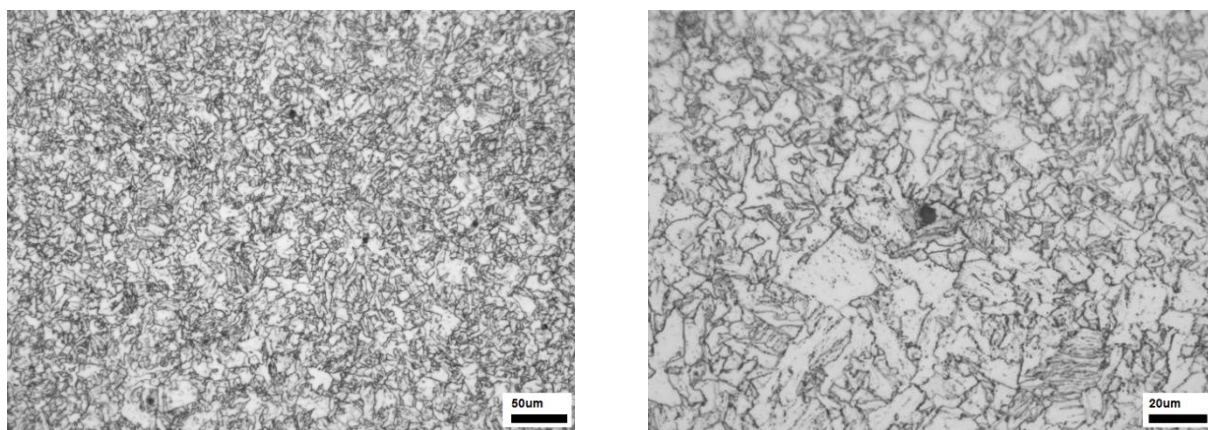


Figura AIII.8 – Fotomicrografias (MO) do aço “C” mostrando a microestrutura composta basicamente por ferrita (ataque químico: Nital 6% - 10 segundos). Na imagem à direita, é possível observar algumas regiões com grãos equiaxiais e outras que apresentam alguma acicularidade.

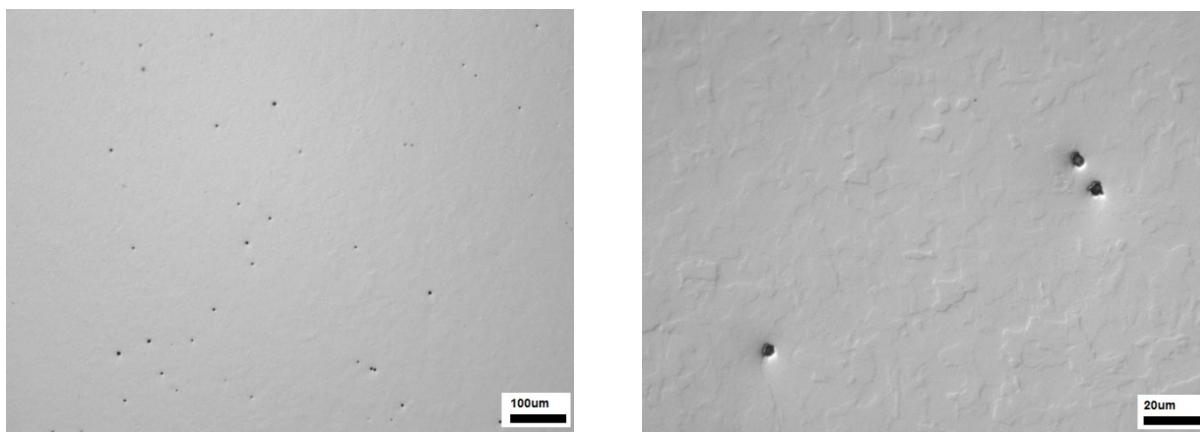


Figura AIII.9 – Fotomicrografias (MO) do aço “C” mostrando a presença de inclusões não metálicas complexas (pontos negros), compostas por oxisulfetos (sem ataque químico).

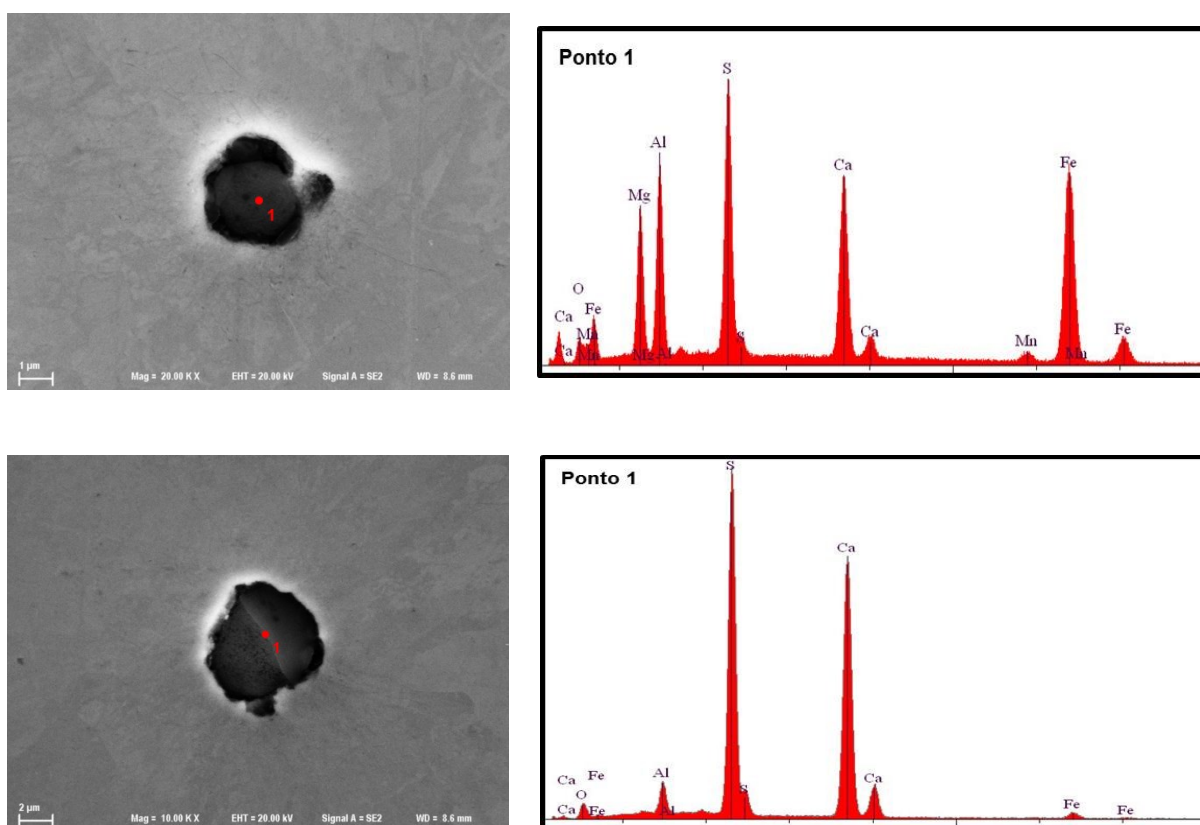


Figura AIII.10 – Imagens de elétrons secundários obtidas em MEV e espectros de EDS de inclusões não metálicas complexas de oxisulfetos (ponto 1) e sulfeto de cálcio (ponto 2) presentes no aço “C” (sem ataque químico).

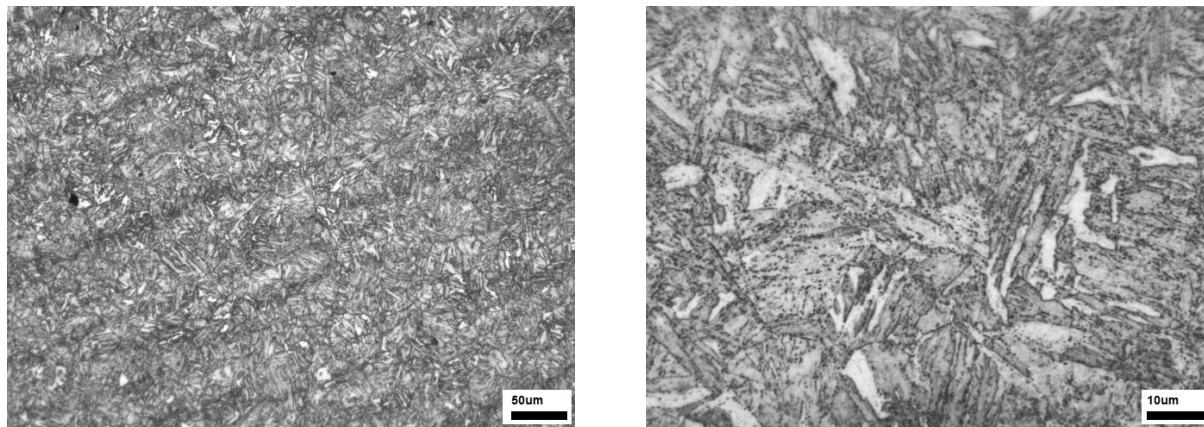
Aço “D”:

Figura AIII.11 – Fotomicrografias (MO) do aço “D” mostrando a microestrutura composta basicamente por martensita revenida (ataque químico: Nital 6% - 10 segundos). Na figura à direita, as regiões mais claras sugerem a presença de grãos de ferrita dispersos na matriz de martensita.

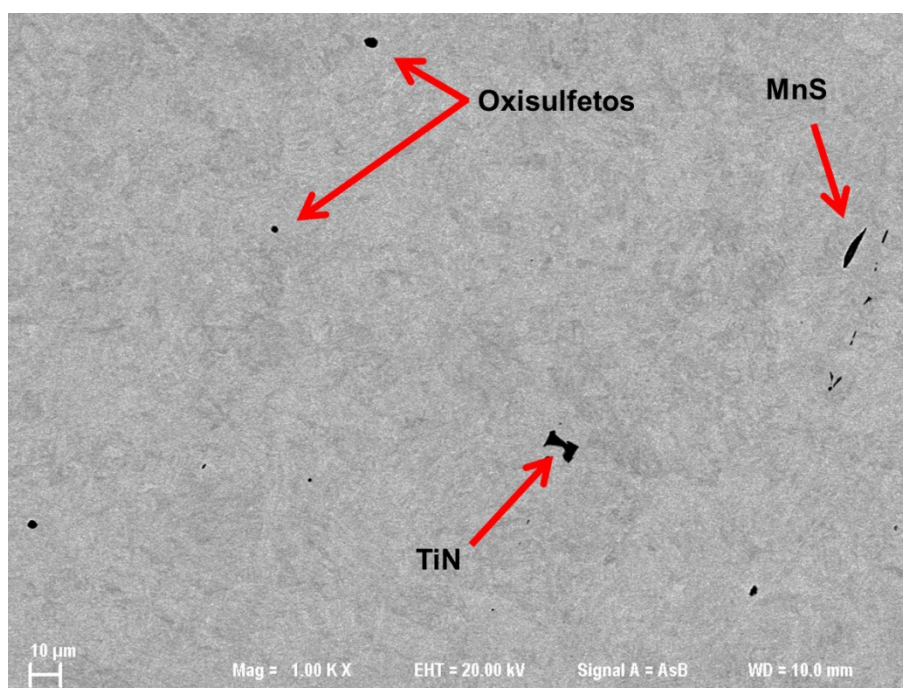


Figura AIII.12 – Imagem de elétrons retroespalhados obtida em MEV mostrando a presença de inclusões de sulfeto de manganês (MnS), nitreto de titânio (TiN) e oxisulfetos no aço “D” (sem ataque químico).

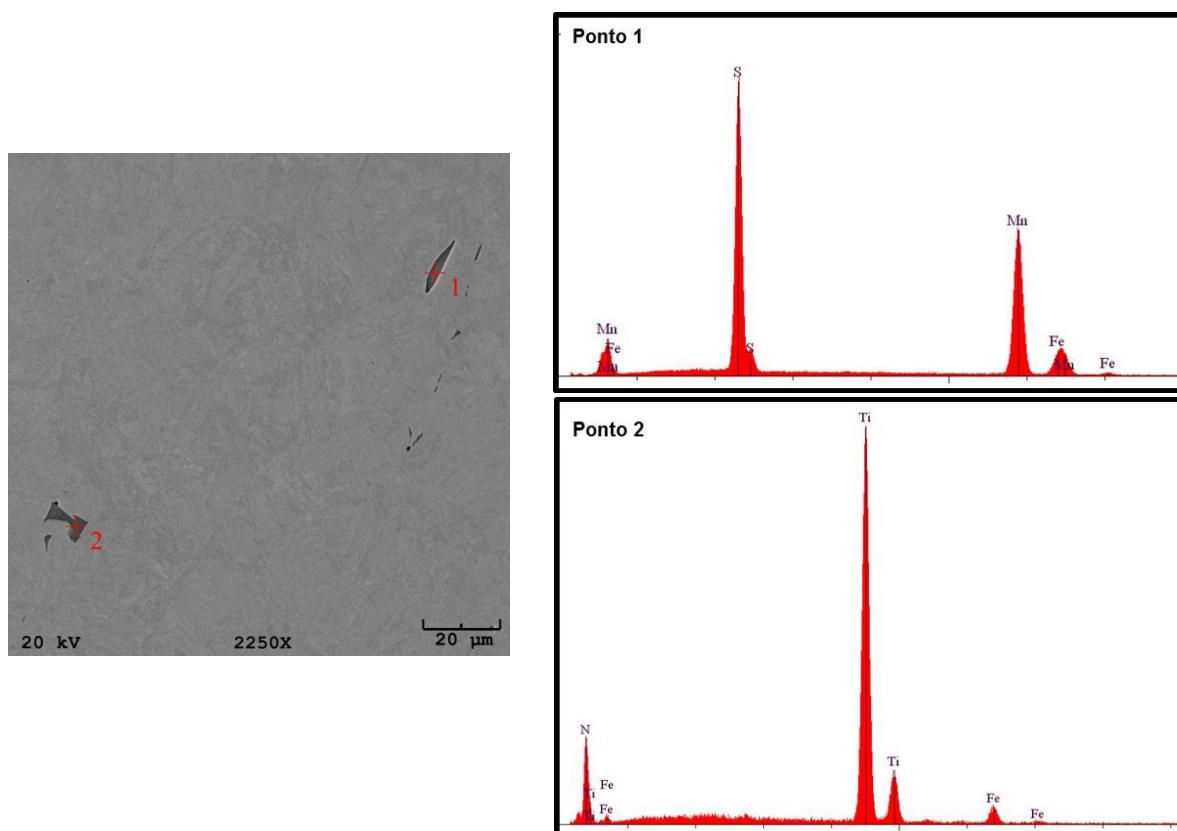


Figura AIII.13 – Imagem de elétrons secundários obtida em MEV e espectros de EDS de inclusões de sulfeto de manganês (MnS) (ponto 1) e nitreto de titânio (TiN) (ponto 2) presentes no aço “D” (sem ataque químico).

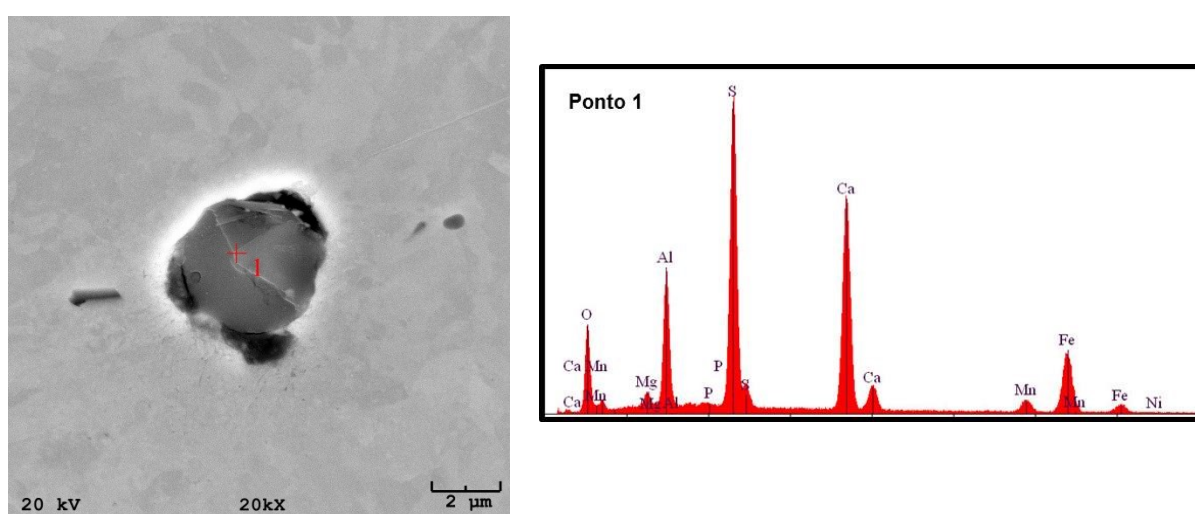


Figura AIII.14 – Imagem de elétrons secundários obtida em MEV e espectro de EDS de inclusão não metálica complexa de oxissulfetos e sulfeto de cálcio presente no aço “D” (sem ataque químico).

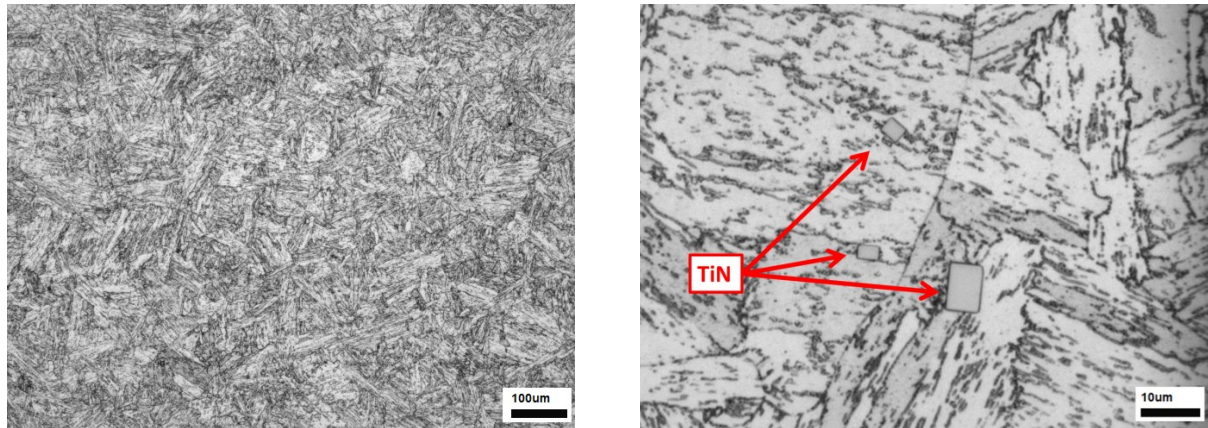
Aço “E”:

Figura AIII.15 – Fotomicrografias (MO) do aço “E” mostrando a microestrutura composta basicamente por martensita (ataque químico: Vilela - 60 segundos). Na figura à direita estão indicadas três inclusões de nitreto de titânio (TiN).

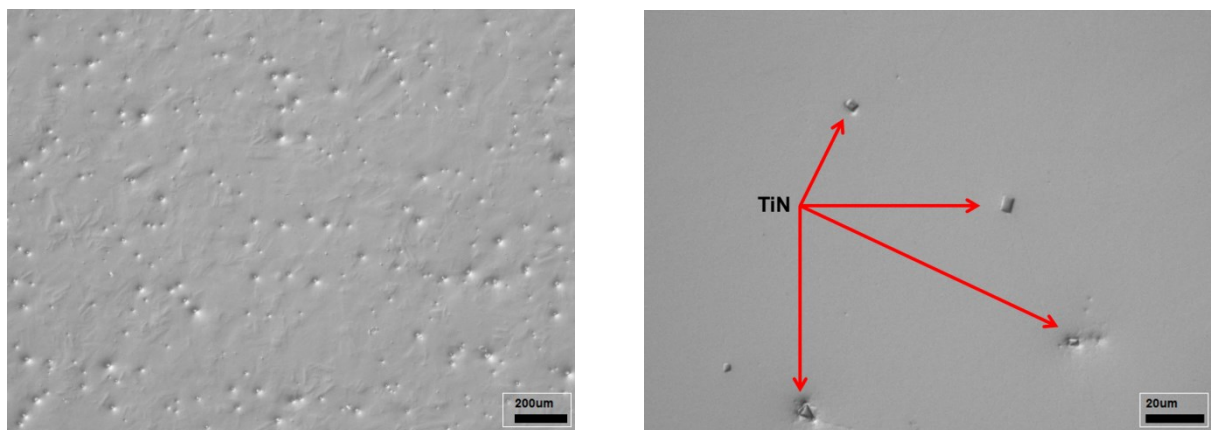


Figura AIII.16 – Fotomicrografias (MO) do aço “E” mostrando a presença de inclusões de nitreto de titânio (TiN) (sem ataque químico).

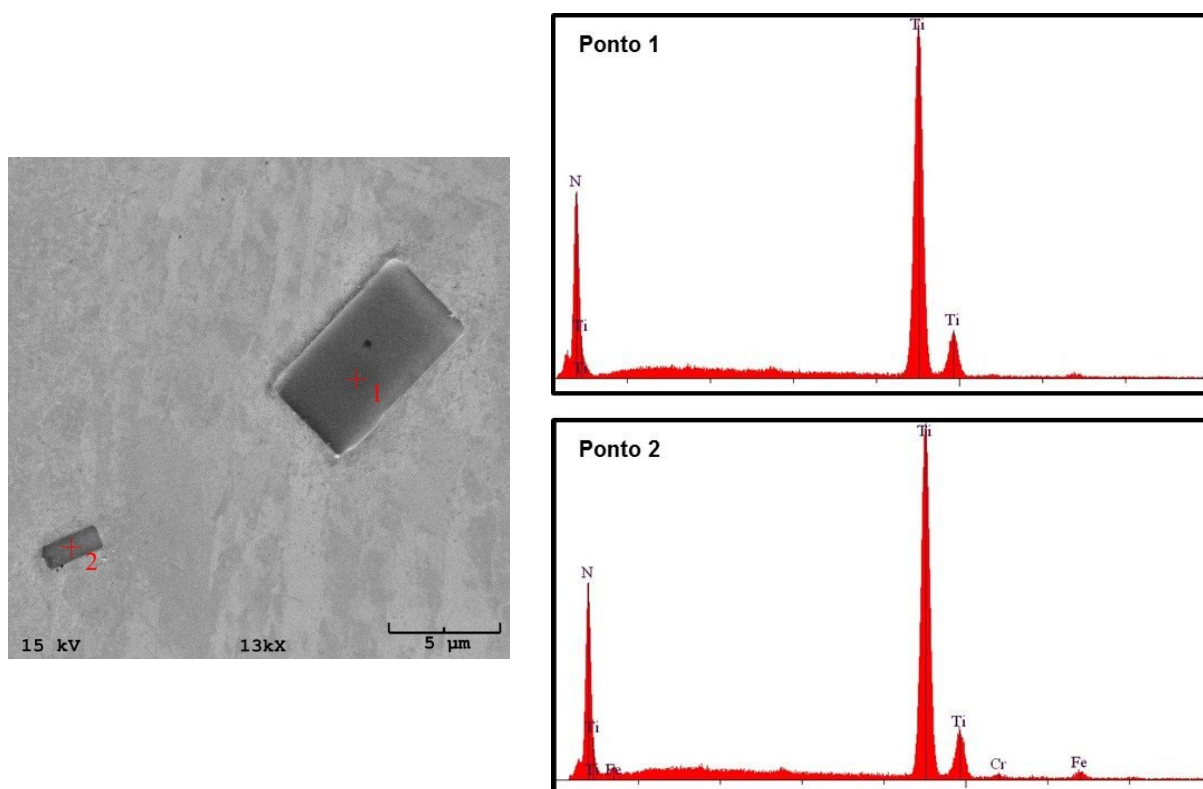


Figura AIII.17 – Imagem de elétrons secundários obtida em MEV e espectros de EDS de inclusões de nitreto de titânio (TiN) presentes no aço “E” (sem ataque químico).

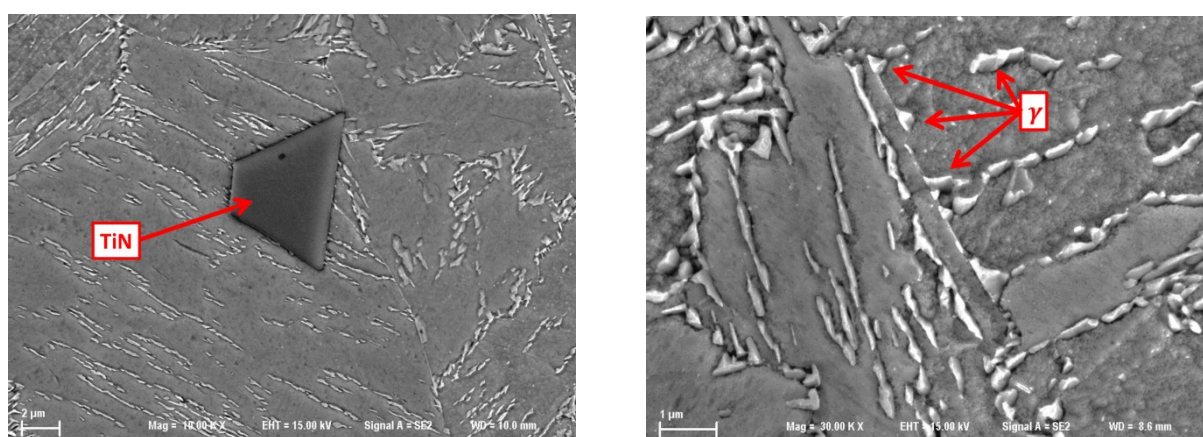


Figura AIII.18 – Imagens de elétrons secundários obtidas em MEV mostrando detalhes da microestrutura do aço “E” (ataque químico: Vilela - 60 segundos). A figura à esquerda destaca a presença de um nitreto de titânio (TiN). A imagem à direita, em conjunto com o resultado da difração de raios-X (Fig. 4.4) e a referência bibliográfica utilizada (BILMES; SOLARI; LLORENTE, 2001), sugere a presença de pequenas plaquetas de austenita distribuídas entre as ripas de martensita e ao longo dos antigos contornos de grão austeníticos.

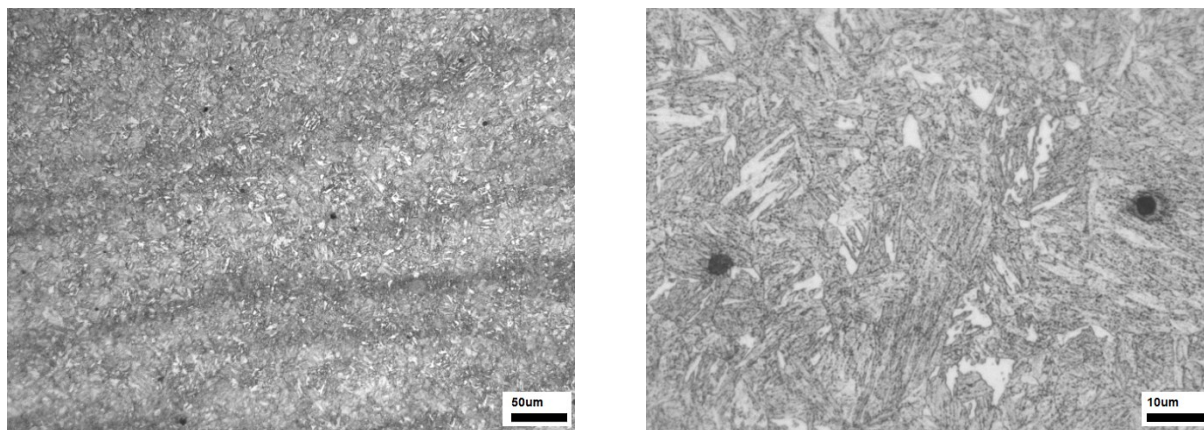
Aço “F”:

Figura AIII.19 – Fotomicrografias (MO) do aço “F” mostrando a microestrutura composta basicamente por martensita revenida (ataque químico: Nital 6% - 5 segundos). Na figura à direita, as regiões mais claras sugerem a presença de grãos de ferrita dispersos na matriz de martensita.

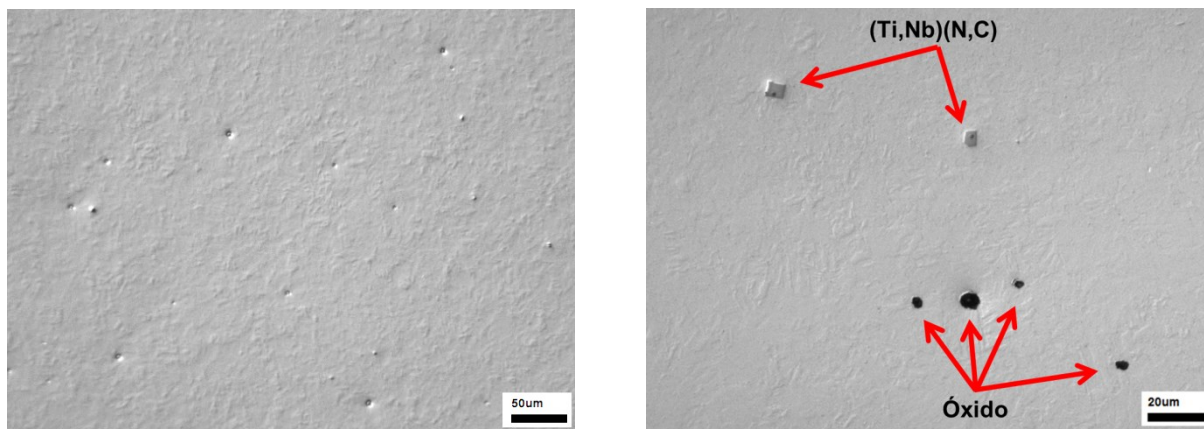


Figura AIII.20 – Fotomicrografias (MO) do aço “F” mostrando a presença de inclusões de carbonitreto de titânio e nióbio $(\text{Ti,Nb})(\text{N,C})$ e de óxidos (sem ataque químico).

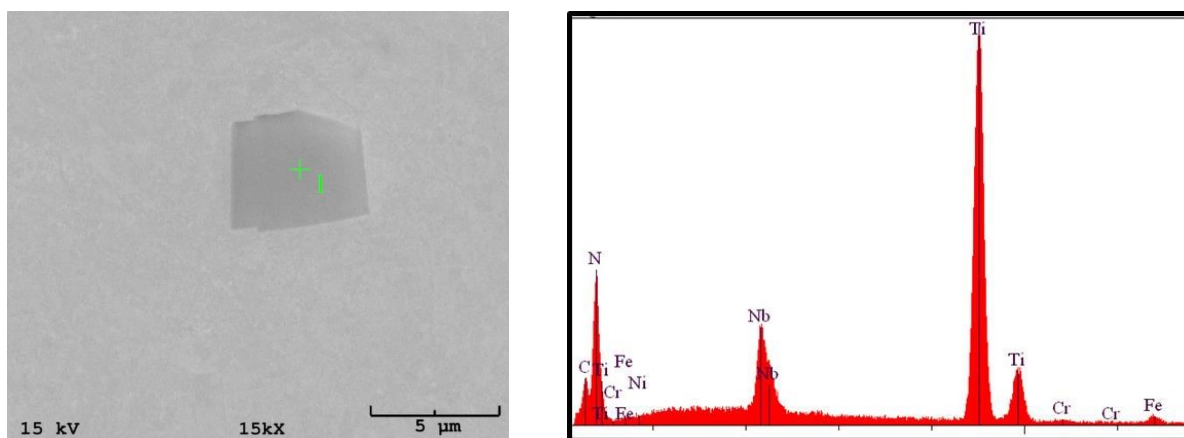


Figura AIII.21 – Imagem de elétrons secundários obtida em MEV e espectro de EDS de inclusão de carbonitreto de titânio e nióbio (Ti,Nb)(N,C) presente no aço “F” (sem ataque químico).

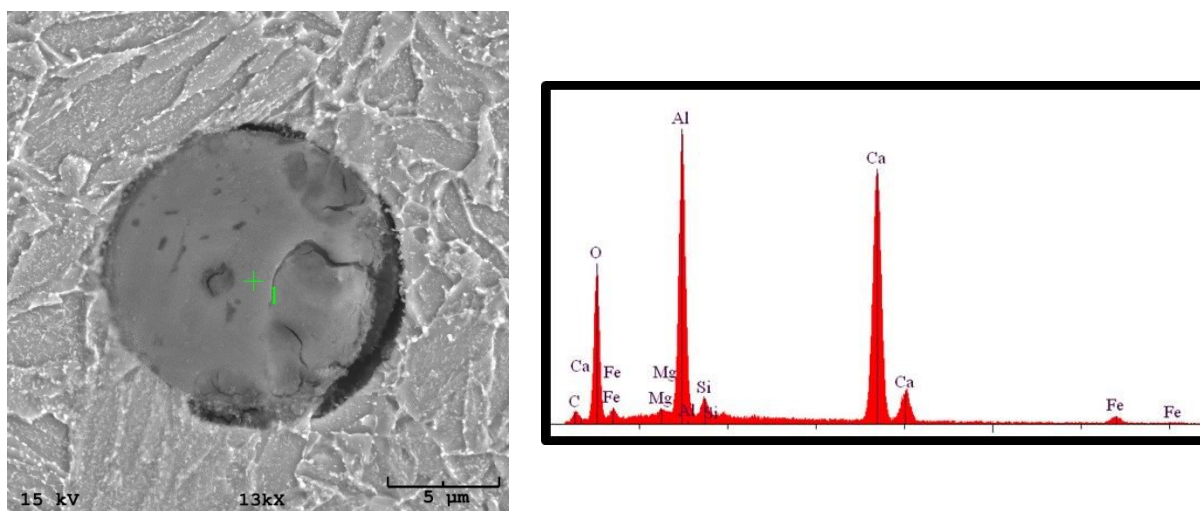


Figura AIII.22 – Imagem de elétrons secundários obtida em MEV e espectro de EDS de inclusão não metálica de óxido complexo presente no aço “F” (ataque químico: Nital 6% - 5 segundos).

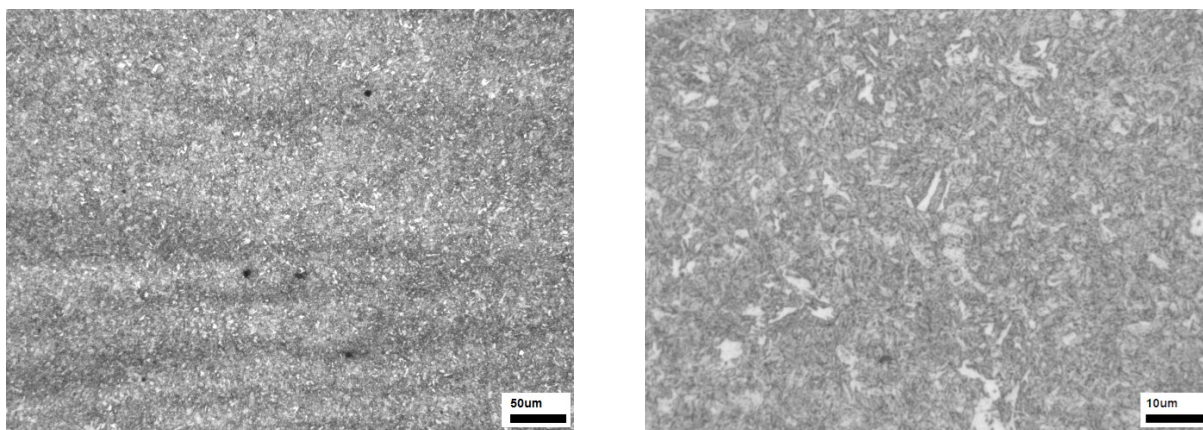
Aço “G”:

Figura AIII.23 – Fotomicrografias (MO) do aço “G” mostrando a microestrutura composta basicamente por martensita revenida (ataque químico: Nital 6% - 3 segundos). Na figura à direita, as regiões mais claras sugerem a presença de grãos de ferrita dispersos na matriz de martensita.

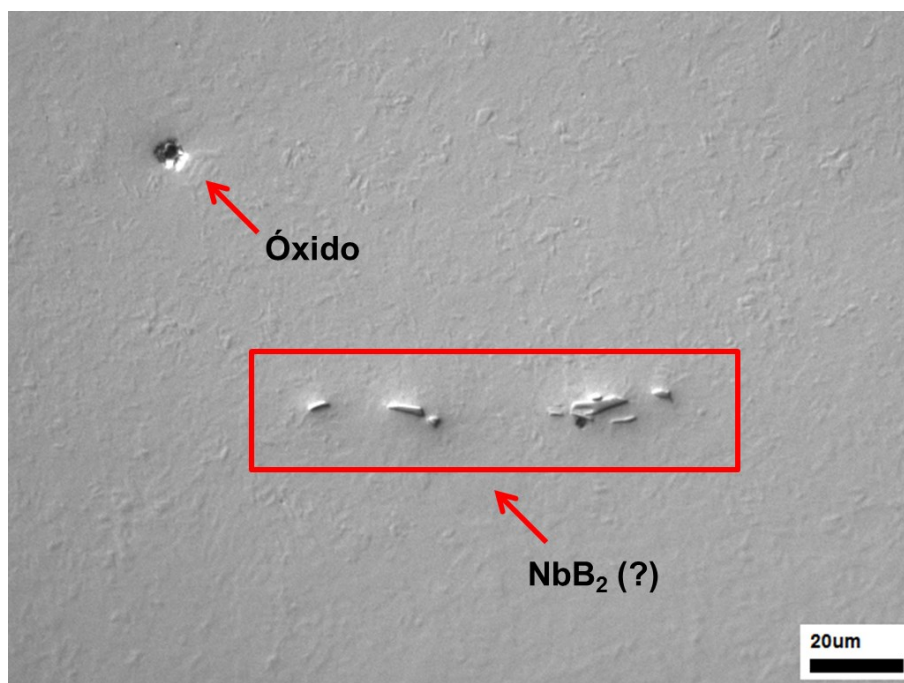


Figura AIII.24 – Fotomicrografia (MO) do aço “G” mostrando a presença de inclusões de óxido e de boreto de nióbio (NbB_2) (sem ataque químico). O ponto de interrogação (?) registra a existência de dúvida sobre a real constituição desta inclusão.

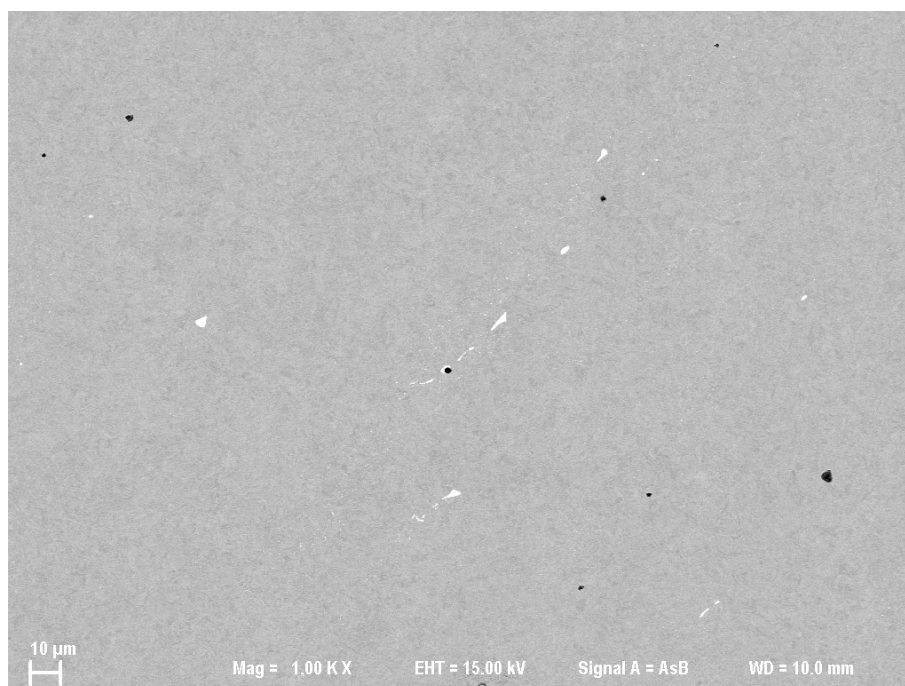


Figura AIII.25 – Imagem de elétrons retroespalhados obtida em MEV mostrando a presença de inclusões de óxidos (regiões escuras) e de possíveis inclusões de boreto de nióbio (regiões claras) no aço “G” (sem ataque químico).

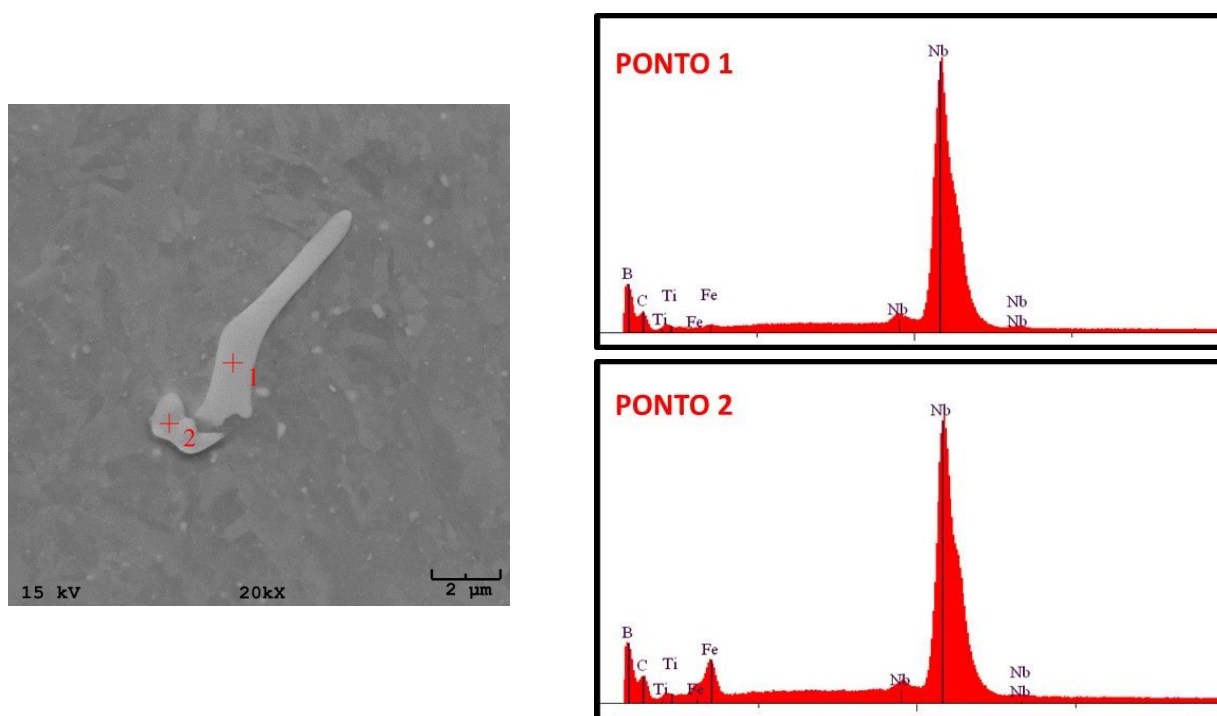


Figura AIII.26 – Imagem de elétrons secundários obtida em MEV e espectros de EDS de possíveis inclusões de boreto de nióbio (NbB_2) presentes no aço “G” (sem ataque químico).

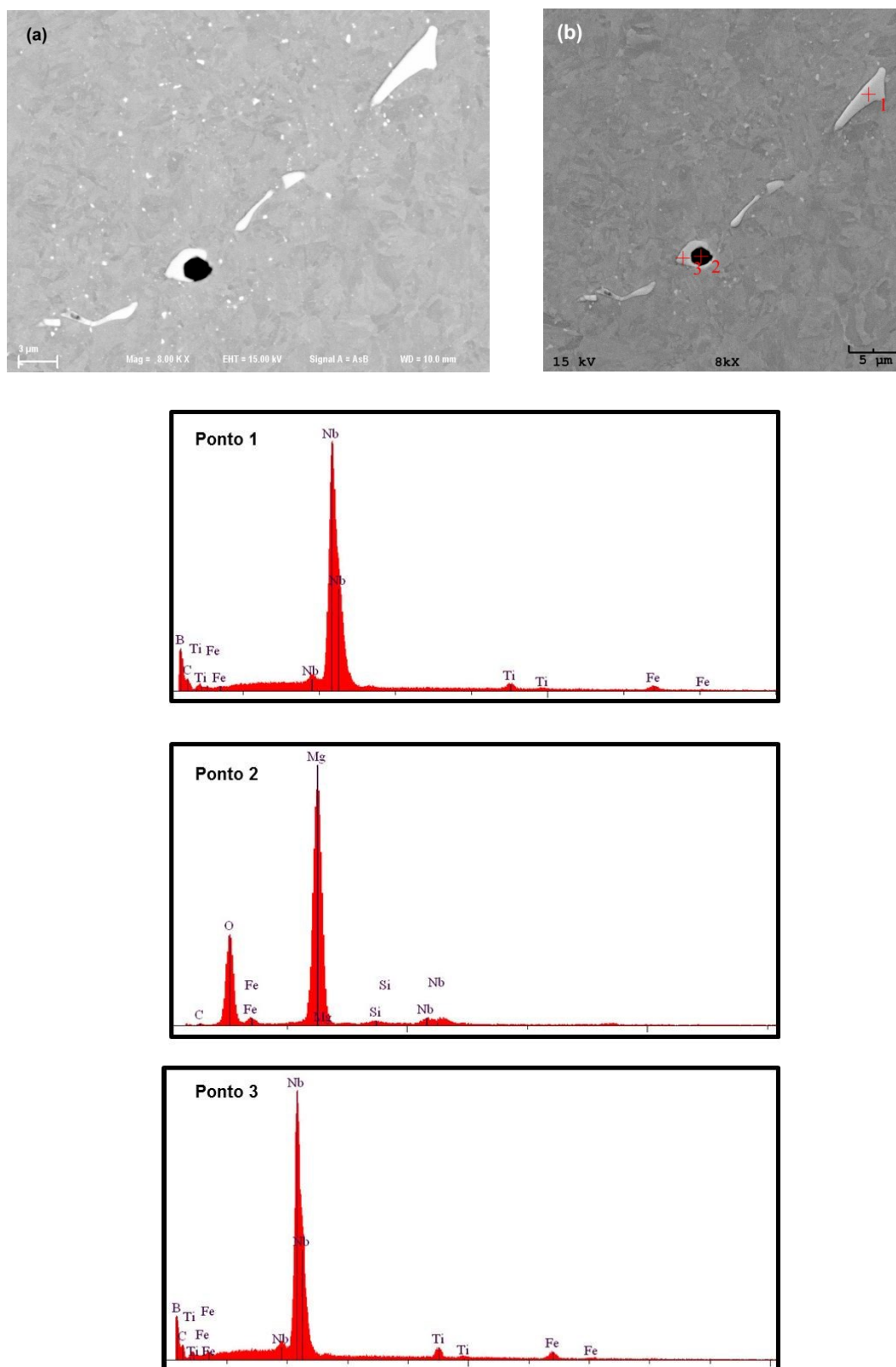


Figura AIII.27 – Imagens de elétrons (a) retroespalhados e (b) secundários obtidas em MEV e espectros de EDS de uma inclusão de óxido (ponto 2) e de possíveis inclusões de boreto de nióbio (NbB₂) (pontos 1 e 3) presentes no aço “G” (sem ataque químico).

APÊNDICE IV

DUREZAS DE INDENTAÇÃO (PENETRADORES ESFÉRICOS)

Durezas de indentação calculadas a partir dos 210 ensaios de macroindentação instrumentada realizados conforme o planejamento fatorial completo proposto no item 3.1.4.

MATERIAL	RELAÇÃO $F_{m\acute{a}x}/D^2$ (kgf/mm ²)					
	30,0		54,4		81,6	
	DIÂMETRO DO PENETRADOR (mm)		DIÂMETRO DO PENETRADOR (mm)		DIÂMETRO DO PENETRADOR (mm)	
	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0	1,5
A	140	134	146	142	147	138
	151	132	148	141	146	138
	142	133	147	140	148	138
	143	137	151	142	149	141
	139	135	148	142	146	142
B	181	181	185	182	184	174
	181	174	186	180	183	175
	184	171	186	185	185	178
	182	182	189	185	191	179
	192	186	198	190	198	187
C	188	196	195	200	208	200
	190	187	193	193	197	192
	186	181	192	182	192	184
	198	181	205	183	193	182
	205	177	205	181	192	181
D	221	203	233	211	233	215
	223	206	232	210	232	218
	223	208	229	213	230	218
	230	206	232	212	234	220
	226	205	235	215	234	217
E	263	262	278	274	274	267
	270	273	280	281	284	259
	273	276	282	279	283	267
	266	267	281	262	281	269
	269	262	278	269	284	269
F	273	253	282	262	286	259
	271	251	280	260	283	262
	267	250	283	258	284	263
	273	254	281	260	280	265
	278	250	277	257	281	264
G	290	274	300	289	303	289
	281	273	298	293	304	289
	292	279	305	293	310	290
	297	279	308	299	307	289
	294	275	303	292	311	285

APÊNDICE V

PARÂMETRO DE CÁLCULO β_m (PENETRADORES ESFÉRICOS)

Valores de β_m calculados a partir dos 210 ensaios de macroindentação instrumentada realizados conforme o planejamento fatorial completo proposto no item 3.1.4.

MATERIAL	RELAÇÃO $F_{m\max}/D^2$ (kgf/mm ²)					
	30,0		54,4		81,6	
	DIÂMETRO DO PENETRADOR (mm)		DIÂMETRO DO PENETRADOR (mm)		DIÂMETRO DO PENETRADOR (mm)	
	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0	1,5
A	0,2115	0,2327	0,2080	0,2263	0,2044	0,2146
	0,2233	0,2295	0,2140	0,2278	0,2026	0,2171
	0,2145	0,2276	0,2112	0,2299	0,2069	0,2138
	0,2202	0,2310	0,2125	0,2253	0,2105	0,2114
	0,2206	0,2322	0,2098	0,2284	0,2066	0,2150
B	0,2725	0,2948	0,2638	0,2823	0,2647	0,2682
	0,2704	0,2922	0,2665	0,2838	0,2605	0,2678
	0,2662	0,2825	0,2632	0,2824	0,2584	0,2638
	0,2620	0,2844	0,2591	0,2712	0,2552	0,2598
	0,2496	0,2769	0,2461	0,2689	0,2478	0,2530
C	0,2758	0,2574	0,2701	0,2653	0,2382	0,2533
	0,2523	0,2764	0,2607	0,2701	0,2539	0,2592
	0,2642	0,2845	0,2687	0,2766	0,2589	0,2667
	0,2594	0,2852	0,2510	0,2762	0,2591	0,2671
	0,2510	0,2886	0,2528	0,2845	0,2686	0,2694
D	0,2825	0,2971	0,2774	0,2778	0,2698	0,2809
	0,2797	0,3050	0,2744	0,2931	0,2716	0,2800
	0,2821	0,3112	0,2766	0,2907	0,2719	0,2813
	0,2749	0,3038	0,2770	0,2883	0,2751	0,2815
	0,2863	0,2944	0,2703	0,2884	0,2723	0,2797
E	0,2935	0,3142	0,2885	0,3110	0,2902	0,3042
	0,2955	0,3128	0,2941	0,3125	0,2912	0,3021
	0,2924	0,3201	0,2906	0,3162	0,2874	0,3018
	0,2915	0,3319	0,2898	0,3139	0,2910	0,3038
	0,2911	0,3091	0,2943	0,3125	0,2934	0,3036
F	0,3180	0,3429	0,3088	0,3262	0,3052	0,3124
	0,3000	0,3413	0,3120	0,3272	0,3026	0,3120
	0,2984	0,3363	0,3095	0,3252	0,3056	0,3129
	0,3146	0,3412	0,3085	0,3212	0,3033	0,3140
	0,3167	0,3324	0,3031	0,3195	0,3053	0,3109
G	0,3318	0,3623	0,3268	0,3506	0,3265	0,3416
	0,3174	0,3656	0,3165	0,3521	0,3201	0,3362
	0,3340	0,3617	0,3214	0,3443	0,3230	0,3359
	0,3303	0,3581	0,3325	0,3501	0,3211	0,3392
	0,3286	0,3663	0,3287	0,3496	0,3244	0,3379

APÊNDICE VI

PARÂMETRO DE CÁLCULO α_m (PENETRADORES ESFÉRICOS)

Valores de α_m calculados a partir dos 210 ensaios de macroindentação instrumentada realizados conforme o planejamento fatorial completo proposto no item 3.1.4.

MATERIAL	RELAÇÃO $F_{m\acute{a}x}/D^2$ (kgf/mm ²)					
	30,0		54,4		81,6	
	DIÂMETRO DO PENETRADOR (mm)		DIÂMETRO DO PENETRADOR (mm)		DIÂMETRO DO PENETRADOR (mm)	
	1,0	1,5	1,0	1,5	1,0	1,5
A	1,005	0,958	1,051	1,037	1,099	1,069
	1,097	0,938	1,075	1,031	1,080	1,061
	1,022	0,950	1,062	1,022	1,103	1,052
	1,031	0,989	1,104	1,036	1,130	1,073
	1,005	0,973	1,074	1,046	1,093	1,099
B	1,053	1,054	1,082	1,069	1,107	1,081
	1,049	1,003	1,086	1,049	1,096	1,095
	1,066	0,982	1,090	1,095	1,113	1,112
	1,052	1,057	1,104	1,074	1,147	1,120
	1,105	1,074	1,158	1,111	1,187	1,163
C	1,141	1,176	1,200	1,244	1,289	1,271
	1,134	1,136	1,176	1,186	1,237	1,226
	1,110	1,094	1,194	1,135	1,205	1,176
	1,199	1,101	1,256	1,131	1,207	1,158
	1,241	1,073	1,267	1,126	1,222	1,141
D	1,044	0,943	1,110	0,981	1,123	1,043
	1,044	0,961	1,105	1,004	1,126	1,053
	1,045	0,979	1,083	1,011	1,113	1,064
	1,082	0,967	1,103	1,006	1,134	1,076
	1,062	0,955	1,113	1,016	1,139	1,057
E	1,059	1,047	1,121	1,105	1,133	1,136
	1,086	1,093	1,135	1,129	1,172	1,073
	1,095	1,119	1,142	1,141	1,163	1,114
	1,071	1,092	1,133	1,063	1,157	1,127
	1,078	1,038	1,130	1,092	1,178	1,123
F	1,043	0,925	1,069	0,996	1,110	1,004
	1,018	0,910	1,067	0,998	1,092	1,014
	0,998	0,898	1,074	0,992	1,096	1,039
	1,038	0,916	1,059	0,996	1,077	1,018
	1,071	0,895	1,054	0,972	1,089	1,044
G	1,019	0,970	1,047	1,025	1,081	1,057
	0,974	0,976	1,037	1,027	1,079	1,050
	1,024	0,999	1,068	1,025	1,103	1,049
	1,057	0,993	1,082	1,041	1,090	1,047
	1,036	0,975	1,071	1,030	1,104	1,037

APÊNDICE VII

PARÂMETRO DE CÁLCULO β_m (PENETRADOR ESFEROCÔNICO)

Valores de β_m calculados a partir dos 70 ensaios de macroindentação instrumentada realizados com o penetrador esferocônico de diamante com ponta de 400 μm de diâmetro.

MATERIAL	RELAÇÃO $F_{\text{máx}}/D^2 = 54,4 \text{ kgf/mm}^2$	
	DIÂMETRO DO PENETRADOR = 0,4 mm	
A	0,2050	0,2035
	0,2138	0,2158
	0,2053	0,2169
	0,2097	0,2091
	0,2115	0,2128
B	0,2689	0,2473
	0,2564	0,2546
	0,2667	0,2548
	0,2584	0,2456
	0,2379	0,2400
C	0,2476	0,2854
	0,2655	0,2804
	0,2615	0,2715
	0,2696	0,2564
	0,2817	0,2424
D	0,2596	0,2676
	0,2598	0,2606
	0,2710	0,2592
	0,2565	0,2723
	0,2774	0,2764
E	0,2756	0,2644
	0,2735	0,2664
	0,2682	0,2650
	0,2639	0,2607
	0,2600	0,2628
F	0,2832	0,2856
	0,2856	0,2878
	0,2884	0,2759
	0,2972	0,2867
	0,2806	0,2843
G	0,2693	0,2947
	0,2896	0,2884
	0,2884	0,2801
	0,2845	0,2696
	0,2941	0,2804

APÊNDICE VIII

PARÂMETRO DE CÁLCULO α_m (PENETRADOR ESFEROCÔNICO)

Valores de α_m calculados a partir dos 70 ensaios de macroindentação instrumentada realizados com o penetrador esferocônico de diamante com ponta de 400 μm de diâmetro.

MATERIAL	RELAÇÃO $F_{\text{máx}}/D^2 = 54,4 \text{ kgf/mm}^2$	
	DIÂMETRO DO PENETRADOR = 0,4 mm	
A	1,0690	1,0860
	1,0640	1,0930
	1,0830	1,0760
	1,0840	1,0770
	1,1110	1,0900
B	0,9630	1,1780
	0,9710	1,1340
	1,0930	1,0370
	1,1620	1,0070
	1,1720	1,1040
C	1,3000	1,1810
	1,2040	1,1690
	1,1710	1,1680
	1,1360	1,1830
	1,1370	1,2760
D	1,0800	1,0290
	1,1950	1,0470
	1,1220	1,0640
	1,1220	1,0720
	1,0700	1,1190
E	1,1640	1,1770
	1,1440	1,1670
	1,1490	1,1430
	1,1390	1,1400
	1,1080	1,1250
F	1,0170	1,0620
	1,0180	1,0380
	1,0480	1,0070
	1,0710	1,0710
	1,0920	1,0480
G	1,1220	1,0480
	1,0480	1,1060
	1,1360	1,0770
	1,1490	1,0440
	1,0180	1,0620