



## AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE EM DUTOS COM DANOS DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA CAUSADOS POR SOBRECARGA DO SOLO

Vicente Luis Thiago

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Orientadores: João Marcos Alcoforado Rebello  
Maria da Penha Cindra Fonseca

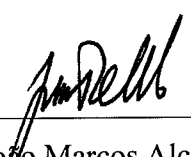
Rio de Janeiro  
Abril de 2011

AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE EM DUTOS COM DANOS DE DEFORMAÇÃO  
PLÁSTICA CAUSADOS POR SOBRECARGA DO SOLO

Vicente Luis Thiago

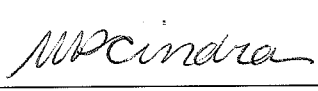
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA  
(COPPE) UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

Examinada por:



---

Prof. João Marcos Alcoforado Rebello, D.Sc.



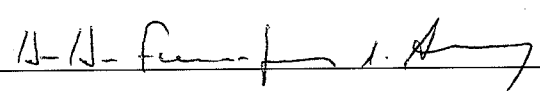
---

Prof. Maria da Penha Cindra Fonseca, D.Sc.



---

Prof. Fernando Luiz Bastian, Ph.D.



---

Prof. Hamilton Ferreira Gomes de Abreu, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 2011

Thiago, Vicente Luis

Avaliação de Integridade em Dutos com Danos de Deformação Plástica Causados por Sobrecarga do Solo / Vicente Luis Thiago – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2011

XX, 179 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: João Marcos Alcoforado Rebello

Maria da Penha Cindra Fonseca

Dissertação (mestrado) – UFRJ / COPPE / Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2011.

Referências Bibliográficas: p. 171-179.

1. Avaliação de integridade em dutos. 2. Deformação plástica em dutos. 3. Movimentação do solo. 4. Tensometria por difração de raios-X. 5. Dureza pelo método da impedância ultrassônica de contato (UCI). 6. Efeito *Bauschinger*. I. Rebello, João Marcos Alcoforado, *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. III. Título.

Dedico este trabalho aos dois amores da minha vida, meu filho Pedro Paulo e a minha esposa Juliana, a toda a minha família, a minha mãe Lenir e ao meu avô Pedro Paulo (*in memoriam*).

## **AGRADECIMENTOS**

À minha esposa Juliana, pelo carinho, amor, compreensão e incentivo em todas as fases deste trabalho.

Aos professores João Marcos Alcoforado Rebello e Maria da Penha Cindra Fonseca pela orientação, confiança, incentivo e oportunidade.

Ao professor Guilherme Victor Peixoto Donato pelo incentivo para realização do mestrado.

À TBG pela oportunidade, aos meus superiores hierárquicos: Ananias Figueiredo de Souza, Ildemar Pinto Nunes e Byron Gonçalves de Souza Filho que em 2008 homologaram e incentivaram o meu ingresso na UFRJ, aos meus gestores que durante estes três anos deram continuidade neste projeto e em especial ao Marcelo Curto Saavedra pela viabilização, confiança e incentivo para realização deste sonho.

Ao apoio recebido do Laboratório de Ensaios Não Destrutivos, Corrosão e Soldagem (LNDC) da Universidade Federal do Rio de Janeiro, do Laboratório de Análise de Tensões (LAT) e do Laboratório de Ensaios Mecânicos (LEM) da Universidade Federal Fluminense e do Laboratório de Caracterização de Materiais (LCM) da Universidade Federal do Ceará.

Aos colegas Tatiane Campos Chuvás e Italo do Valle Tomaz pela boa vontade e valiosa ajuda durante a execução dos experimentos laboratoriais.

Aos colegas Luiz Carlos Largura Junior e Marcelo Fonseca dos Santos pelo companheirismo durante a superação das etapas de pré-qualificação para a dissertação do mestrado.

E, finalmente, a todos os meus parentes e amigos que sempre torceram e acreditaram em mim.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE EM DUTOS COM DANOS DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA CAUSADOS POR SOBRECARGA DO SOLO

Vicente Luis Thiago

Abril/2011

Orientadores: João Marcos Alcoforado Rebello

Maria da Penha Cindra Fonseca

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Este trabalho apresenta o comportamento dos fenômenos relacionados com as tensões residuais e estruturais em dutos de aço API 5L X70, submetidos a processos de deformação plástica causados por sobrecarga do solo. Os principais aspectos do efeito *Bauschinger* em relação às tensões superficiais e ao perfil das tensões subsuperficiais ao longo da espessura, além da dureza superficial do material em condições de deformação plástica foram avaliados. Parâmetros relacionados com a magnitude do efeito *Bauschinger* e o domínio da deformação plástica no material foram obtidos experimentalmente e quantificados. Esses fenômenos foram analisados através de uma série de experimentos em corpos de prova com deformação plástica induzida gradativamente por conformação a frio e comparados com medições realizadas em um gasoduto em operação, em local com alto grau de sobrecarga do solo. Nestes ensaios foram utilizados equipamentos portáteis de tensometria por difração de raios-X pela técnica da dupla exposição e  $\sin^2\psi$ , de dureza por impedância ultrassônica de contato e a remoção de camadas para obtenção dos perfis das tensões subsuperficiais foi feita por polimento eletrolítico. São apresentadas ainda as metodologias de inspeção utilizadas em todas as etapas do trabalho. Os resultados experimentais mostram claramente o comportamento das tensões superficiais, das tensões subsuperficiais através da espessura e da dureza superficial no tubo de aço, em diversos graus de deformação, tais resultados estão coerentes com os principais aspectos relacionados com o regime de trabalho do material acima do limite de escoamento e aderentes com a literatura atual sobre o assunto.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M. Sc.)

INTEGRITY ASSESSMENT IN PIPELINES WITH PLASTIC DEFORMATION  
DAMAGES CAUSED BY SOIL OVERLOAD

Vicente Luis Thiago

April/2011

Advisors: João Marcos Alcoforado Rebello

Maria da Penha Cindra Fonseca

Department: Metallurgy and Materials

This work presents the behavior of phenomena related to the residual and load stresses in API 5L X70 steel pipelines, subject to processes of plastic deformation caused by soil overload. The main aspects of the Bauschinger effect related with the surface stresses and subsurface stresses profile along the thickness, and surface hardness of the material in plastic deformation conditions were evaluated. Parameters related to the magnitude of the Bauschinger effect and dominance of plastic deformation in the material were obtained experimentally and quantified. The phenomena have been analyzed through a series of stresses and hardness measurement experiments on specimens with induced plastic deformation by gradually cold work and compared with stresses measurements performed in a gas pipeline operating at a high degree of soil overload. In these experiments were used portables equipment of stresses measurement by X-ray diffraction of Two-Angle and  $\sin^2\psi$  techniques, hardness portable measurement device by ultrasonic contact impedance and the removal of layers to obtain the subsurface stresses profile were made by electrolytic polishing. Also present the inspection methodologies used at all stages of work. Experimental outcomes show the behavior of the surface stresses, subsurface profile stresses and surface hardness in the steel pipe, on varying degrees of deformation, these results are consistent with key aspects of the material work regime above the elastic limit and compliant with current literature on the theme.

## SUMÁRIO

|                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....                                                                                                    | 1  |
| 1.1 - Considerações Iniciais.....                                                                                               | 1  |
| 1.2 - Objetivo e Escopo .....                                                                                                   | 2  |
| 1.3 - Organização da Dissertação .....                                                                                          | 3  |
| CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....                                                                                         | 5  |
| 2.1 - Tensão Residual e Tensão Estrutural Aplicada.....                                                                         | 5  |
| 2.1.1 - Tipos de tensões residuais.....                                                                                         | 12 |
| 2.2 - Efeito <i>Bauschinger</i> .....                                                                                           | 17 |
| 2.2.1 - Parâmetros para definição da magnitude do Efeito <i>Bauschinger</i> .....                                               | 21 |
| 2.2.2 - Influência do efeito <i>Bauschinger</i> no comportamento das tensões residuais através da espessura em um material..... | 24 |
| 2.3 - Conformação mecânica a frio no processo de fabricação de tubos.....                                                       | 28 |
| 2.4 - Conformação mecânica a frio no processo de curvamento de tubos em campo.....                                              | 32 |
| 2.5 - Tipos de danos em dutos causados pela ação do solo .....                                                                  | 35 |
| 2.6 - Alterações de propriedades mecânicas e nucleação de trincas superficiais em dutos submetidos à deformação plástica .....  | 40 |
| 2.7 - Metodologia para identificação de regiões de possível deformação plástica.....                                            | 48 |
| 2.8 - Métodos de medição de tensões residuais.....                                                                              | 51 |
| 2.9 - Medição de dureza com equipamento portátil pelo método da impedância ultrassônica de contato (UCI) .....                  | 61 |

|                                                                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS .....                                                                                     | 66  |
| 3.1 - Material utilizado nos ensaios .....                                                                                 | 66  |
| 3.1.1 - Revestimento externo dos materiais.....                                                                            | 67  |
| 3.2 - Ensaios de dobramento em laboratório .....                                                                           | 68  |
| 3.3 - Ensaios de Dureza .....                                                                                              | 74  |
| 3.4 - Microscopia ótica .....                                                                                              | 79  |
| 3.5 - Ensaios de tensometria por difração de raios-X.....                                                                  | 79  |
| 3.5.1 - Preparo da superfície .....                                                                                        | 80  |
| 3.5.2 - Princípios básicos da metodologia tensometria por difração de raios-X .....                                        | 81  |
| 3.5.3 - Metodologia da dupla exposição.....                                                                                | 84  |
| 3.5.4 - Metodologia do $\text{Sen}^2\Psi$ .....                                                                            | 90  |
| CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....                                                                                  | 95  |
| 4.1 - Ensaios de avaliação das tensões e durezas superficiais .....                                                        | 96  |
| 4.1.1 - Ensaios antes do dobramento ( $\alpha = 0^\circ$ ) .....                                                           | 97  |
| 4.1.2 - Ensaios realizados nos corpos de prova com grau de deformação plástica<br>equivalente a $\alpha = 90^\circ$ .....  | 104 |
| 4.1.3 - Ensaios realizados nos corpos de prova com grau de deformação plástica<br>equivalente a $\alpha = 135^\circ$ ..... | 112 |
| 4.1.4 - Ensaios realizados nos corpos de prova com grau de deformação plástica<br>equivalente a $\alpha = 160^\circ$ ..... | 120 |
| 4.1.5 - Representação da variação da TR e dureza superficial em diferentes níveis de<br>deformação .....                   | 127 |
| 4.2 - Ensaios de avaliação das tensões subsuperficiais .....                                                               | 140 |
| 4.2.1 - Ensaios de perfis de profundidade da TR em corpos de prova antes do<br>dobramento ( $\alpha = 0^\circ$ ) .....     | 141 |

|                                                                                                                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2.2 - Ensaios de perfis de profundidade de TR em corpos de prova com grau de deformação I ( $\alpha = 90^\circ$ ) .....                                        | 143 |
| 4.2.3 - Ensaios de perfis de profundidade de TR em corpos de prova com grau de deformação II ( $\alpha = 135^\circ$ ) .....                                      | 146 |
| 4.2.4 - Ensaios de perfis de profundidade de TR em corpos de prova com grau de deformação II ( $\alpha = 160^\circ$ ) .....                                      | 148 |
| 4.3 - Avaliação das tensões subsuperficiais em gasoduto em operação .....                                                                                        | 152 |
| 4.4 - Microscopia ótica .....                                                                                                                                    | 158 |
| 4.5 - Ensaios para avaliação das durezas obtidas pela metodologia da impedância ultrassônica de contato (UCI) em comparação com a dureza convencional (HV) ..... | 159 |
| CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES .....                                                                                                                                    | 166 |
| CAPÍTULO 6 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....                                                                                                              | 169 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                                                                                                                 | 171 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1 – Cenário da ruptura de um gasoduto. ....                                                                                                                                                                                                                   | 2  |
| Figura 2.1 – Influência das tensões residuais em solda circumferencial ERW (FONTE: LAW <i>et al.</i> , 2006).....                                                                                                                                                      | 8  |
| Figura 2.2 – Perfil das tensões residuais de tratamento de <i>shot peening</i> em metais macios (FONTE: KRITZLER & WÜBBENHORST, 2008).....                                                                                                                             | 10 |
| Figura 2.3 – Perfil das tensões residuais de tratamento de <i>shot peening</i> em metais duros (FONTE: KRITZLER & WÜBBENHORST, 2008).....                                                                                                                              | 10 |
| Figura 2.4 – Perfil padrão de distribuição de tensões residuais em tratamentos superficiais de <i>shot peening</i> em materiais do setor aeronáutico (FONTE: KANDIL <i>et al.</i> , 2001). ....                                                                        | 11 |
| Figura 2.5 – Tensões Residuais macroscópicas ou do Tipo I (FONTE: HUTCHINGS <i>et al.</i> , 2005).....                                                                                                                                                                 | 14 |
| Figura 2.6 – Tensões Residuais microscópicas ou do Tipo II (FONTE: HUTCHINGS <i>et al.</i> , 2005).....                                                                                                                                                                | 15 |
| Figura 2.7 – Tensões residuais submicroscópicas (FONTE: HUTCHINGS <i>et al.</i> , 2005). ..                                                                                                                                                                            | 16 |
| Figura 2.8 – Ilustração esquemática do efeito <i>Bauschinger</i> - $\sigma_p$ : Pré-tensionamento máximo, $\sigma_{R1}$ : Limite de escoamento na pré deformação, $\sigma_{R2}$ : Limite de escoamento na direção reversa (FONTE: Bauschinger, 1881, modificada). .... | 17 |
| Figura 2.9 – Efeito <i>Bauschinger</i> (FONTE: ABEL & MUIR, 1972, modificado). ....                                                                                                                                                                                    | 18 |
| Figura 2.10 – Diagrama esquemático de interação entre (a) discordância-discordância e (b) discordância-partícula (FONTE: KOSTRYZHEV, 2009). ....                                                                                                                       | 20 |
| Figura 2.11 – Representação da interação entre as discordâncias e obstáculos (FONTE: BROWN, 1977, modificada). ....                                                                                                                                                    | 21 |
| Figura 2.12 – Parâmetros para avaliação da magnitude do efeito <i>Bauschinger</i> (FONTE: ABEL & MUIR, 1972).....                                                                                                                                                      | 22 |
| Figura 2.13 – Definição dos parâmetros de tensão <i>Bauschinger</i> (FONTE: KOSTRYZHEV, 2009).....                                                                                                                                                                     | 23 |
| Figura 2.14 – Tensões residuais geradas pelo Efeito <i>Bauschinger</i> : (a) Espessura submetida ao curvamento a frio; (b) Curva $\sigma \times \epsilon$ ; e, (c) Perfil das tensões residuais (FONTE: WANG & GONG, 2008). ....                                       | 26 |

|                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.15 – Conformação mecânica por dobramento (FONTE: SEMIATIN, 1993).....                                                                      | 28 |
| Figura 2.16 – Processo de fabricação de tubos SAW (Submerged Arc Welding) Longitudinal Formação U-O-E (FONTE: TENARIS CONFAB, 2010).....            | 29 |
| Figura 2.17 – Conformação mecânica U-O-E (FONTE: TENARIS CONFAB, 2010). ....                                                                        | 30 |
| Figura 2.18 – Efeito <i>Bauschinger</i> : Aços Mo-V vs. Mo-Nb (FONTE: WILLIAMS, 2007). 32                                                           |    |
| Figura 2.19 – Curvamento em tubo executado em campo através de conformação a frio (FONTE: FBTS, 2007). ....                                         | 33 |
| Figura 2.20 – Esquema simplificado dos ensaios de curvamento a frio (FONTE: FUKUDA <i>et al.</i> , 2003). ....                                      | 35 |
| Figura 2.21 – Detalhe do ponto de ruptura em um oleoduto (FONTE: MUSMAN & SOARES, 2002). ....                                                       | 37 |
| Figura 2.22 – Duto com alteração geométrica e deformação plástica localizada (FONTE: GE, 2011). ....                                                | 38 |
| Figura 2.23 – Duto com alteração de traçado devido à ação do solo (FONTE: ARGENT, 2005) .....                                                       | 38 |
| Figura 2.24 – Duto com alteração de traçado devido à ação do solo (FONTE: ALIAS, 2010). ....                                                        | 39 |
| Figura 2.25 – Representação esquemática de um gasoduto submetido à sobrecarga por movimentação do solo (FONTE: HIROYUKI <i>et al.</i> , 2003). .... | 41 |
| Figura 2.26 – Representação esquemática do ensaio de simulação da ação do solo sobre dutos (FONTE: HIROYUKI <i>et al.</i> , 2003). ....             | 42 |
| Figura 2.27 – Resultados dos ensaios de deformabilidade em aços API 5L X80 (FONTE: HIROYUKI <i>et al.</i> 2003). ....                               | 43 |
| Figura 2.28 – Representação esquemática do ensaio de simulação da ação do solo sobre dutos (FONTE: MIKI <i>et al.</i> , 2000). ....                 | 45 |
| Figura 2.29 – Instabilidade geométrica durante ensaios de sobrecarga compressiva (FONTE: MIKI <i>et al.</i> , 2000). ....                           | 45 |
| Figura 2.30 – Funções de densidade de probabilidade – Propriedades mecânicas (FONTE: HASHEMI, 2011). ....                                           | 46 |
| Figura 2.31 – Dureza (FONTE: HASHEMI, 2011). ....                                                                                                   | 47 |

|                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.32 – Relação entre a dureza e o limite de escoamento para aços ARBL (FONTE: AMEND & CLARK, 2009, modificado).                              | 47 |
| Figura 2.33 – Registro de movimentação do duto através da comparação de dados de duas inspeções inerciais (FONTE: PURVIS & HÜWENER, 2009).          | 48 |
| Figura 2.34 – Pig instrumentado de inspeção inercial e geométrica (FONTE: PURVIS & HÜWENER, 2009).                                                  | 49 |
| Figura 2.35 – Unidade de mapeamento inercial (FONTE: PURVIS & HÜWENER, 2009).                                                                       | 49 |
| Figura 2.36 – Dimensão linear dos defeitos e microestruturas. (FONTE: HAUKE, 1997).                                                                 | 53 |
| Figura 2.37 – Alcance de penetração das técnicas de medição de tensões (FONTE: HAUKE, 1997).                                                        | 54 |
| Figura 2.38 – Equipamento portátil de medição de tensões residual por difração de raios-X , Stressrad (FONTE: Radicon).                             | 55 |
| Figura 2.39 – Equipamento portátil de medição de tensões residual por difração de raios-X (Sen <sup>2</sup> Ψ) (FONTE: Stresstech Group).           | 55 |
| Figura 2.40 – Aplicação na análise de tensões residuais em tubos (FONTE: Stresstech Group).                                                         | 56 |
| Figura 2.41 – Aplicação na análise de tensões residuais em dutos em operação (FONTE: Stresstech Group).                                             | 56 |
| Figura 2.42 – Equipamento portátil de medição de tensões residual por difração de raios-X (Dupla exposição) - (FONTE: LAT/UFF).                     | 57 |
| Figura 2.43 – Equipamento de medição de tensões residuais pela metodologia do furo-cego (FONTE: LORD, 2009).                                        | 57 |
| Figura 2.44 – Equipamento de medição de tensões residuais pela metodologia do furo-cego (FONTE: KANDIL <i>et al.</i> , 2001).                       | 58 |
| Figura 2.45 – Representação esquemática da sonda de medição de dureza pelo método da impedância ultrassônica de contato (FRANK, 2006).              | 62 |
| Figura 2.46 – Representação dureza vs. frequência no registro da sonda de medição (FONTE: FRANK, 2006).                                             | 63 |
| Figura 2.47 – Equipamento portátil com sonda automatizada de ensaios de dureza pelo método impedância ultrassônica de contato (FONTE: FRANK, 2006). | 64 |

|                                                                                                                                                                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.48 – Equipamento portátil com sonda manual de ensaios de dureza pelo método impedância ultrassônica de contato (FONTE: FRANK, 2006).....                                                                                 | 64 |
| Figura 2.49 – Acessórios e equipamentos portáteis de ensaios de dureza UCI (1) Unidade eletrônica de processamento; (2) Sondas de carga; (3) Gabarito de automatização do ensaio; e, (4) Bloco padrão. (FONTE: FRANK, 2006). .... | 65 |
| Figura 3.1 – Representação esquemática do revestimento externo do tubo – FBE (FONTE: SOCOTHERM BRASIL, 2011). ....                                                                                                                | 68 |
| Figura 3.2 – Manta Termcontrátil (FONTE: ARGENT, 2005). ....                                                                                                                                                                      | 68 |
| Figura 3.3 – Representação esquemática da posição horária dos corpos de prova. ....                                                                                                                                               | 69 |
| Figura 3.4 – Corpo de prova para ensaio de dobramento. ....                                                                                                                                                                       | 69 |
| Figura 3.5 – Equipamento universal de ensaios mecânicos (FONTE: LEM/UFF). ....                                                                                                                                                    | 70 |
| Figura 3.6 – Graus de severidade de deformação plástica nos ensaios de dobramento $\alpha = 90^\circ$ , $\alpha = 135^\circ$ e $\alpha = 160^\circ$ . ....                                                                        | 70 |
| Figura 3.7 – Representação da superfície isenta de contato entre o corpo de prova e a matriz (região hachurada). ....                                                                                                             | 71 |
| Figura 3.8 – Detalhe da região de remoção do revestimento (em quadriculado). ....                                                                                                                                                 | 72 |
| Figura 3.9 – Detalhe do posicionamento do corpo de prova durante o ensaio de dobramento. (1) Punção; (2) Matriz; e, (3) Corpo de Prova. ....                                                                                      | 72 |
| Figura 3.10 – Detalhe do revestimento externo do corpo de prova em relação à matriz. ....                                                                                                                                         | 73 |
| Figura 3.11 – Corpos de prova posteriormente aos ensaios de dobramento. ....                                                                                                                                                      | 73 |
| Figura 3.12 – Equipamento Krautkramer MIC 10. (1) Unidade eletrônica de processamento; (2) Sonda de carga; e (3) Cabo de interligação. ....                                                                                       | 74 |
| Figura 3.13 – Detalhe da região de ensaios de dureza (região hachurada) e de tensões residuais (região “A”). ....                                                                                                                 | 75 |
| Figura 3.14 – Equipamento semiautomático de polimento de amostras metalográficas (FONTE: ROHDE, 2010). ....                                                                                                                       | 76 |
| Figura 3.15 – Equipamento de ensaio de dureza convencional (FONTE: LEM/UFF). ....                                                                                                                                                 | 77 |
| Figura 3.16 – Detalhe do corpo de prova durante o ensaio (FONTE: LEM/UFF). ....                                                                                                                                                   | 77 |
| Figura 3.17 – Indentações remanescentes no corpo de prova. (1) Equipamento de dureza convencional e, demais indentações são remanescentes dos ensaios de dureza UCI. ....                                                         | 78 |

|                                                                                                                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 3.18 – Representação da indentação e as dimensões obtidas no ensaio de dureza convencional.....                                                                                                  | 78  |
| Figura 3.19 – Equipamento de polimento eletrolítico, composto de: (1) fonte tensão e corrente; (2) pincel com eletrólito; (3) – relógio comparador digital (FONTE: LAT/UFF).80                          |     |
| Figura 3.20 – Sistema de coordenadas polares (FONTE: CINDRA FONSECA, 2000). ....                                                                                                                        | 82  |
| Figura 3.21 – Diferença de percursos dos raios incidentes em função da distância interplanar (FONTE: CINDRA FONSECA, 2000).....                                                                         | 83  |
| Figura 3.22 – Equipamento de análise de tensões, (1) Tubo de raios-X; (2) Colimador com filme; (3) Unidade de controle da tensão e corrente (FONTE: TBG, 2010). ....                                    | 84  |
| Figura 3.23 – Esquema ótico do equipamento. ....                                                                                                                                                        | 87  |
| Figura 3.24 – Cassete com filme de raios-X. ....                                                                                                                                                        | 87  |
| Figura 3.25 – Estado de tensão do material em função do declive da curva $2\theta \times \sin^2\psi$ .....                                                                                              | 89  |
| Figura 3.26 – a) Microdensitômetro de leitura do filme; (b) Posição do pico de difração...                                                                                                              | 90  |
| Figura 3.27 – Representação do pico de difração.....                                                                                                                                                    | 91  |
| Figura 3.28 – Integração dos pico de difração dos ângulos $\psi$ de um ensaio.....                                                                                                                      | 91  |
| Figura 3.29 – Representação gráfica $2\theta$ vs. $\sin^2\psi$ . ....                                                                                                                                   | 92  |
| Figura 3.30 – Equipamento portátil de medição. (1) Unidade de controle; (2) Computador; (3) Unidade de medida; e, (4) Corpo de prova. ....                                                              | 93  |
| Figura 3.31 – Unidade de medição. (1) Tubo de raios-X com anodo de Cr; (2) Goniômetro; (3) Colimador; (4) Corpo de prova; (3) Feixe de laser de ajuste de foco; e, (6) Luz indicadora da radiação. .... | 93  |
| Figura 3.32 – Representação esquemática dos ensaios de difração de raios-X nos corpos de prova. ....                                                                                                    | 94  |
| Figura 4.1 – Função de densidade de probabilidade da média dos ensaios de dureza UCI nos corpos de prova ( $\alpha = 0^\circ$ ). ....                                                                   | 100 |
| Figura 4.2 – Gráfico de integração dos resultados do ensaios ( $\alpha = 0^\circ$ ) da TR longitudinal ( $\sigma_L$ ) e dureza UCI . ....                                                               | 102 |
| Figura 4.3 – Gráfico de integração dos resultados do ensaios ( $\alpha = 0^\circ$ ) da TR a $45^\circ$ ( $\sigma_{45^\circ}$ ) e dureza UCI . ....                                                      | 102 |
| Figura 4.4 – Gráfico de integração dos resultados do ensaios ( $\alpha = 0^\circ$ ) da TR circunferencial ( $\sigma_C$ ) e dureza UCI . ....                                                            | 103 |

|                                                                                                                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 4.5 – Gráfico de integração dos resultados do ensaios ( $\alpha = 0^\circ$ ) das tensões residuais ( $\sigma_C$ , $\sigma_{45^\circ}$ e $\sigma_L$ ) e dureza UCI .      | 103 |
| Figura 4.6 – Função de densidade de probabilidade, com 95% de confiança, da média dos ensaios de dureza UCI nos corpos de prova ( $\alpha = 90^\circ$ ). .                      | 108 |
| Figura 4.7 – Gráfico de integração dos resultados do ensaios ( $\alpha = 90^\circ$ ) da TR longitudinal ( $\sigma_L$ ) e dureza UCI .                                           | 109 |
| Figura 4.8 – Gráfico de integração dos resultados do ensaios ( $\alpha = 90^\circ$ ) da TR a $45^\circ$ ( $\sigma_{45^\circ}$ ) e dureza UCI .                                  | 110 |
| Figura 4.9 – Gráfico de integração dos resultados do ensaios ( $\alpha = 90^\circ$ ) da TR circunferencial ( $\sigma_C$ ) e dureza UCI .                                        | 110 |
| Figura 4.10 – Gráfico de integração dos resultados do ensaios ( $\alpha = 90^\circ$ ) e das tensões residuais ( $\sigma_C$ , $\sigma_{45^\circ}$ e $\sigma_L$ ) e dureza UCI .  | 111 |
| Figura 4.11 – Função de densidade de probabilidade, com 95% de confiança, da média dos ensaios de dureza UCI nos corpos de prova ( $\alpha = 135^\circ$ ). .                    | 116 |
| Figura 4.12 – Gráfico de integração dos resultados do ensaios ( $\alpha = 135^\circ$ ) da TR longitudinal ( $\sigma_L$ ) e dureza UCI .                                         | 117 |
| Figura 4.13 – Gráfico de integração dos resultados do ensaios ( $\alpha = 135^\circ$ ) da TR a $45^\circ$ ( $\sigma_{45^\circ}$ ) e dureza UCI .                                | 118 |
| Figura 4.14 – Gráfico de integração dos resultados do ensaios ( $\alpha = 135^\circ$ ) da TR circunferencial ( $\sigma_C$ ) e dureza UCI .                                      | 118 |
| Figura 4.15 – Gráfico de integração dos resultados do ensaios ( $\alpha = 135^\circ$ ) e das tensões residuais ( $\sigma_C$ , $\sigma_{45^\circ}$ e $\sigma_L$ ) e dureza UCI . | 119 |
| Figura 4.16 – Função de densidade de probabilidade, com 95% de confiança, da média dos ensaios de dureza UCI nos corpos de prova ( $\alpha = 160^\circ$ ). .                    | 123 |
| Figura 4.17 – Gráfico de integração dos resultados do ensaios ( $\alpha = 160^\circ$ ) da TR ( $\sigma_L$ ) e dureza UCI .                                                      | 124 |
| Figura 4.18 – Gráfico de integração dos resultados do ensaios ( $\alpha = 160^\circ$ ) da TR ( $\sigma_{45^\circ}$ ) e dureza UCI .                                             | 125 |
| Figura 4.19 – Gráfico de integração dos resultados do ensaios ( $\alpha = 160^\circ$ ) da TR ( $\sigma_C$ ) e dureza UCI .                                                      | 125 |

|                                                                                                                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 4.20 – Gráfico de integração dos resultados do ensaios ( $\alpha = 160^\circ$ ) e das tensões residuais ( $\sigma_C$ , $\sigma_{45^\circ}$ e $\sigma_L$ ) e dureza UCI ..... | 126 |
| Figura 4.21 – TR e dureza superficial - Corpo de prova 01. ....                                                                                                                     | 128 |
| Figura 4.22 – TR e dureza superficial - Corpo de prova 02. ....                                                                                                                     | 128 |
| Figura 4.23 – TR e dureza superficial - Corpo de prova 03. ....                                                                                                                     | 129 |
| Figura 4.24 – TR e dureza superficial - Corpo de prova 04. ....                                                                                                                     | 129 |
| Figura 4.25 – TR e dureza superficial - Corpo de prova 07. ....                                                                                                                     | 132 |
| Figura 4.26 – TR e dureza superficial - Corpo de prova 09. ....                                                                                                                     | 133 |
| Figura 4.27 – TR e dureza superficial - Corpo de prova 10. ....                                                                                                                     | 133 |
| Figura 4.28 – TR e dureza superficial - Corpo de prova 08. ....                                                                                                                     | 135 |
| Figura 4.29 – TR e dureza superficial - Corpo de prova 11. ....                                                                                                                     | 135 |
| Figura 4.30 – TR e dureza superficial - Corpo de prova 12. ....                                                                                                                     | 136 |
| Figura 4.31 – TR e dureza superficial - Corpo de prova 05. ....                                                                                                                     | 137 |
| Figura 4.32 – TR e dureza superficial - Corpo de prova 06. ....                                                                                                                     | 137 |
| Figura 4.33 – TR e dureza superficial - Corpo de prova 13. ....                                                                                                                     | 138 |
| Figura 4.34 – TR e dureza superficial - Corpo de prova 14. ....                                                                                                                     | 138 |
| Figura 4.35 – Perfil de profundidade das tensões residuais, $\alpha = 0^\circ$ . ....                                                                                               | 142 |
| Figura 4.36 – Perfil de profundidade das tensões residuais, $\alpha = 90^\circ$ . ....                                                                                              | 144 |
| Figura 4.37 – Perfil de profundidade das tensões residuais, $\alpha = 135^\circ$ . ....                                                                                             | 146 |
| Figura 4.38 – Perfil de profundidade da TR longitudinal ( $\sigma_L$ ), $\alpha = 160^\circ$ . ....                                                                                 | 149 |
| Figura 4.39 – Representação da região afetada pelo efeito <i>Bauschinger</i> . (A) região dominada, (B) região preservada, (t) espessura e (x) alcance. ....                        | 151 |
| Figura 4.40 – Região analisada por tensometria de difração de raios-X. (FONTE: TBG, 2010). ....                                                                                     | 153 |
| Figura 4.41 – Croqui de identificação dos pontos de ensaio (FONTE: TBG, 2010). ....                                                                                                 | 153 |
| Figura 4.42 – Representação das tensões na geratriz as 12:00 do gasoduto. ....                                                                                                      | 155 |
| Figura 4.43 – Representação das tensões na geratriz as 09:00 do gasoduto. ....                                                                                                      | 155 |
| Figura 4.44 – Representação das tensões na geratriz as 03:00 do gasoduto. ....                                                                                                      | 156 |
| Figura 4.45 – Microscopia ótica 200X. ....                                                                                                                                          | 158 |
| Figura 4.46 – Microscopia ótica 500X. ....                                                                                                                                          | 159 |
| Figura 4.47 – Amostra para validação dos ensaios de dureza pelo método UCI. ....                                                                                                    | 160 |

|                                                                                                                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 4.48 – (a) Teste de normalidade Anderson-Darling – p-value = 0,121; (b) Função densidade de probabilidade $\alpha = 0,05$ – Ensaaios com durômetro UCI. ....               | 161 |
| Figura 4.49 – (a) Teste de normalidade Anderson-Darling – p-value = 0,195; (b) Função densidade de probabilidade $\alpha = 0,05$ – Ensaaios com durômetro convencional (HV). .... | 163 |
| Figura 4.50 – Resumo comparativo dos ensaios de dureza. ....                                                                                                                      | 164 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 2.1 – Propriedades mecânicas antes dos ensaios de curvamento a frio (FONTE: FUKUDA <i>et al.</i> , 2003). | 34  |
| Tabela 2.2 – Principais características das técnicas de medição de tensões residuais (FONTE: HAUKE, 1997).       | 52  |
| Tabela 3.1 – Composição química especificada, do aço API 5L X70, % em peso, (API, 2004).                         | 66  |
| Tabela 3.2 – Propriedades mecânicas do tubo API 5L X70 (API, 2004).                                              | 67  |
| Tabela 4.1 – Resumo dos ensaios executados.                                                                      | 95  |
| Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de TR ( $\alpha = 0^\circ$ ).                                                | 97  |
| Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios de dureza UCI ( $\alpha = 0^\circ$ ).                                        | 98  |
| Tabela 4.4 – Representação consolidada da média e DV da dureza em cada corpo de prova ( $\alpha = 0^\circ$ ).    | 99  |
| Tabela 4.5 – Resultados dos ensaios de TR ( $\alpha = 90^\circ$ ).                                               | 105 |
| Tabela 4.6 – Resultados dos ensaios de dureza UCI ( $\alpha = 90^\circ$ ).                                       | 106 |
| Tabela 4.7 – Representação consolidada da média e DV da dureza em cada corpo de prova ( $\alpha = 90^\circ$ ).   | 107 |
| Tabela 4.8 – Resultados dos ensaios de TR ( $\alpha = 135^\circ$ ).                                              | 113 |
| Tabela 4.9 – Resultados dos ensaios de dureza UCI ( $\alpha = 135^\circ$ ).                                      | 114 |
| Tabela 4.10 – Representação consolidada da média e DV da dureza em cada corpo de prova ( $\alpha = 135^\circ$ ). | 115 |
| Tabela 4.11 – Resultados dos ensaios de TR ( $\alpha = 160^\circ$ ).                                             | 120 |
| Tabela 4.12 – Resultados dos ensaios de dureza UCI ( $\alpha = 160^\circ$ ).                                     | 121 |
| Tabela 4.13 – Consolidação da média e DV da dureza em cada corpo de prova ( $\alpha = 160^\circ$ ).              | 122 |
| Tabela 4.14 – TR subsuperficiais (FONTE: TBG, 2010).                                                             | 154 |
| Tabela 4.15 – Dureza através do método da impedância ultrassônica de contato (UCI).                              | 160 |
| Tabela 4.16 – Dureza obtida com durômetro convencional (HV).                                                     | 162 |
| Tabela 4.17 – Dureza superficial vs. grau de deformação.                                                         | 165 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

A – Ampere

ALIAS – Anomaly Library for Inspection Assurance Standards

API – American Petroleum Institute

ASME – American Society of Mechanical Engineers

ASTM – American Society for Testing and Materials

ARBL – alta liga baixa resistência

$\beta_\epsilon$  – parâmetro de deformação *Bauschinger*

$\beta_\sigma$  – parâmetro de tensão *Bauschinger*

$\beta_E$  – parâmetro de energia *Bauschinger*

DV – desvio-padrão

$\epsilon$  – deformação

ERW – soldagem por resistência elétrica (*Electric Resistance Welding*)

$\phi$  – ângulo azimutal

$\Psi$  – ângulo polar

IMU – unidade de mapeamento inercial (*Inertial Module Unit*)

LS – tensão estrutural aplicada (*Load Stress*)

MPa – Mega Pascal

P.A. – pureza analítica

SAW – soldagem por arco submerso (*Submerged Arc Welding*)

SMYS – limite de escoamento mínimo especificado (*Specified Minimum Yield Strength*)

SMUTS – limite de resistência mínimo especificado (*Specified Minimum Ultimate Tensile Strength*)

TR – tensão residual (*Residual Stress*)

$\sigma$  – tensão

UCI – impedância ultrassônica de contato (*Ultrasonic Contact Impedance*)

V – Volt

## **Capítulo 1 - INTRODUÇÃO**

### **1.1 - Considerações Iniciais**

Mundialmente os órgãos reguladores governamentais que tratam da movimentação de petróleo, derivados e gás natural, exigem das empresas transportadoras o gerenciamento das ameaças à integridade dos dutos através de um ciclo de melhoria contínua, que engloba a aplicação e a integração de atividades interdisciplinares de inspeção e avaliação de integridade estrutural, visando garantir a segurança das pessoas que vivem ao redor destas instalações e a proteção ao meio ambiente. Os dutos estão expostos a diversos tipos de ameaças, dentre elas a ação do solo sobre o duto, provenientes de fenômenos naturais, tais como chuvas intensas, terremotos, etc. e a ação indevida de terceiros, que podem levá-los à ruptura, causando danos catastróficos e enormes perdas econômicas. Uma das importantes fontes de registro deste tipo de ocorrência é o banco de dados do departamento de transporte norte americano (PHMSA-DOT, 2010), que entre os anos de 2000 e 2008, registrou em sua malha dutoviária um total de 408 incidentes significativos, onde 17,8% desses incidentes estão relacionados diretamente com danos causados pela ação da movimentação do solo sobre o duto. Já no Brasil em 2008 ocorreu a ruptura do Gasoduto Bolívia-Brasil, no município de Gaspar, estado de Santa Catarina, provocado por um deslizamento de uma encosta, que por consequência gerou a interrupção temporária do abastecimento de gás do município de Guaramirim em Santa Catarina até o Rio Grande do Sul. A Figura 1.1, apresentada por LIU *et al.* (2009), ilustra o cenário de destruição causado pela ruptura de um gasoduto de transporte de gás natural na cidade de Ningbo, província de Zhejiang na China.



Figura 1.1 – Cenário da ruptura de um gasoduto.

Observando o histórico mundial da ocorrência de incidentes relacionados com a sobrecarga do solo sobre os dutos, surge a motivação em desenvolver novos métodos dentro do processo de avaliação de integridade, para a abordagem e tratamento deste assunto. Consequentemente inovações tecnológicas para analisar os fenômenos relacionados com a resistência dos materiais, mecânica da fratura, fadiga, plasticidade, análise de tensões, etc. são de fundamental importância na melhoria contínua dos processos de avaliação da integridade imediata e monitoramento estrutural para a garantia da confiabilidade operacional dos dutos.

## **1.2 - Objetivo e Escopo**

Este trabalho tem como objetivos determinar o comportamento e identificar fenômenos relacionados com as tensões e durezas, através da aplicação de ensaios de tensometria por difração de raios-X e de dureza UCI, para utilização durante o processo de

avaliação de integridade de um duto sob a suspeita de danos de deformação plástica provenientes de sobrecarga pela movimentação do solo. Estes objetivos envolvem, entre outros aspectos, a metodologia utilizada para definição da região a ser inspecionada, metodologia de preparo da superfície preliminar aos ensaios de tensometria e dureza e a avaliação estatística dos resultados e do desempenho do durômetro UCI.

O escopo deste trabalho engloba ainda a avaliação do comportamento das tensões residuais e das tensões estruturais aplicadas em dutos de aço ARBL, em regiões com nível de deformação e tensão acima do limite de escoamento do material, através da execução de ensaios de tensometria por difração de raios-X. São apresentados resultados de ensaios de dureza, realizados em corpos de prova de dobramento, pelo método da impedância ultrassônica de contato (*UCI - Ultrasonic Contact Impedance*), para avaliação do comportamento da dureza superficial do material em diferentes níveis de deformação.

E, finalmente, dados de ensaios de tensometria por difração de raios-X em um gasoduto em operação, são apresentadas e comparadas com os perfis de tensões obtidos em corpos de prova deformados plasticamente por dobramento.

Como premissa, todos os equipamentos que foram utilizados neste trabalho são portáteis e podem ser aplicados durante inspeções realizadas em campo.

### **1.3 - Organização da Dissertação**

Esta dissertação está organizada em 7 (sete) capítulos. Na introdução foi apresentado um panorama com os incidentes relacionados com a ação do solo sobre os dutos, os desafios que este fenômeno impõe a engenharia, os principais objetivos e escopo deste trabalho.

No capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica com os tópicos relevantes para o estudo.

No capítulo 3 contempla a descrição dos materiais e métodos, detalhando os ensaios, pontos relevantes na definição das regiões para execução da tensometria, preparo da superfície e equipamentos utilizados na pesquisa.

O capítulo 4 descreve os resultados e as discussões relativos aos ensaios executados, correlacionando-os com os pontos mais relevantes apresentados na revisão bibliográfica.

No capítulo 5 são destacadas as conclusões do trabalho.

Os capítulos 6 e 7 apresentam, respectivamente, as sugestões para trabalhos futuros e as referências bibliográficas utilizadas nesta dissertação.

## Capítulo 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O foco desta dissertação é a avaliação de danos em dutos que sofreram algum tipo de sobrecarga causado pela ação do solo, porém fundamentado no ponto de vista de GAU *et al.* (2001), que consideram de fundamental importância para a determinação da distribuição das tensões internas de uma estrutura depois da deformação plástica, a análise e entendimento de seu histórico de deformação, este capítulo abrangerá os principais aspectos relacionados com a deformação plástica: nos processos de conformação a frio realizados na fabricação de tubos (U-O-E), curvamento a frio de tubos em campo e danos em dutos causados por sobrecarga do solo. Será apresentada ainda uma introdução conceitual das tensões residuais e estruturais aplicadas, os principais aspectos relacionados do efeito *Bauschinger* nos aços ARBL, a metodologia de ensaios de dureza com equipamento portátil pelo método da impedância ultrassônica de contato (UCI) e as metodologias de medição de tensões residuais.

### 2.1 - Tensão Residual e Tensão Estrutural Aplicada

HAUK (1997) considera que em componentes estruturais uma grande quantidade de estados de tensões pode existir, como por exemplo, a combinação de tensões residuais (*RS - residual stress*) oriundas de tratamentos térmicos, processos de fabricação, deformações plásticas, etc. e tensões estruturais aplicadas (*LS – load stress*), provenientes do carregamento externo (pressão interna de um duto, etc).

As tensões residuais existentes nos materiais são tensões auto-equilibradas, em condições de temperatura uniforme e sem carregamento externo (MACHERAUCH & KLOOS, 1987). O sistema de tensões residuais presentes em um material sempre estará em equilíbrio, e a soma das tensões totais trativas e compressivas no corpo será sempre igual a zero. Assim, avaliando graficamente uma curva das tensões presentes no material, a soma das áreas trativas menos as compressivas será igual a zero. Na prática, a determinação destas curvas é complexa, pois o estado de tensões apresentado no material é tridimensional (DIETER, 1986).

BHADESHIA (2008) considera que as tensões residuais são uma consequência de interações entre tempo, temperatura, deformação e microestrutura dos materiais. Onde as características que influenciam no desenvolvimento de tensões residuais são a condutividade térmica, calor específico, coeficiente de dilatação, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, plasticidade, termodinâmica e cinética das transformações e os mecanismos de transformações.

Não existe material, componente ou estrutura livre de tensões residuais. As tensões residuais são produzidas, se regiões de um determinado material são deformados elasticamente ou plasticamente, heterogeneamente e de forma permanente, de tal maneira que incompatibilidades no estado de deformação acontecem (HAUK, 1997).

WITHERS & BHADESHIA (2001) ponderam que as tensões residuais têm especial significância em gasodutos tendo em vista que os mesmos são projetados com pequenos fatores de segurança quando comparados com outros componentes estruturais. No caso da norma norte americana ASME B31.8 para construção de gasodutos a razão entre o limite de escoamento mínimo especificado e a tensão de operação é 1,25. Tensões

residuais podem contribuir para falha prematura por fadiga, corrosão sob tensão, fratura e grandes níveis de deformação, além de alterar significativamente a vida útil à fadiga das estruturas e o tamanho crítico de defeitos planares.

Outro exemplo de que as tensões residuais influenciam no tamanho crítico de defeitos planares e devem ser consideradas durante uma análise de integridade, foi comprovado por LAW *et al.* (2006), que realizaram experimentos através de tensometria por difração de nêutrons, para avaliar o comportamento e a magnitude das tensões residuais em soldas (ERW) circunferenciais de tubos X70, diâmetro 274mm, limite de escoamento mínimo especificado de 483MPa, limite de escoamento real entre 543MPa e 575MPa, e espessuras de 5,4mm, 6,4mm e 7,1mm (Figura 2.1). É possível observar que o valor máximo de TR registrado foi de 594MPa na direção circunferencial da amostra de 6,4 mm, o que corresponde a 23 % acima do limite mínimo de escoamento especificado do material (483MPa). Considerando que na análise de integridade de defeitos planares em soldas assume-se que a tensão residual é igual ao limite de mínimo de escoamento especificado do material (SMYS), nos resultados encontrados por LAW *et al.* (2006) esta premissa não foi atendida.

No cordão de solda circunferencial, de 10 mm de largura, analisado na Figura 2.1, as tensões residuais foram medidas transversalmente, a cada 2,5mm, varrendo todas as regiões da junta. No centro da solda as tensões variaram entre 200MPa e 400MPa, sendo que os maiores valores de tensões residuais foram encontrados a uma distância de cerca de 12mm do centro do cordão (594MPa) na amostra de 6,4mm de espessura. Os autores não tecem comentários acerca da distribuição das tensões nas diferentes regiões da solda.

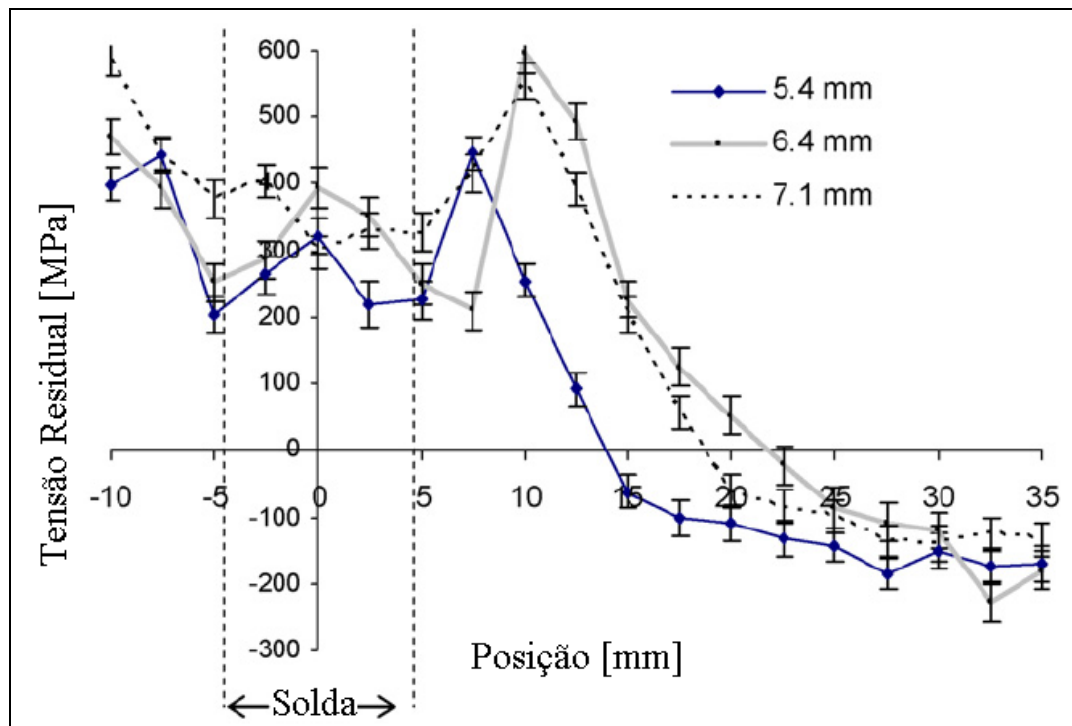


Figura 2.1 – Influência das tensões residuais em solda circunferencial ERW (FONTE: LAW *et al.*, 2006).

Para materiais cujo comportamento da tensão ( $\sigma$ ) vs. deformação ( $\epsilon$ ) contemplam o regime elástico e plástico, as tensões residuais e as tensões estruturais aplicadas só poderão ser somadas até o limite de escoamento do material, sendo assim, as tensões residuais podem acelerar ou retardar o início do processo de deformação plástica de uma estrutura (HAUK, 1997).

Quando um componente com tensões residuais trativas na superfície sofre carregamento de tração, este material será sobrecarregado localmente pelas tensões residuais. No entanto, quando um componente com tensões residuais compressivas na

superfície sofre carregamento trativo, as tensões residuais compressivas irão subtrair as tensões trativas aumentando o desempenho deste componente em serviço (LU, 1996).

KRITZLER & WÜBBENHORST (2008) mostram que as tensões residuais compressivas podem ser introduzidas nas regiões próximas à superfície de um componente através de tratamentos térmicos e através de jateamento de granalhas esféricas de aço (*shot peening*). O tratamento por *shot peening* é delineado especificamente para aumento da vida útil de uma determinada estrutura, cujo perfil das tensões residuais compressivas em relação à espessura do componente tratado varia entre 0 até 0,5mm para metais macios, e de 0 até 0,25mm para metais duros. Analisando a Figura 2.2 e Figura 2.3 é possível observar a diferença no perfil das tensões residuais introduzidas por *shot peening* com relação à dureza dos materiais tratados (materiais macios e duros).

Nos materiais macios, cujo comportamento está descrito na Figura 2.2, são apresentadas as curvas com o perfil das tensões residuais de quatro materiais distintos, o AZ 31 (liga de magnésio), AL 2014 T6 (alumínio), SF-Cu F20 (cobre) e o 50 CrV 4 (aço mola), onde depreende-se que o perfil das tensões em profundidade se estende até cerca 0,5mm e são homogêneas ao longo da espessura atingida pelo tratamento. Analisando a diferença da tensão superficial e a tensão no ponto de inflexão dos perfis da TR, o aço mola apresentou a maior variação de tensão, correspondente a 300MPa.

Entretanto, observando a Figura 2.3 que mostra as curvas com o perfil das tensões residuais nos aços duros, cujos materiais são os aços 18 CrNiMo 5 e 15 CrNi 6, de baixa liga, utilizados na fabricação de engrenagens, eixos, parafusos automotivos, etc., o perfil tem um comportamento diferenciado dos materiais macios, apresentando maiores níveis de tensão nas camadas subsuperficiais, que se mantêm estáveis em compressão numa

profundidade mais reduzida (0,25mm). O aço 15 CrNi 6 apresentou uma maior diferença entre a tensão superficial e a tensão no ponto de inflexão do perfil da TR, correspondente a 650MPa.

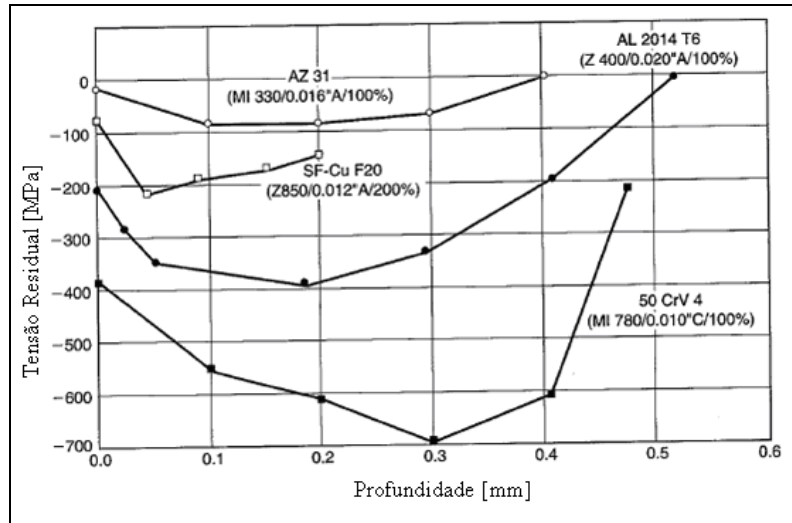


Figura 2.2 – Perfil das tensões residuais de tratamento de *shot peening* em metais macios  
(FONTE: KRITZLER & WÜBBENHORST, 2008).

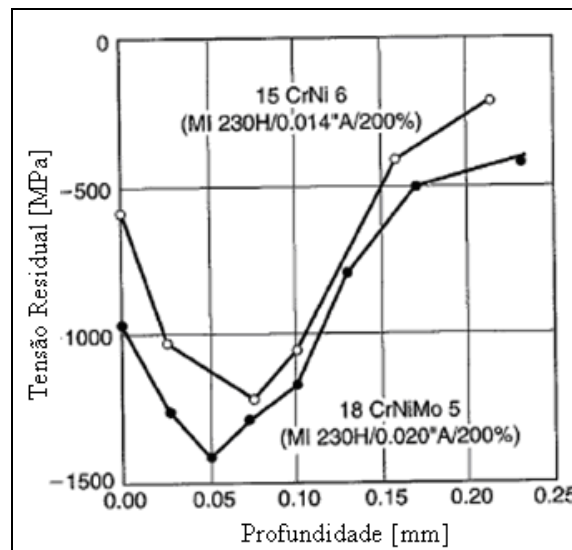


Figura 2.3 – Perfil das tensões residuais de tratamento de *shot peening* em metais duros  
(FONTE: KRITZLER & WÜBBENHORST, 2008).

O perfil padrão de distribuição de tensões residuais apresentadas por KANDIL *et al.* (2001), para tratamentos superficiais de *shot peening* em materiais aeronáuticos, conforme ilustrado na Figura 2.4, onde é possível observar que a extensão das tensões compressivas está limitada em cerca de 0,5 mm de profundidade a partir da superfície do componente. Na Figura 2.4 é possível observar que foram utilizadas duas metodologias para medição das tensões residuais do Tipo I, a metodologia por difração de raios-X (linha cheia) e furo cego (linha tracejada). Dos ensaios realizados por difração de raios-X é possível perceber que o perfil das tensões residuais apresentou um comportamento semelhante ao mostrado por KRITZLER & WÜBBENHORST (2008). Nota-se ainda que o perfil de tensões residuais obtido pela metodologia de furo cego não apresentou o ponto de inflexão característico das superfícies tratadas por *shot peening*.

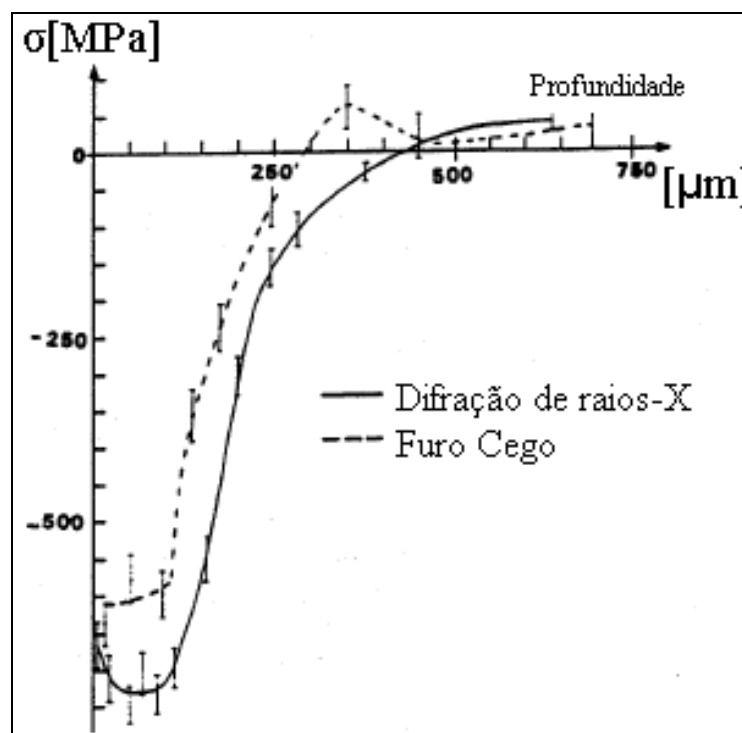


Figura 2.4 – Perfil padrão de distribuição de tensões residuais em tratamentos superficiais de *shot peening* em materiais do setor aeronáutico (FONTE: KANDIL *et al.*, 2001).

Segundo LÖHE & VÖHRINGER (2008), os tratamentos superficiais de indução de tensões residuais por *shot peening*, podem aumentar a resistência ao desgaste, à corrosão fadiga, à corrosão sob tensão, além de contribuir para evitar o processo de iniciação e propagação de trincas nos materiais.

Por outro lado WANG & GONG (2008), apresentam que tensões residuais compressivas podem surgir na superfície de um componente, introduzidas por um processo de deformação plástica, denominado de efeito *Bauschinger*, e, conseqüentemente maléficas para a estrutura. O efeito *Bauschinger* será abordado no item 2.2 deste capítulo.

Em estruturas com tensões residuais superficiais compressivas, para determinar se tais tensões são benéficas ou maléficas no comportamento estrutural do componente, deve-se avaliar o perfil das tensões residuais através da espessura, visando analisar se a estrutura está dominada pelo efeito *Bauschinger* (deformação plástica) ou se a origem das tensões residuais é proveniente de processos de tratamento de superfície, por exemplo, *shot peening*. (WANG & GONG, 2008, LÖHE & VÖHRINGER 2008).

### **2.1.1 - Tipos de tensões residuais**

HUTCHINGS *et al.* (2005) classificam as tensões residuais de acordo com a sua magnitude, de três formas:

- a) Tensões residuais macroscópicas ou do Tipo I;

- b) Tensões residuais microscópicas ou do Tipo II; e,
- c) Tensões residuais submicroscópicas ou do Tipo III.

Para as tensões macroscópicas a magnitude é maior e afeta uma porção maior de material, por outro lado as tensões microscópicas desenvolvem-se em escala muito menor, podendo desenvolver-se em escala atômica. Também é possível classificar as tensões residuais de acordo com sua origem. Um exemplo seriam as tensões residuais macroscópicas que podem originar-se de tratamentos térmicos, usinagem e processos de conformação mecânica (MACHERAUCH & KLOOS, 1987).

As tensões residuais macroscópicas ou do tipo I, se distribuem em larga escala e se equilibram por toda a estrutura. Na classificação das tensões residuais macroscópicas considera-se o material como sendo homogêneo e em uma visão macroscópica. As tensões residuais macroscópicas também inabilitam o material a manter sua dimensão durante os processos de fabricação, pois durante estes processos pode haver uma redistribuição das tensões no material, ocasionando assim, uma distorção remanescente. Estas tensões são causadas pelas interações mútuas de zonas de tamanhos macroscópicos do material, conforme mostrado na Figura 2.5. A formação destas tensões é causada principalmente por fatores externos, tais como efeitos de deformação plástica não uniforme no material ou ainda gradientes de temperatura que causam expansões não uniformes no material (HUTCHINGS *et al.*, 2005).

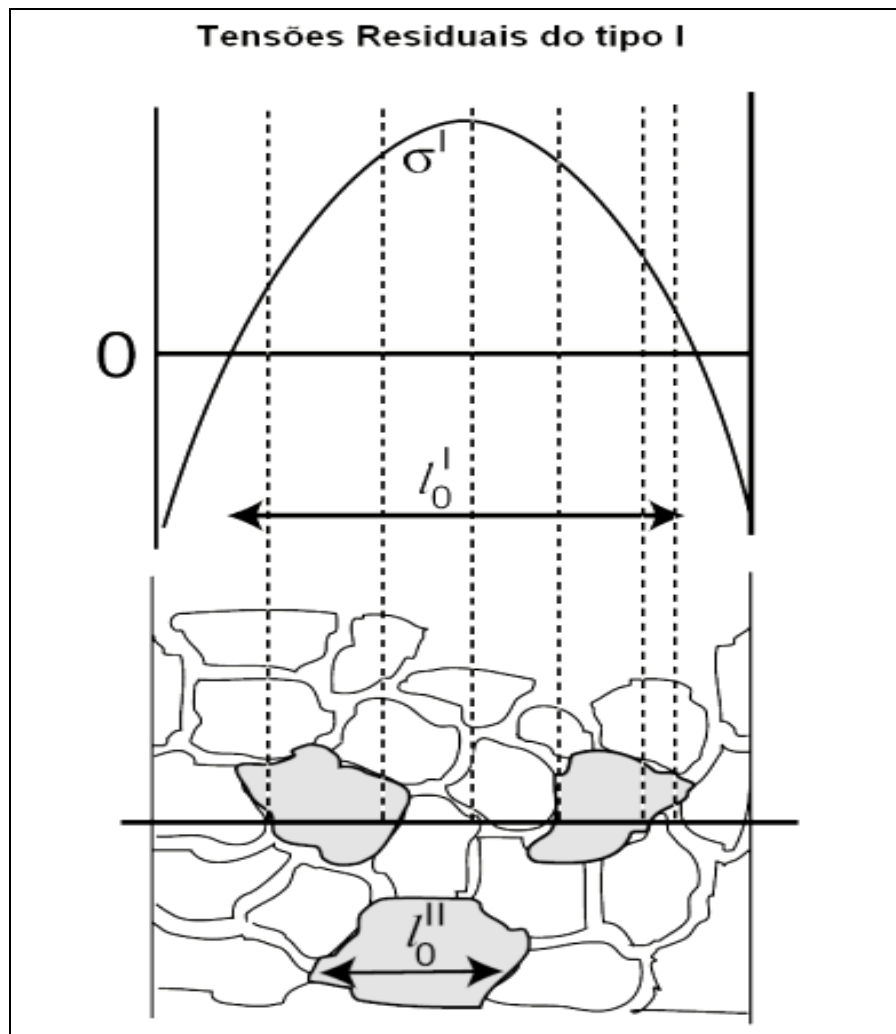


Figura 2.5 – Tensões Residuais macroscópicas ou do Tipo I (FONTE: HUTCHINGS *et al.*, 2005).

As tensões residuais do tipo II, também chamadas de microscópicas, são formadas pela heterogeneidade da estrutura cristalina do material. Estas tensões residuais estão associadas ao domínio cristalino do material, como por exemplo, o grão e diferentes fases. As tensões do tipo II estão equilibradas entre diferentes grãos ou fases presentes no material, conforme exemplificado na Figura 2.6 (HUTCHINGS *et al.*, 2005).

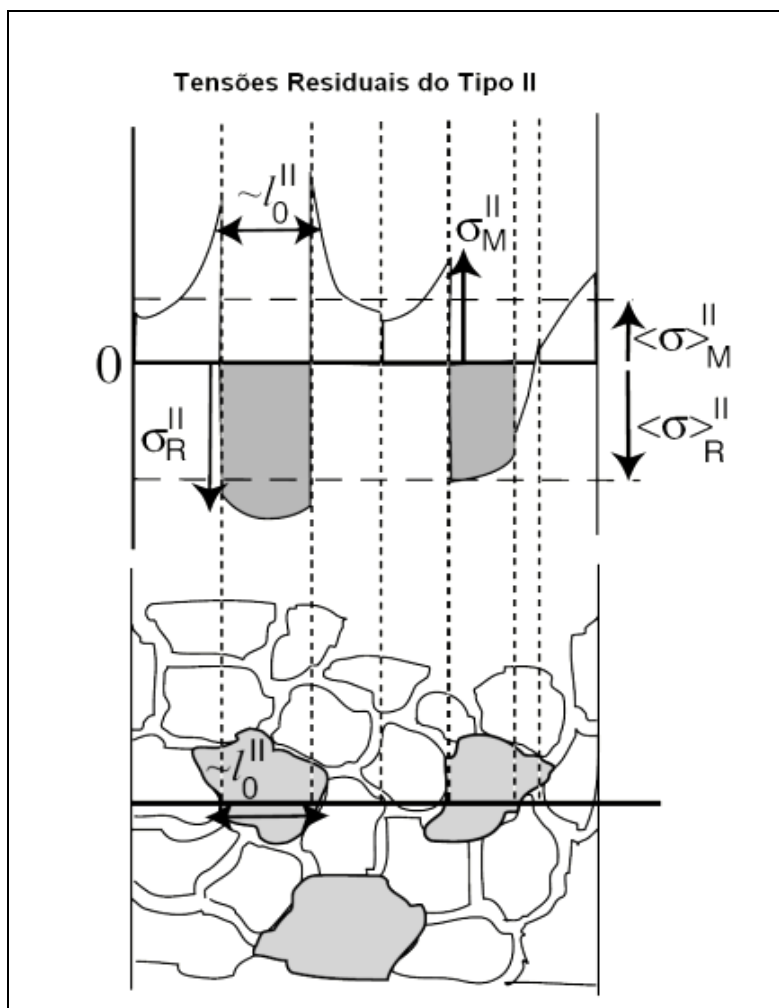


Figura 2.6 – Tensões Residuais microscópicas ou do Tipo II (FONTE: HUTCHINGS *et al.*, 2005).

As tensões residuais submicroscópicas ou do tipo III existentes na escala atômica, correspondem ao efeito causado por todos os diferentes tipos de defeitos cristalinos. Na Figura 2.7, são mostrados as discordâncias, vacâncias nos interstícios cristalinos e o nível de variação das tensões residuais do tipo III, que são equilibradas internamente no grão (HUTCHINGS *et al.*, 2005).

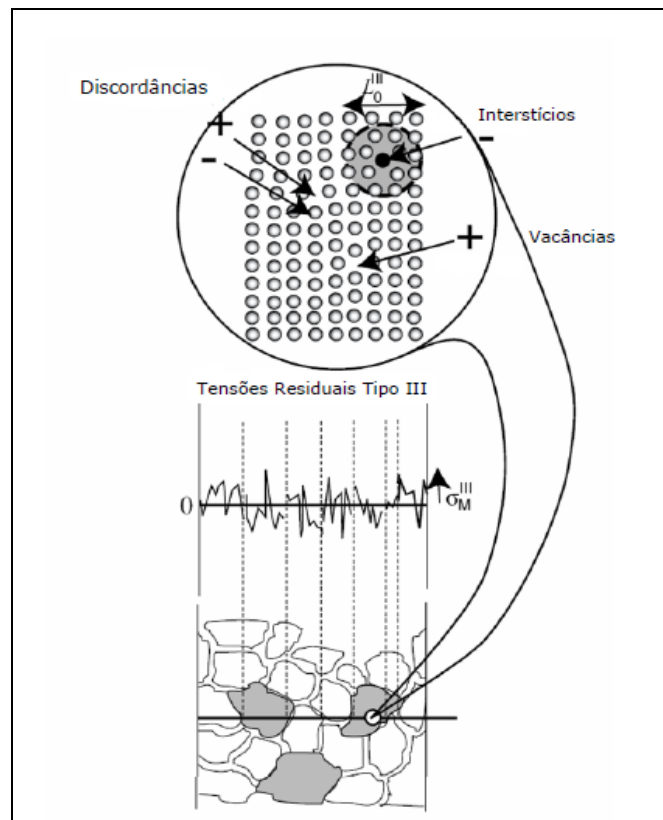


Figura 2.7 – Tensões residuais submicroscópicas (FONTE: HUTCHINGS *et al.*, 2005).

FITZPATRICK & LODINI (2003) apresentam os diferentes tipos de TR conceitualmente da mesma forma que HUTCHINGS *et al.* (2005), porém a nomenclatura utilizada para os três diferentes tipos de TR é a seguinte:

- Primeira Ordem  $\sigma_a^I$ : São aquelas que abrangem um número elevado de grãos, têm uma distribuição homogênea ao longo do material e são equilibradas em toda a estrutura;
- Segunda Ordem  $\sigma_a^{II}$ : São as tensões residuais que são homogêneas entre os grãos ou as fases do material. Este tipo de TR está em equilíbrio entre grãos ou fases; e,

- c) Terceira Ordem  $\sigma_a$  III: O seu domínio de homogeneidade é a nível cristalino do material, a pequenas distâncias interatômicas. Estas tensões residuais estão em equilíbrio em pequenos domínios do material, como por exemplo, defeitos pontuais ou discordâncias a nível cristalino.

## 2.2 - Efeito *Bauschinger*

Johann Bauschinger reportou em 1881, posteriormente ao ensaio de um corpo de prova metálico submetido à deformação plástica até  $\sigma_P$  (Figura 2.8), a ocorrência da redução no limite de escoamento do material na direção oposta à pré deformação ( $\sigma_{R2}$ ) em relação ao limite de escoamento do material na pré deformação ( $\sigma_{R1}$ ), ou seja,  $\sigma_{R1} > \sigma_{R2}$ . A Figura 2.8 ilustra através do gráfico da tensão vs. deformação o fenômeno observado.

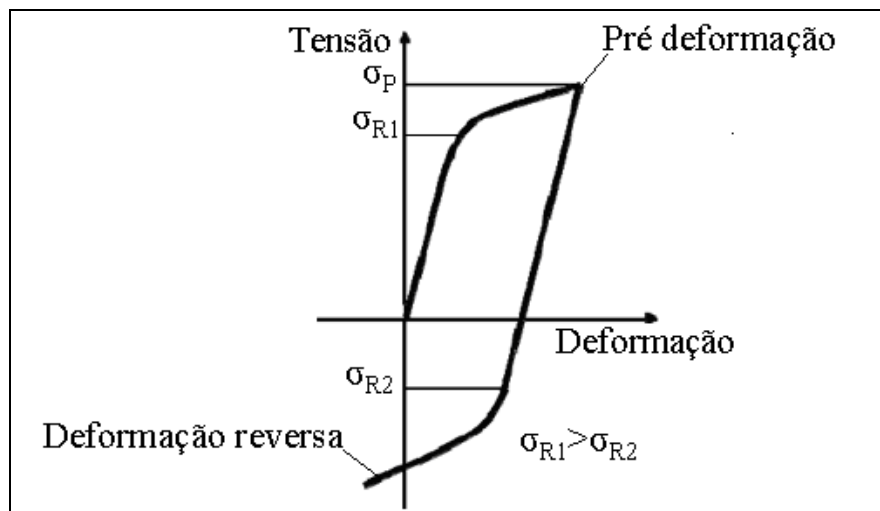


Figura 2.8 – Ilustração esquemática do efeito *Bauschinger* -  $\sigma_P$ : Pré-tensionamento máximo,  $\sigma_{R1}$ : Limite de escoamento na pré deformação,  $\sigma_{R2}$ : Limite de escoamento na direção reversa (FONTE: Bauschinger, 1881, modificada).

Trabalhos subsequentes de ABEL & MUIR (1972) e BROWN (1977) revelaram uma maior complexidade do efeito *Bauschinger* e diversos parâmetros foram desenvolvidos para avaliar este fenômeno.

ABEL & MUIR (1972) apresentaram graficamente, conforme ilustrado na Figura 2.9, um novo modelo para o entendimento do efeito *Bauschinger*, com a introdução do parâmetro de deformação *Bauschinger* ( $\beta$ ) e o conceito do amolecimento permanente gerado pelo efeito ( $\Delta\sigma = \sigma_B - \sigma_E$ ). O material foi carregado uniaxialmente em tração até o regime plástico, descarregado até um nível zero de tensão e posteriormente recarregado na direção inversa, ou seja, em compressão, gerando uma redução no limite de escoamento (D) em relação ao limite de escoamento em tração no carregamento inicial (G).

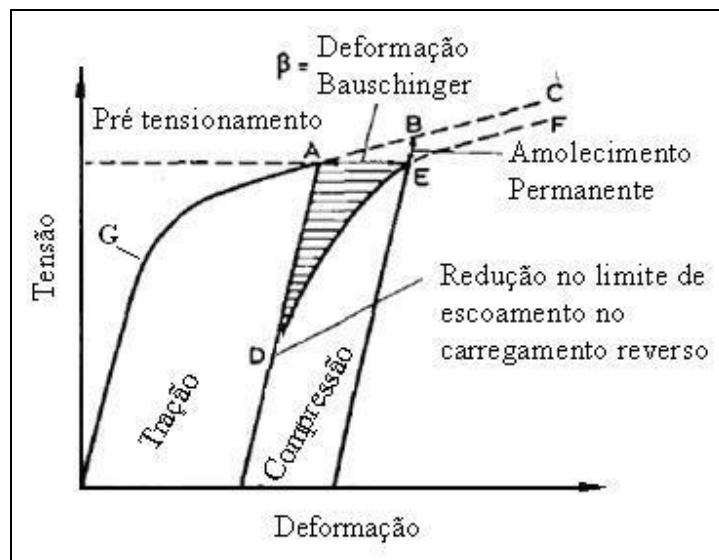


Figura 2.9 – Efeito *Bauschinger* (FONTE: ABEL & MUIR, 1972, modificado).

O efeito de *Bauschinger* reflete um desvio em relação ao comportamento elasto-plástico ideal do material, e as principais teorias utilizadas para explicar este fenômeno são

as teorias da tensão reversa (*back stress*) (ABEL & MUIR, 1972) e a de Orowan (BROWN, 1977).

Durante o processo de deformação plástica, com a aplicação do pré tensionamento remoto, as discordâncias em movimento interagem com outros obstáculos (outras discordâncias, contornos de grão e precipitados), impedindo a sua posterior multiplicação. Isto gera uma tensão reversa (*back stress*) no sentido contrário, ao redor do ponto de contato, resistindo ainda mais ao movimento de propagação das discordâncias. Quando acontece a reversão da deformação, através da aplicação da tensão remota reversa, a tensão reversa repele as discordâncias dos obstáculos na direção oposta, ou seja, na direção da tensão remota reversa. Assim, o campo de tensões ajuda a mover as discordâncias na direção da tensão remota reversa, e o limite de escoamento do material cai para o nível da tensão reversa. Assim sendo, segundo a teoria da tensão reversa, um aumento na densidade das discordâncias gera um aumento nas regiões de interação entre as discordâncias, e consequentemente diminui o nível da tensão reversa. Assim, o efeito *Bauschinger* deve ser maior em um material com maior densidade de discordâncias, porém deve ser levado em consideração que com o aumento da densidade de discordâncias e/ou pré tensionamento remoto o número de interações entre as discordâncias pode diminuir, devido a um processo de imobilização da interação entre as discordâncias que ocorre pelo empilhamento atômico (*pile-ups*) e pela formação de novas estruturas celulares. A Figura 2.10(a) apresenta o diagrama esquemático das interações entre as discordâncias durante o processo de deformação plástica (KOSTRYZHEV *et al.*, 2007, KOSTRYZHEV, 2009).

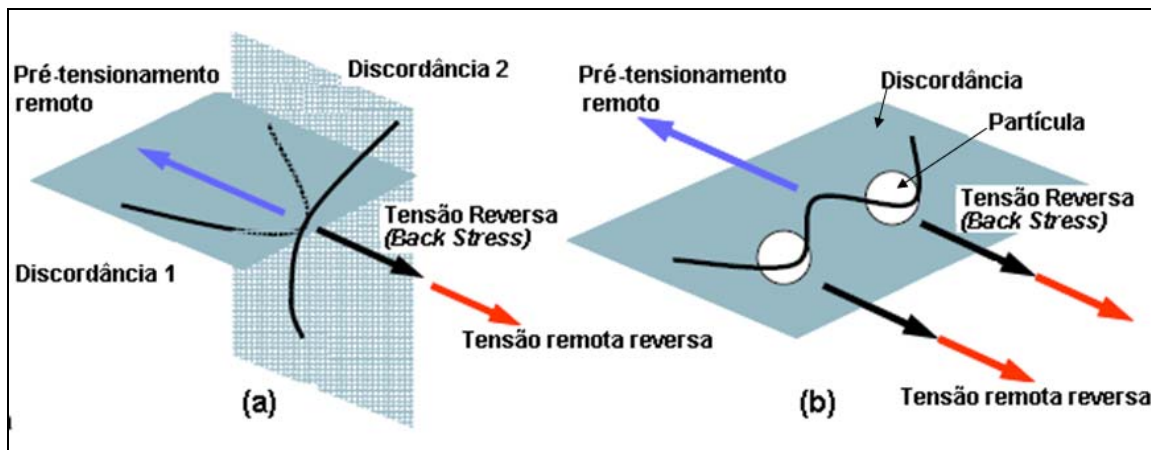


Figura 2.10 – Diagrama esquemático de interação entre (a) discordância-discordância e (b) discordância-partícula (FONTE: KOSTRYZHEV, 2009).

Em um aço microligado, partículas de precipitados agem também como regiões de interação e aumentam o nível da tensão reversa, conforme demonstrado na Figura 2.10(b). Assim, com o aumento da fração volumétrica e a densidade de partículas precipitadas, irá aumentar o número de interações durante a propagação das discordâncias, entre as partículas precipitadas e as discordâncias, e consequentemente, a tensão reversa. Assim, a magnitude do efeito *Bauschinger* em um metal microligado, está diretamente relacionada com a composição química, densidade, tamanho e distribuição das partículas no metal (KOSTRYZHEV *et al.*, 2007, KOSTRYZHEV, 2009).

Orowan reconheceu que durante um processo de deformação plástica, a interação entre as discordâncias e obstáculos (outras discordâncias, contornos de grão e precipitados) existentes no material produzia uma explicação do efeito *Bauschinger*. Na Figura 2.11 é possível observar uma discordância (a) no material sem nenhum carregamento externo (sem deformação). À medida que o carregamento (deformação) é aumentado, a discordância se curva ao encontrar com outros obstáculos (c) e interagem em regiões

próximas do plano de deslizamento ( $b$  e  $b'$ ). Aumentos sucessivos de deformação produzem, progressivamente, áreas de interação maiores, que podem ser calculadas de acordo com várias teorias, até que em um limiar de tensão a área de interação se torna infinita. Quando o material é submetido ao carregamento cíclico, as interações entre as discordâncias e obstáculos causam um amolecimento permanente no material (BROWN, 1977).

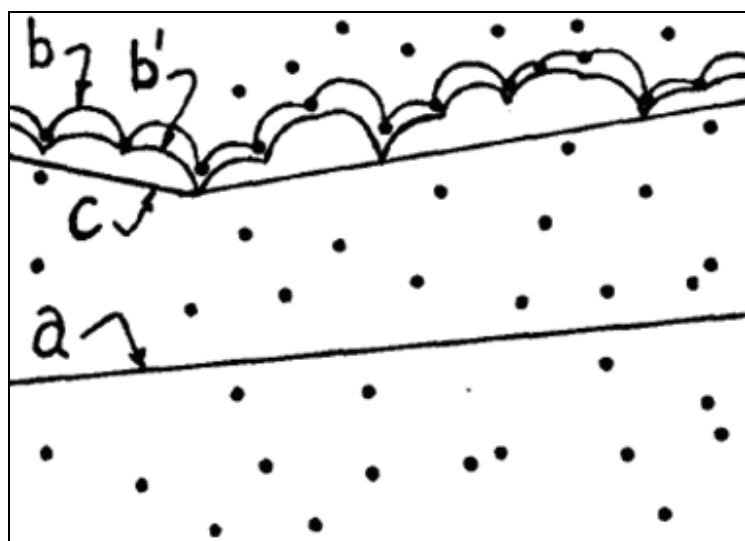


Figura 2.11 – Representação da interação entre as discordâncias e obstáculos (FONTE: BROWN, 1977, modificada).

### 2.2.1 - Parâmetros para definição da magnitude do Efeito

#### *Bauschinger*

ABEL & MUIR (1972) propuseram os parâmetros ilustrados na Figura 2.12 para avaliação da magnitude do efeito *Bauschinger*.

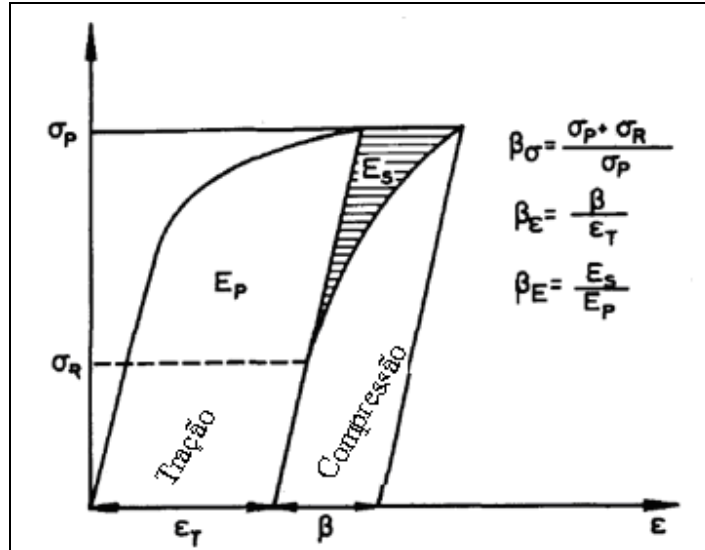


Figura 2.12 – Parâmetros para avaliação da magnitude do efeito *Bauschinger* (FONTE: ABEL & MUIR, 1972).

O primeiro parâmetro foi o da deformação *Bauschinger* ( $\beta_\epsilon$ ), definido por:

$$\beta_\epsilon = \frac{\beta}{\epsilon_T}$$

Normalmente este parâmetro é menor que 1. Se  $\beta_\epsilon=1$  indica que a pré deformação foi totalmente revertida, entretando, os experimentos realizados por ABEL & MUIR (1972), mostraram valores maiores que 1.

O segundo parâmetro, a tensão *Bauschinger* ( $\beta_\sigma$ ), foi proposto para estabelecer uma relação na redução do limite de escoamento:

$$\beta_\sigma = \frac{\sigma_P + \sigma_R}{\sigma_P}$$

O terceiro parâmetro é a energia *Bauschinger* ( $\beta_E$ ), que pode ser utilizado para representar a energia economizada para conseguir certa quantidade de deformação no sentido contrário do pré tensionamento inicial:

$$\beta_E = \frac{E_S}{E_P}$$

KOSTRYZHEV (2009) propôs um modelo diferenciado de ABEL & MUIR (1972) para a definição do parâmetro de tensão *Bauschinger*. A Figura 2.13, ilustra esquematicamente a curva tensão x deformação, que foi utilizada no novo modelo.

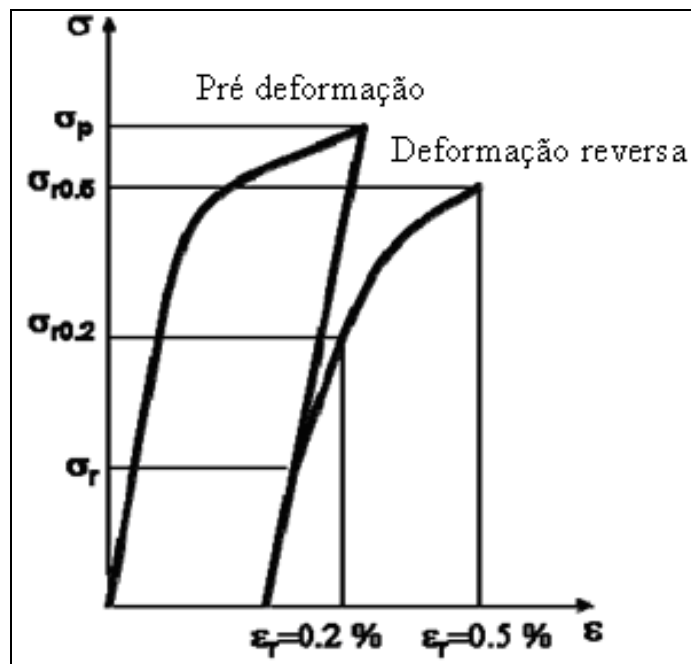


Figura 2.13 – Definição dos parâmetros de tensão *Bauschinger* (FONTE: KOSTRYZHEV, 2009).

As seguintes equações representam os novos parâmetros de tensão *Bauschinger* ( $\beta_{\sigma 1}$ ,  $\beta_{\sigma 2}$ ,  $\beta_{\sigma 3}$  e  $\beta_{\sigma 4}$ ), que foram propostos por KOSTRYZHEV (2009):

$$\beta_{\sigma 1} = \frac{\sigma_P + \sigma_R}{\sigma_P}; \beta_{\sigma 2} = \frac{\sigma_P + \sigma_{R0.2}}{\sigma_P}; \beta_{\sigma 3} = \frac{\sigma_P + \sigma_{R0.5}}{\sigma_P}; \beta_{\sigma 4} = \frac{\sigma_{R0.5}}{\sigma_P}$$

A partir do limite de escoamento ocorre início do processo de movimentação das discordâncias, e a tensão reversa começará a agir e sobre os obstáculos, onde então o parâmetro  $\beta_{\sigma 1}$  descreve o início do amolecimento causado no material pelo efeito *Bauschinger*. Os demais parâmetros  $\beta_{\sigma 2}$ ,  $\beta_{\sigma 3}$  e  $\beta_{\sigma 4}$ , representam o alcance do amolecimento causado pelo efeito *Bauschinger*, com o aumento da deformação na direção reversa (KOSTRYZHEV, 2009).

### **2.2.2 - Influência do efeito *Bauschinger* no comportamento das tensões residuais através da espessura em um material**

GAU & KINZEL (2001) consideram que dois componentes podem apresentar o mesmo nível de deformação total, porém, com valores de tensão diferentes, devido a diferentes históricos de deformação. Além disso, os históricos de deformação das diversas camadas através da espessura de um componente podem ter diferentes tipos de combinação de carregamento, como por exemplo, carregamento/descarregamento elástico em tração/compressão, carregamento/descarregamento plástico em tração/compressão. Para a obtenção precisa das tensões internas de cada camada, o efeito *Bauschinger* deve ser considerado, e quando estas camadas estão submetidas a carregamentos cíclicos, o fenômeno do efeito *Bauschinger* no componente torna-se de difícil previsão.

WANG & GONG (2008) descrevem que quando um metal é plasticamente deformado, são criadas tensões internas no mesmo, principalmente devido a

incompatibilidade de deformação, resultando em diferentes níveis de deformação em diferentes locais ao mesmo tempo. Após um processo de deformação plástica por conformação mecânica, as seguintes razões podem levar a este fenômeno, dentre eles:

- a) Uma diferença de resistência entre as diferentes fases coexistentes no material; e,
- b) A possibilidade da existência de diferentes gradientes de temperatura em diferentes regiões do material.

Essas tensões internas podem permanecer nos materiais depois do processo de conformação na forma de TR, resultante da heterogeneidade da deformação plástica. Um dos típicos exemplos do efeito das tensões residuais no comportamento dos materiais é o efeito *Bauschinger*, que reflete o efeito da inversão da direção das tensões em uma determinada superfície do material, posteriormente a um processo de deformação plástica, como por exemplo, a superfície do material é deformada na direção trativa e a tensão medida é compressiva (WANG & GONG, 2008).

PRÉVEY (1996) considera que após um processo de deformação plástica, as tensões residuais do tipo I, remanescentes na estrutura, são de magnitudes compatíveis com o regime elástico do material.

A Figura 2.14 mostra graficamente todo o processo de formação de tensões residuais através da espessura de um componente deformado plasticamente a frio. A Figura 2.14 (a) representa a espessura do componente ( $2t$ ), composta por diversas camadas empilhadas com diferentes níveis de deformação ao longo da mesma, onde a camada que está submetida ao maior valor de tensão trativa é a camada (5), decrescendo até zero na

linha neutra, representada pela camada (0), e variando até um valor de tensão compressiva máxima na superfície inferior.

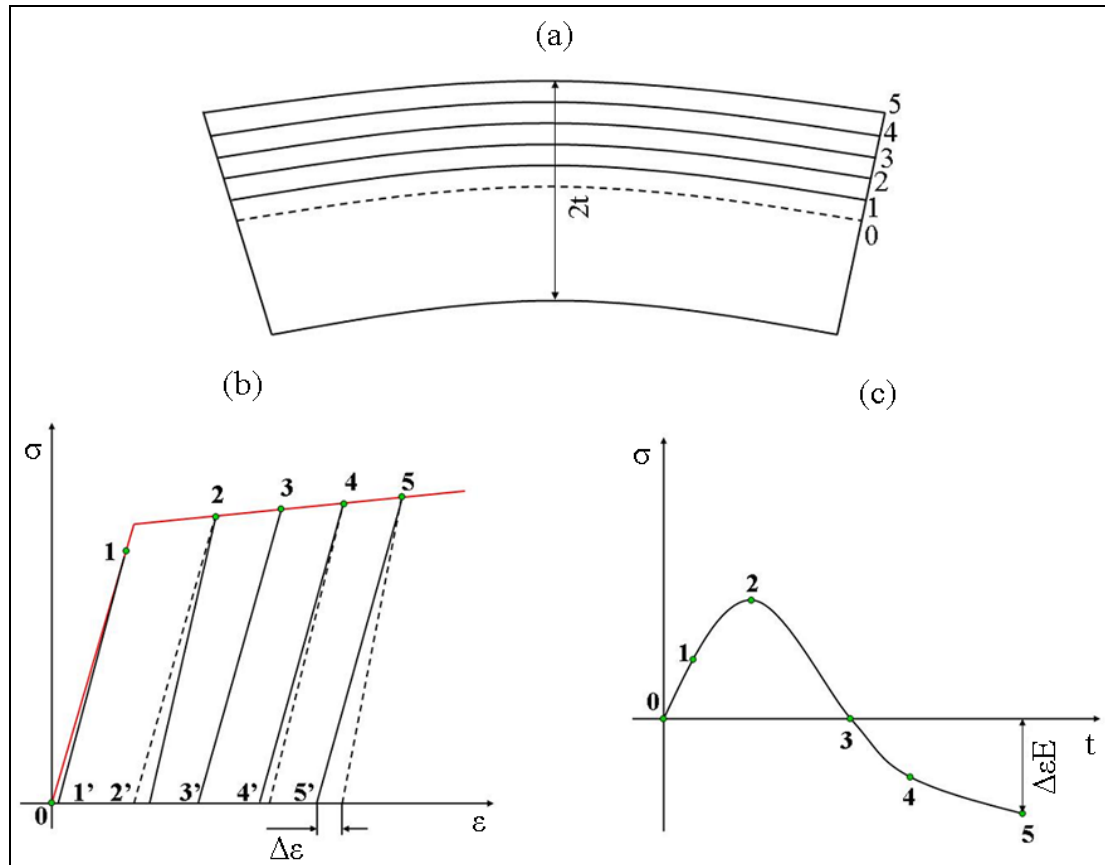


Figura 2.14 – Tensões residuais geradas pelo Efeito *Bauschinger*: (a) Espessura submetida ao curvamento a frio; (b) Curva  $\sigma \times \epsilon$ ; e, (c) Perfil das tensões residuais (FONTE: WANG & GONG, 2008).

Durante a aplicação da carga de dobramento sobre o componente, a distribuição da tensão aplicada através da espessura ocorre conforme representada na Figura 2.14 (b), com as camadas de 2 a 5 no regime plástico e a camada 1 no regime elástico da curva de tensão ( $\sigma$ ) x deformação ( $\epsilon$ ). Observando ainda a Figura 2.14 (b), após a liberação da carga de curvamento, o componente tenderá a retornar ao seu perfil original, não sendo possível,

devido à necessidade da reversão completa da deformação elástica e plástica. Sendo assim, o retorno elástico e plástico das camadas através da espessura do componente será distinto, entre as camadas, devido aos diferentes níveis de deformação plástica nas mesmas. Considerando o retorno do regime de deformação plástica da camada 5 isoladamente, este retorno acontecerá pela linha tracejada 5', porém levando em conta a interação da camada 5 com a camada 4, o retorno acontecerá pela linha sólida 5', tendo em vista que a camada 4 tem menor deformação plástica que a camada 5 e assim tende a resistir ao estiramento plástico da camada 5 e como resultado a camada 5 fica em compressão. O nível da TR compressiva deverá ser  $\Delta\epsilon E$ , onde  $\Delta\epsilon$  é a deformação residual mostrada na Figura 2.14 (b) e  $E$  é o módulo de elasticidade do material. Analisando as interações existentes na camada 4, observa-se que a mesma interage com as camadas 5 e 3, sendo que a camada 3 irá resistir ao estiramento da camada 4 e a camada 5 irá colaborar com a extensão da camada 4, esta combinação irá resultar em uma deformação/tensão residual compressiva menor que a condição anterior. É previsível que em algum ponto da espessura do material, a combinação da influência desses dois fatores será balanceada e resultará em um estado de tensão/deformação residual igual a zero, conforme demonstrado na camada 3 da Figura 2.14 (b). Igualmente, as camadas abaixo da camada de tensão/deformação residual igual a zero, conforme as camadas 1 e 2 da Figura 2.14 (b), resultarão em um estado de TR trativo. O perfil padrão da distribuição das tensões residuais ao longo da espessura está ilustrado na Figura 2.14 (c) (WANG & GONG, 2008).

Duas considerações importantes devem ser observadas no perfil da distribuição das tensões residuais oriundas do efeito *Bauschinger* apresentado por WANG & GONG, (2008):

- a) Para que seja mantido o estado de equilíbrio, as tensões trativas devem ser equilibradas pelas tensões compressivas; e,
- b) Uma superfície estirada plasticamente resulta em um estado de tensões compressivo, enquanto que uma superfície comprimida plasticamente resulta em um estado de tensões trativo.

### 2.3 - Conformação mecânica a frio no processo de fabricação de tubos

Os processos de conformação mecânica alteram a geometria do material através de forças aplicadas por ferramentas adequadas que podem variar desde pequenas matrizes até grandes cilindros. A Figura 2.15 ilustra simplificada o processo de conformação mecânica por dobramento, onde ocorre a transformação de uma chapa em peças como calhas e perfis (SEMIATIN, 1993).

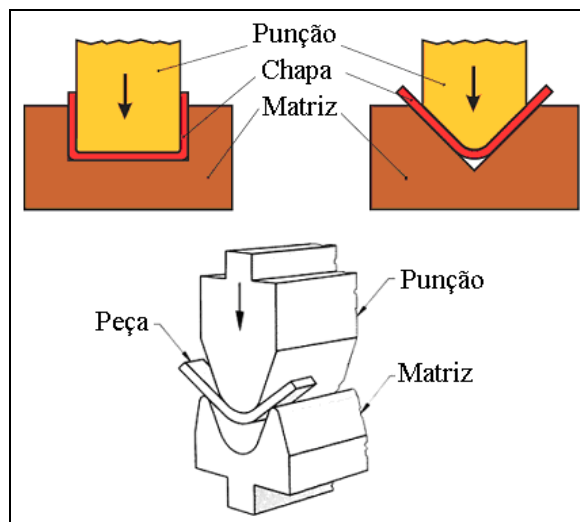


Figura 2.15 – Conformação mecânica por dobramento (FONTE: SEMIATIN, 1993).

Durante as etapas de fabricação de um tubo, ilustradas na Figura 2.16, através do processo SAW (Submerged Arc Welding) Longitudinal Formação U-O-E, por meio de conformação mecânica a frio por dobramento, tensões residuais são introduzidas na estrutura do tubo, nas fases realizadas pela prensa U, prensa O e durante a expansão a frio (MCALLISTER, 2009).

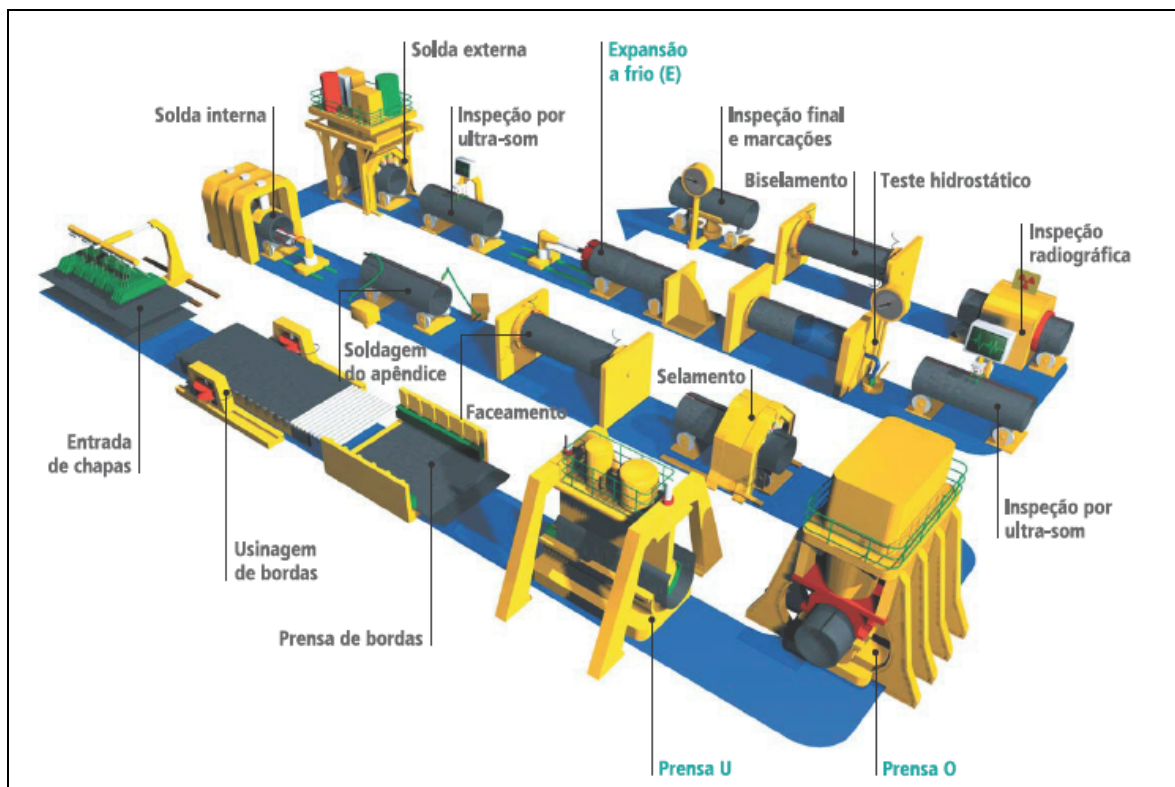


Figura 2.16 – Processo de fabricação de tubos SAW (Submerged Arc Welding)

Longitudinal Formação U-O-E (FONTE: TENARIS CONFAB, 2010).

A Figura 2.17 mostra a conformação mecânica a frio, por dobramento, que ocorre na prensa U durante a fabricação de um tubo através do processo SAW (Submerged Arc Welding) Longitudinal Formação U-O-E.



Figura 2.17 – Conformação mecânica U-O-E (FONTE: TENARIS CONFAB, 2010).

WANG & GONG (2008) dividem os processos de conformação mecânica como trabalho a frio ou a quente, e ainda define a conformação mecânica a frio como um processo de formação ou uma operação de deformação plástica que ocorre a temperaturas abaixo da temperatura de recristalização do material, onde o processo de formação do componente ocorre à temperaturas ambiente.

SAGE (1983) considera que o processo de conformação a frio, durante a formação de tubos, pode alterar significativamente as propriedades mecânicas dos mesmos. Em vários aços este processo diminui a resistência do tubo quando comparado com a chapa.

KOSTRYZHEV *et al.* (2007) que estudaram a influência de precipitados micro-ligados no efeito *Bauschinger* durante o processo de conformação a frio de tubos pelo processo de fabricação U-O-E, consideram que as propriedades de resistência mecânica dos tubos podem sofrer modificações de duas maneiras:

- a) Aumento da resistência, devido ao fenômeno do encruamento (*work-hardening*); e,
- b) Diminuição da resistência, devido ao efeito *Bauschinger*.

A magnitude do efeito *Bauschinger*, que traz como consequência a diminuição das propriedades mecânicas dos metais, pode ser diretamente afetada pelos seguintes fatores (KOSTRYZHEV *et al.*, 2007):

- a) Composição química, através da presença de precipitados microligados e a forma de processamento do material;
- b) Através do tamanho e a distribuição dos precipitados microligados; e,
- c) Presença de encruamento no material.

WILLIAMS (2007) demonstrou experimentalmente a redução do limite de escoamento pelo efeito *Bauschinger*, em aços API 5L X70 e API 5L X80, com diferentes composições químicas, os resultados obtidos estão representados no gráfico da Figura 2.18.

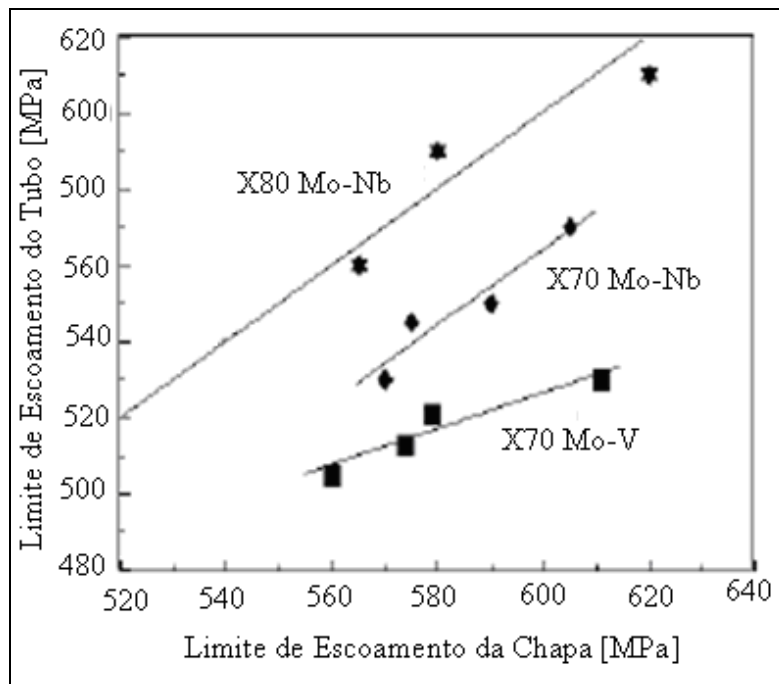


Figura 2.18 – Efeito *Bauschinger*: Aços Mo-V vs. Mo-Nb (FONTE: WILLIAMS, 2007).

## 2.4 - Conformação mecânica a frio no processo de curvamento de tubos em campo

O processo de curvamento a frio em campo é amplamente utilizado para curvas com grande raio de curvatura e pequeno ângulo em gasodutos e oleodutos. Tubos são curvados para acompanhar mudanças angulares súbitas, ou mudanças na direção horizontal dos dutos (MCALLISTER, 2009). Na maioria dos casos, o curvamento de tubos pode ser realizado convenientemente no campo, conforme mostrado na Figura 2.19.



Figura 2.19 – Curvamento em tubo executado em campo através de conformação a frio  
(FONTE: FBTS, 2007).

FUKUDA *et al.* (2003), considera que tubos submetidos ao processo de curvamento a frio têm propriedades mecânicas diferentes de tubos que não foram submetidos a este processo, devido ao encruamento e ao efeito *Bauschinger*, que ocorrem no material durante este processo. Visando um melhor entendimento deste fenômeno, modelou analiticamente e realizou experimentos de curvamento a frio para avaliar a mudança de comportamento das propriedades mecânicas de tubos de aço API 5L X60 e API 5L X80. As amostras preliminarmente aos ensaios de curvamento apresentavam, no sentido longitudinal, os limites de escoamento descritos na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Propriedades mecânicas antes dos ensaios de curvamento a frio (FONTE: FUKUDA *et al.*, 2003).

| <b>Amostras</b> | <b>Limite de Escoamento<br/>(MPa)</b> | <b>Diâmetro Externo<br/>(mm)</b> | <b>Espessura<br/>(mm)</b> |
|-----------------|---------------------------------------|----------------------------------|---------------------------|
| Tubo API 5L X60 | 465                                   | 407,2                            | 13,2                      |
| Tubo API 5L X80 | 633                                   | 610,3                            | 15,4                      |

Ambas as amostras foram submetidas ao processo de curvamento a frio, conforme esquema de curvamento sequencial ilustrado na Figura 2.20, onde o ângulo da curva remanescente posterior ao curvamento foi de 1 grau, as deformações residuais em  $\alpha = 0$ , foi de -1,20% para o tubo API 5L X60 e -1,35% para o tubo API 5L X80. Foram extraídos corpos de prova para ensaio de tração em  $\alpha = 0$  da região de monitoramento das deformações e os resultados mostraram que o tubo de API 5L X60 sofreu uma redução de 6% no limite de escoamento enquanto para o tubo de API 5L X80 esta redução atingiu 27%. A redução no limites de escoamento ( $\sigma_Y$ ) no sentido longitudinal foi atribuída ao efeito *Bauschinger*, com maior predominância no aço de maior resistência e maior razão entre o limite de escoamento e o limite de resistência (FUKUDA *et al.*, 2003).

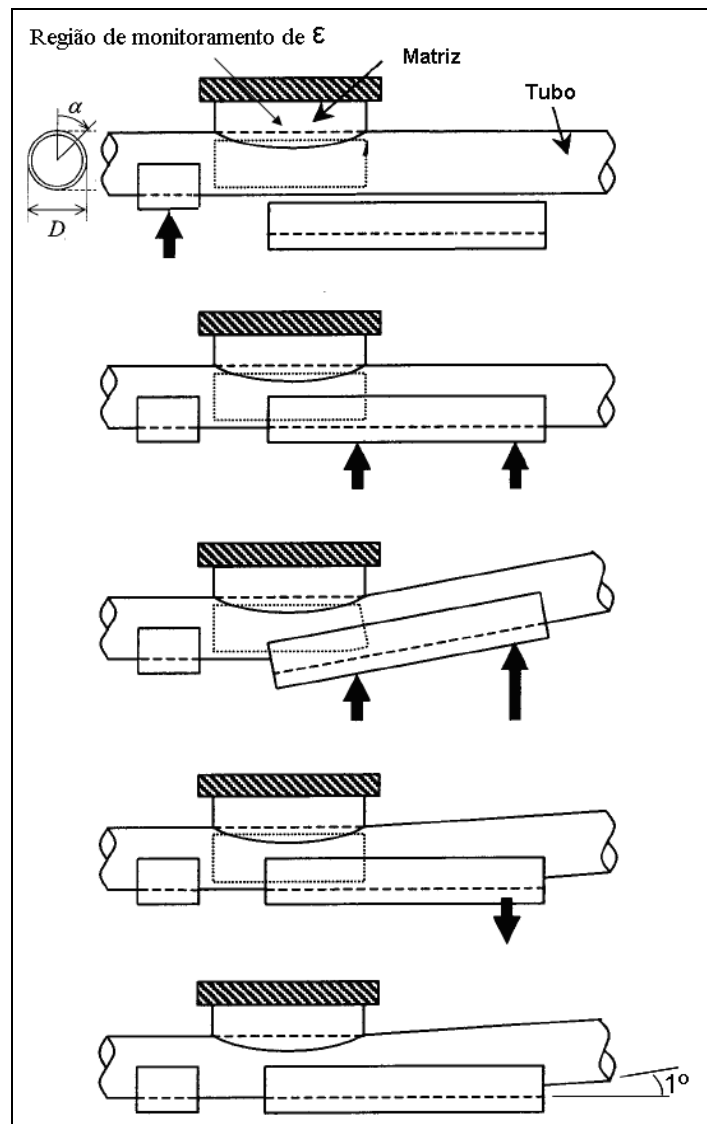


Figura 2.20 – Esquema simplificado dos ensaios de curvamento a frio (FONTE: FUKUDA *et al.*, 2003).

## 2.5 - Tipos de danos em dutos causados pela ação do solo

STEGLICH *et al.* (2005) consideram que os dutos, quando submetidos a terremotos e outros tipos de sobrecargas oriundas de movimentação do solo, podem sofrer deformação

plástica em determinadas regiões da estrutura, que com o acúmulo de ciclos oriundos da continuidade operacional e/ou algum outro tipo de sobrecarga, desenvolverá um dano que cedo ou tarde levará à falha da estrutura. Estes tipos de danos estão diretamente relacionados a processos irreversíveis que ocorrem na microestrutura dos materiais e que afetam a resposta macro e microestrutural do metal. Quando um metal está exposto a um carregamento plástico cíclico, devido ao aumento da amplitude de deformação, mudanças microestruturais tomam conta da região afetada da seguinte forma:

- a) Bandas de deslizamento permanente;
- b) Rearranjo do sistema de discordâncias em células estruturais; e,
- c) Nucleação de vazios e crescimento de inclusões em fases secundárias, sendo estes peculiares às grandes amplitudes de deformação, para as quais a vida útil esperada da estrutura é bem curta.

CZYŻ & WAINSELBOIN (2003) descrevem que os efeitos da ação do solo sobre os dutos podem ocasionar alterações geométricas localizadas, o desvio do traçado original, ou até mesmo levá-los à ruptura.

A pior situação esperada é a ruptura, MUSMAN & SOARES (2002) apresentaram o caso de um rompimento ocorrido em um oleoduto no estado do Paraná, que ocorreu em fevereiro de 2001, onde a ação do solo sobre o duto ocasionou a ruptura, conforme ilustrado na Figura 2.21.



Figura 2.21 – Detalhe do ponto de ruptura em um oleoduto (FONTE: MUSMAN & SOARES, 2002).

Regiões com deformações plásticas podem surgir como efeito da ação do solo sobre os dutos, em forma de flambagem (*buckling*) localizada, conforme demonstrado na Figura 2.22, e de maneira distribuída, onde o novo traçado do duto se assemelha à construção realizada por um processo de curvamento a frio em campo, conforme ilustrado na Figura 2.23 e Figura 2.24. Em ambas as situações, devido ao efeito *Bauschinger*, as regiões deformadas plasticamente podem ter um processo de nucleação de trinca superficial iniciado (TOYODA *et al.*, 2000) e sofrer um conseqüente decréscimo em suas propriedades mecânicas (FAKUDA *et al.*, 2003), podendo com o passar do tempo e a continuidade operacional, ocorrerem vazamentos ou até mesmo a ruptura do duto nestes locais.



Figura 2.22 – Duto com alteração geométrica e deformação plástica localizada (FONTE: GE, 2011).



Figura 2.23 – Duto com alteração de traçado devido à ação do solo (FONTE: ARGENT, 2005) .



Figura 2.24 – Duto com alteração de traçado devido à ação do solo (FONTE: ALIAS, 2010).

As alterações geométricas e o desvio de traçado dos dutos, causados pela sobrecarga do solo, podem apresentar regiões com deformação plástica localizada (STEGlich *et al.*, 2005), onde tais deformações acontecem em condições de temperaturas abaixo da temperatura de recristalização do metal e semelhantes às deformações plásticas oriundas dos processos de conformação a frio realizados nas etapas de fabricação dos tubos (U-O-E) e no curvamento a frio de campo. Consequentemente, os danos referentes à redução de propriedades mecânicas e a possibilidade de um processo de nucleação de trincas superficiais, atribuídos ao efeito *Bauschinger* (SAGE, 1983, TOYODA *et al.*, 2000, FAKUDA *et al.*, 2003, KOSTRYZHEV *et al.*, 2007, KOSTRYZHEV, 2009) devem ser

considerados no processo de avaliação de integridade de um duto avariado por sobrecarga, durante um processo de movimentação do solo.

## **2.6 - Alterações de propriedades mecânicas e nucleação de trincas superficiais em dutos submetidos à deformação plástica**

TOYODA *et al.* (2000) estudaram, experimentalmente e através de modelagem por elementos finitos, o comportamento da iniciação de trincas na fratura dúctil em dutos submetidos a cargas provenientes da movimentação do solo e abalos sísmicos. Eles consideram que as regiões dos dutos submetidas a grandes deformações, como, por exemplo, a flambagem (*buckling*) localizada, têm a sua ductilidade reduzida, o que facilita a iniciação de trincas na superfície da região afetada, e subsequente propagação da mesma através da espessura pelo carregamento cíclico, podendo levar o duto ao vazamento e/ou à ruptura. O processo de nucleação de vazios, na região de amolecimento permanente, oriundo do efeito *Bauschinger* é um fator dominante para a redução drástica ductilidade do material.

JIA *et al.* (2004) realizaram ensaios de tração e dobramento, monitorados através de extensômetros, para avaliar a diminuição do limite de resistência em aços X80 (0,08C, 0,25Si, 1,66Mn, 0,21 Mo, 0,02P, 0,02Ni, 0,03Cr, 0,02Cu, 0,03V, 0,01 Ti, 0,004S e Fe), onde chegou-se a conclusão, através da comparação entre os níveis de deformação obtidos analiticamente e os registrados durante os ensaios, de uma redução significativa no limite de escoamento do material devido ao efeito *Bauschinger*.

HIROYUKI *et al.* (2003) executaram experimentos para avaliação do comportamento de gasodutos de material API 5L X80, submetidos a sobrecarga de movimentação do solo relacionadas a terremotos, conforme ilustrado na Figura 2.25, consideram que a ação do solo sobre os dutos podem atingir centenas de metros em sua extensão, porém deformações plásticas podem ocorrer somente em regiões localizadas.

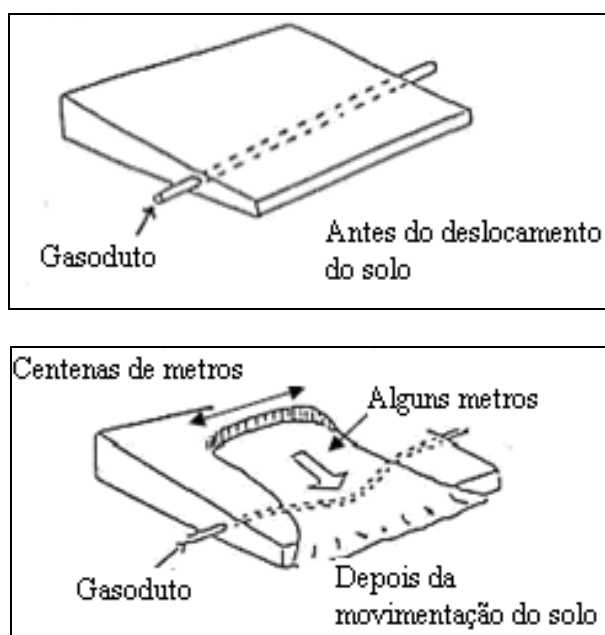


Figura 2.25 – Representação esquemática de um gasoduto submetido à sobrecarga por movimentação do solo (FONTE: HIROYUKI *et al.*, 2003).

Os ensaios realizados por HIROYUKI *et al.* (2003) para avaliar o comportamento de tubos previamente curvados em campo sobre a ação de sobrecarga de movimentação do solo, foram realizados conforme a representação esquemática da Figura 2.26, os tubos foram submetidos a pressão interna equivalente a 40% do limite mínimo de escoamento especificado (SMYS) do material na tensão circunferencial (*hoop stress*), e posteriormente

o dispositivo hidráulico de carga foi acionado até que  $\omega_b$  atingisse o valor 8,7 graus. Em seguida aos ensaios foram retirados corpos de prova em regiões de máxima deformação, para execução de ensaios de tração visando à análise das propriedades mecânicas, no sentido longitudinal, remanescentes do material. Na região extradorso da curva que foi submetida à deformação trativa ( $\epsilon=0.96\%$ ) registrou-se uma redução de 5,2% no limite de escoamento e na região intradorso da curva que foi submetida à deformação compressiva ( $\epsilon=1.17\%$ ) foi registrado um aumento no limite de escoamento de 10%, tais mudanças nas propriedades mecânicas dos materiais foram atribuídas ao efeito *Bauschinger* e ao encruamento do material, respectivamente.

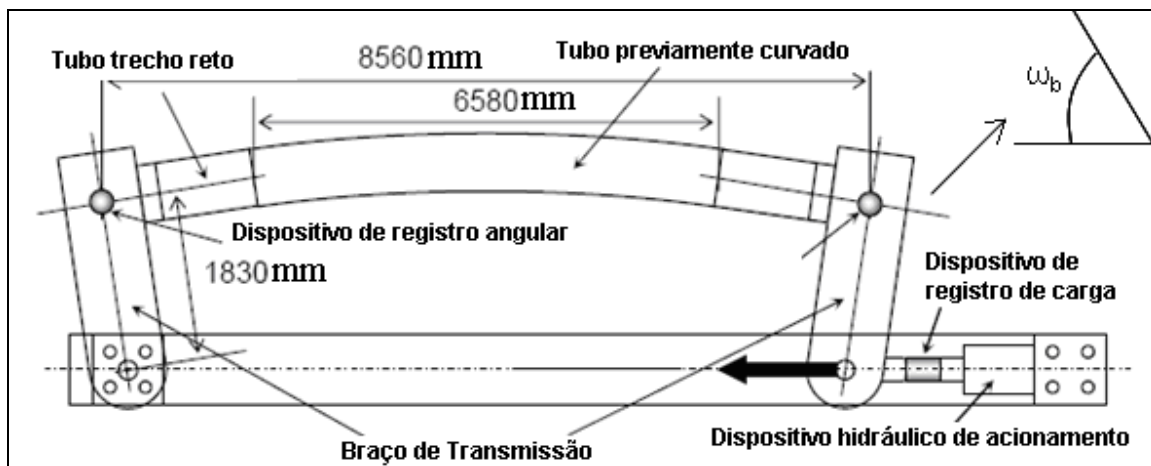


Figura 2.26 – Representação esquemática do ensaio de simulação da ação do solo sobre dutos (FONTE: HIROYUKI *et al.*, 2003).

Para avaliar o comportamento da deformabilidade em trechos retos, HIROYUKI *et al.* (2003) executaram ensaios de compressão axial em dois tubos submetidos a pressão interna equivalente a 40% do SMYS do material na tensão circunferencial, fabricados de

aço API 5L X80, 16 polegadas de diâmetro e 9,4mm de espessura. As razões entre os limites reais de escoamento ( $\sigma_y$ ) e ruptura ( $\sigma_r$ ) no sentido longitudinal de cada amostra foram de 0,80 e 0,95. Os autores não tecem comentários referentes ao esquema de montagem e monitoramento deste ensaio. O gráfico ilustrado na Figura 2.27 mostra o comportamento da deformação em relação à carga axial aplicada, onde se demonstrou que a instabilidade geométrica ocorreu nos picos de deformação registrados nos ensaios, ou seja, para a amostra de  $\sigma_y/\sigma_r = 0,8$ , a deformação máxima ocorreu em  $\varepsilon = 1,8\%$ , e para a amostra de  $\sigma_y/\sigma_r = 0,95$ , a deformação máxima ocorreu em  $\varepsilon = 0,69\%$ .

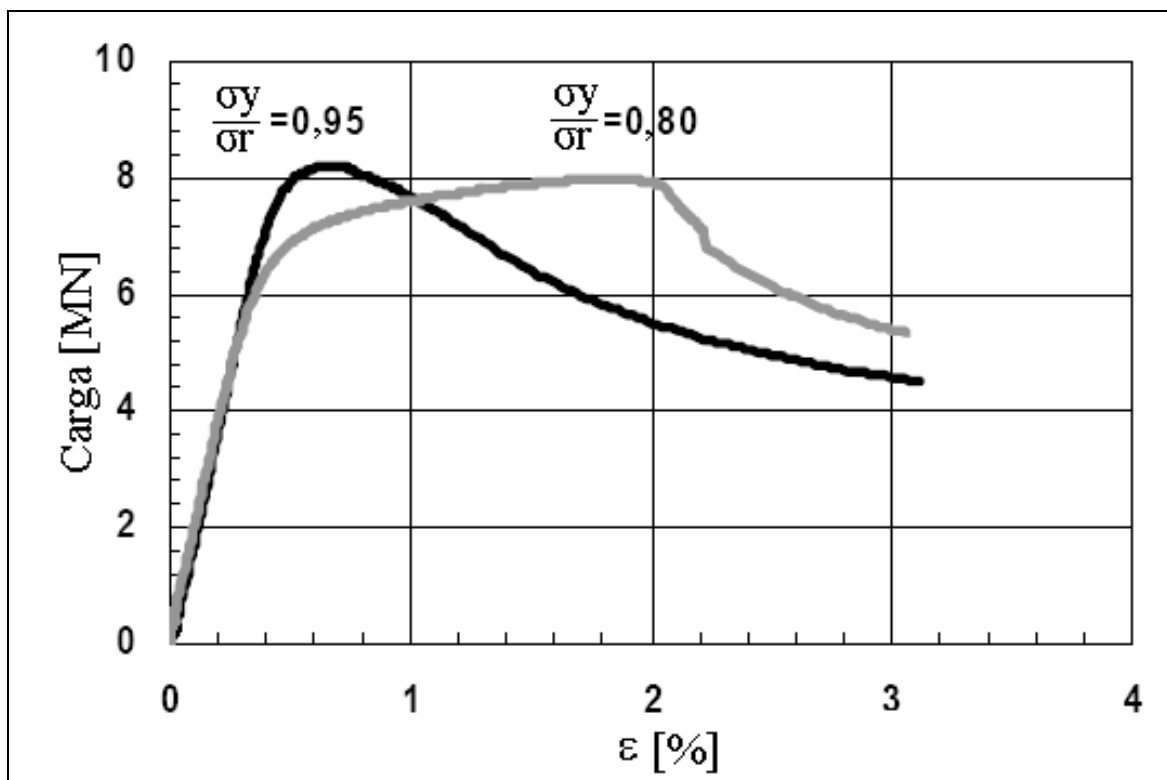


Figura 2.27 – Resultados dos ensaios de deformabilidade em aços API 5L X80 (FONTE: HIROYUKI *et al.* 2003).

Depois do grande terremoto de 1995, em Hyogoken-nambu no Japão, onde várias estruturas foram danificadas e muitas vidas foram perdidas, iniciou-se em todo o país um processo de revisão nos códigos de projeto de várias estruturas submetidas a abalos sísmicos. A Associação Japonesa de Gás iniciou um projeto de pesquisa com o objetivo de aumentar a segurança de gasodutos de transmissão, submetidos a deslocamentos permanentes relacionados com terremotos (MIKI *et al.*, 2000).

O foco do estudo apresentado por MIKI *et al.* (2000) é a avaliação das propriedades mecânicas e o comportamento de curvas de aço utilizadas em gasodutos de transporte, submetidas a sobrecargas pela movimentação do solo. O estudo foi direcionado para análise em curvas, pois se considerou devido à flexibilidade estrutural, que a ocorrência de deformações acentuadas relacionadas com a movimentação do solo, acontece nestas regiões. O esquema experimental está ilustrado na Figura 2.28, onde a metodologia de aplicação da carga difere do método utilizado por HIROYUKI *et al.* 2003, simplesmente pelo fato da carga de curvamento ter sido aplicada em modo de tração e de compressão. Os materiais das amostras são de aço API 5L X52 ( $\sigma_y \geq 358\text{MPa}$  e  $\sigma_y \geq 455\text{MPa}$ ), API 5L X65 ( $\sigma_y \geq 448\text{ MPa}$  e  $\sigma_y \geq 530\text{MPa}$ ) e JIS PT 370 ( $\sigma_y \geq 215\text{MPa}$  e  $\sigma_y \geq 370\text{MPa}$ ). Os raios de curvatura utilizados nos ensaios foram de 1,5D e 3D, e os ângulos das curvas 11,25°, 22,5°, 45° e 90°. As curvas dos materiais de aço API 5L X52 e API 5L X65 foram feitas por indução e as curvas do aço JIS PT 370 foram feitas por conformação a frio.

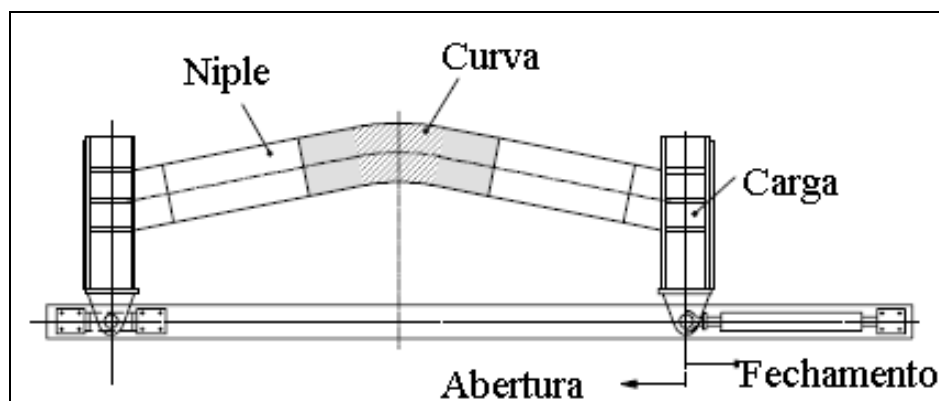


Figura 2.28 – Representação esquemática do ensaio de simulação da ação do solo sobre dutos (FONTE: MIKI *et al.*, 2000).

Foram realizados 21 ensaios, onde a aplicação da carga de abertura ou fechamento do dispositivo de aplicação da carga foi limitada ao momento de curvamento máximo (antes da instabilidade geométrica) em cada amostra, conforme ilustrado na Figura 2.29. Após a análise das regiões de maior deformação plástica, constatou-se a existência de trincas superficiais e/ou passantes em 66% das amostras.



Figura 2.29 – Instabilidade geométrica durante ensaios de sobrecarga compressiva (FONTE: MIKI *et al.*, 2000).

HASHEMI (2011) realizou ensaios de tração e de dureza HV em tubos API 5L X65 em amostras de metal base, metal de solda e na zona termicamente afetada, visando estabelecer uma correlação estatística entre os valores de dureza e o limite de escoamento do material. O autor considera que na área dutoviária, a análise da magnitude do limite de escoamento através da correlação da dureza superficial do metal pode ser utilizada como um indicativo de resistência do material ao colapso plástico. Os principais resultados do trabalho são mostrados na Figura 2.30 e Figura 2.31, onde é possível observar através das funções de densidade de probabilidade, as propriedades mecânicas do material no metal base e na solda, e através da frequência amostral o comportamento da dureza HV no metal base.

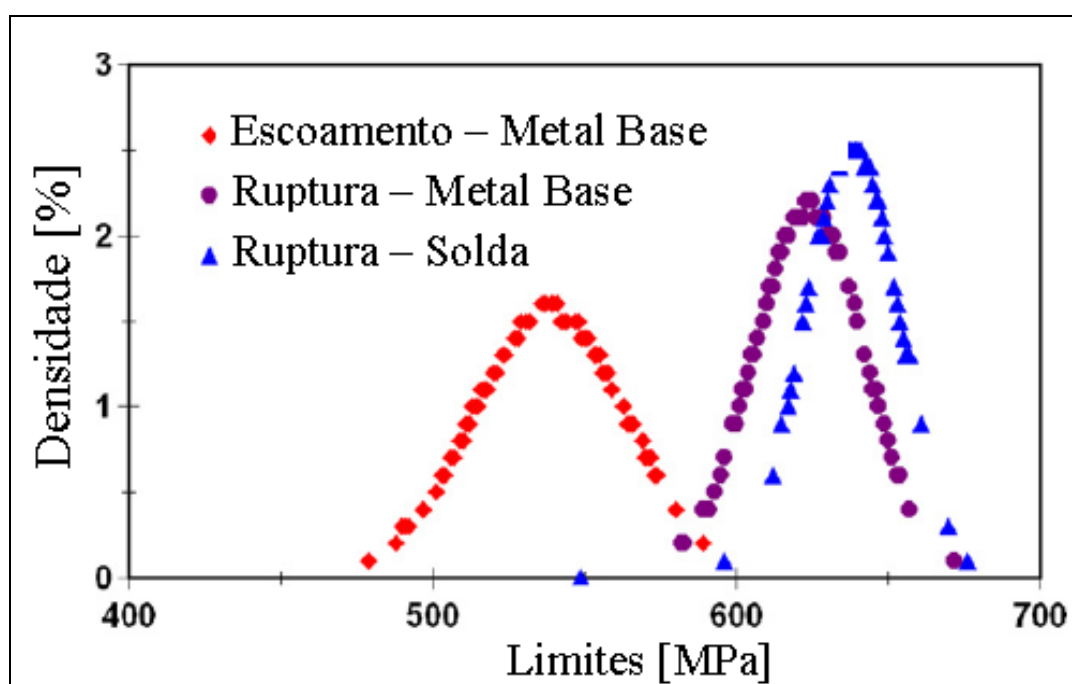


Figura 2.30 – Funções de densidade de probabilidade – Propriedades mecânicas (FONTE: HASHEMI, 2011).

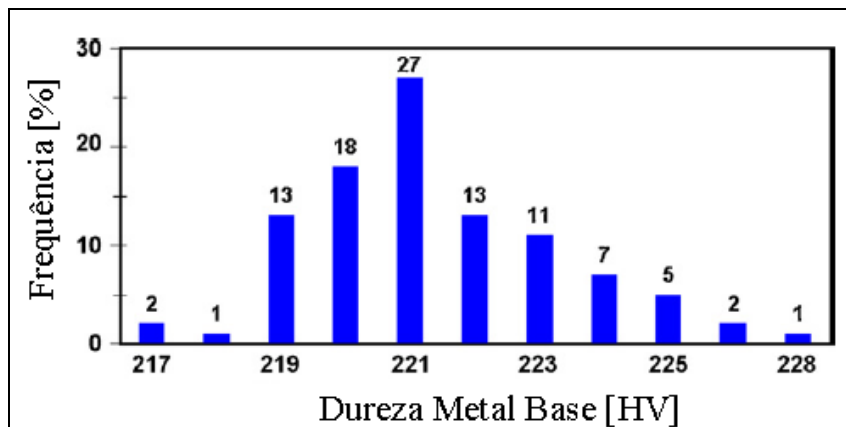


Figura 2.31 – Dureza (FONTE: HASHEMI, 2011).

AMEND & CLARK (2009) estabeleceram critérios de padronização para a metodologia de correlacionar valores de dureza com limites de escoamento em metais, para aplicação em dutos em operação e na Figura 2.32 apresentam a relação entre a dureza e o limite de escoamento para materiais ARBL no metal base.

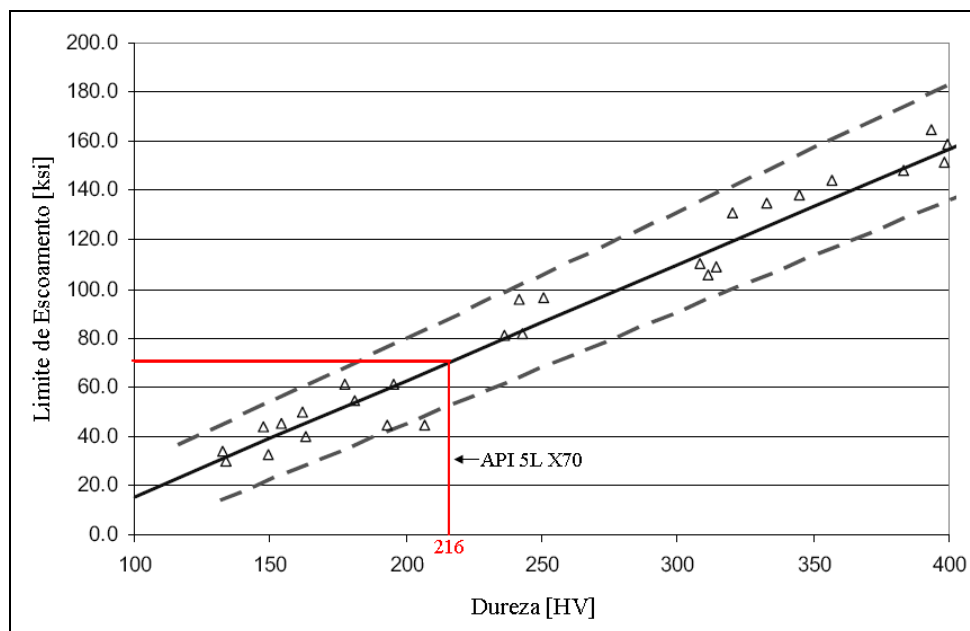


Figura 2.32 – Relação entre a dureza e o limite de escoamento para aços ARBL (FONTE: AMEND & CLARK, 2009, modificado).

## 2.7 - Metodologia para identificação de regiões de possível deformação plástica

Considerando que as deformações plásticas em um trecho de duto avariado pela movimentação do solo acontecem em regiões localizadas (HIROYUKI *et al.*, 2003), no processo de avaliação de integridade deste tipo de avaria é de fundamental importância, que preliminarmente à realização de ensaios para análises de tensões, sejam estabelecidos critérios para escolha dos locais de inspeção.

PURVIS & HÜWENER (2009) utilizaram dados de inspeção por pigs instrumentados inerciais para definição das regiões de elevada deformação e locais de deslocamento do duto. A metodologia utiliza os dados de inspeções por pig instrumentado (Figura 2.34 e Figura 2.35), munido de uma unidade de mapeamento inercial, onde é registrado o traçado do duto através das coordenadas geodésicas (x, y, z), com precisão submétrica. Através da comparação dos dados registrados em duas inspeções inerciais é possível identificar os locais de deslocamento do duto ao longo do trecho inspecionado, conforme ilustrado na Figura 2.33, além da obtenção dos locais de maior deformação.



Figura 2.33 – Registro de movimentação do duto através da comparação de dados de duas inspeções inerciais (FONTE: PURVIS & HÜWENER, 2009).

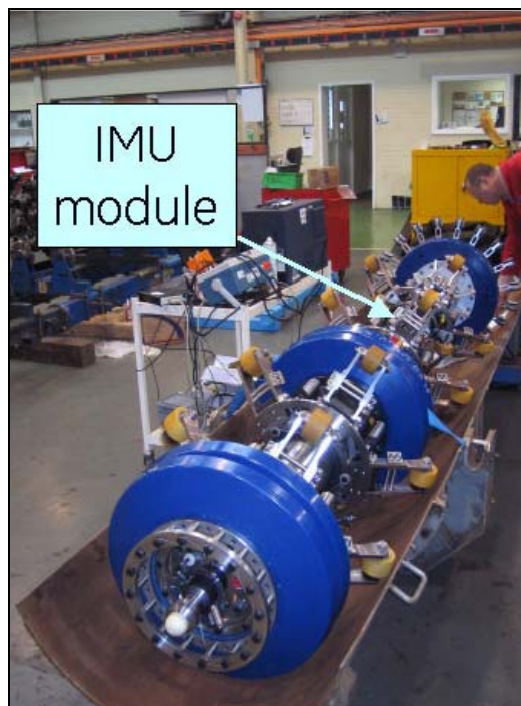


Figura 2.34 – Pig instrumentado de inspeção inercial e geométrica (FONTE: PURVIS & HÜWENER, 2009).

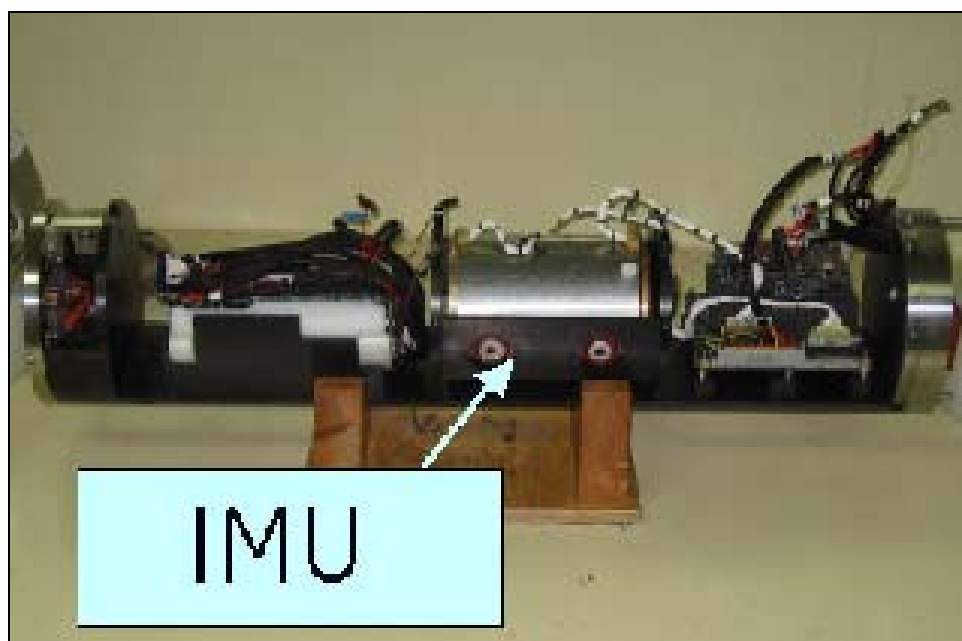


Figura 2.35 – Unidade de mapeamento inercial (FONTE: PURVIS & HÜWENER, 2009).

KISHAWY & GABBAR (2010) sugerem a modelagem do trecho avariado, pela abordagem clássica de resistência dos materiais, onde o duto é considerado em condições de vão livre, e as maiores deformações coincidindo com as regiões de maior momento, devendo ser dada maior atenção à região de maior flecha, especialmente nas superfícies intradorso e extradorso.

Baseados na literatura três critérios são apresentados, porém não limitados a estes:

- a) De acordo com os resultados experimentais de MIKI *et al.* (2000) e HIROYUKI *et al.* (2003), é essencial a inspeção para análise de tensões em curvas conformadas a frio em campo e/ou curvas fabricadas por indução, caso o trecho de movimentação do duto contemple este tipo de instalação;
- b) A inspeção para análise de tensões nos trechos de deslocamento e regiões de grande deformação do duto, de acordo com a metodologia apresentada por PURVIS & HÜWENER (2009), baseada em resultados de inspeções por pigs instrumentados; e,
- c) Análise de tensões nas regiões de maior deformação, baseada na abordagem clássica da resistência dos materiais, de acordo com a sugestão de KISHAWY & GABBAR (2010).

## **2.8 - Métodos de medição de tensões residuais**

RUUD (2008) considera que para a escolha entre as diversas metodologias disponíveis para medição de tensão, é preponderante avaliar se o componente a ser analisado pode ser deslocado até o equipamento de medição de tensões ou se o equipamento deve ser levado até a estrutura a ser avaliada. Em alguns casos é possível remover uma seção do componente e levá-la até o equipamento de medição de tensões residual, porém nestas situações esta escolha deve ser avaliada com cautela, pois o processo de remoção da seção poderá alterar significativamente o campo de tensões, através do relaxamento ou por indução de tensões na peça seccionada. Na prática, as metodologias por difração de raios-X (método não destrutivo) e furo cego/extensometria (método destrutivo), por serem portáteis, abrangem a medição de tensões residuais desde em pontes até em aviões.

Um dos principais fatores que podem afetar a qualidade dos resultados dos ensaios de medição de tensão são as condições da superfície ensaiada. Superfícies lixadas, usinadas, esmerilhadas, etc. podem afetar significativamente a distribuição interna das tensões do componente ensaiado, desta maneira, o preparo da superfície na região de ensaio é de fundamental importância no processo (KANDIL *et al.*, 2001).

HAUK (1997) classifica as metodologias de medição de tensões residuais em quatro categorias: mecânica, difração, ultrassom e micromagnética, conforme ilustrado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Principais características das técnicas de medição de tensões residuais  
(FONTE: HAUK, 1997).

| <b>Princípio</b> | <b>Técnicas</b>                                      | <b>Quantidades Medidas</b>                                                                                                                           | <b>Tensões Medidas</b> |
|------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Mecânico         | Furo Cego, Remoção de Camadas, etc.                  | Deformação causada pela relaxação das tensões.                                                                                                       | Tipo I                 |
| Difração         | Raios-X, Nêutrons e Radiação Synchrontron            | Ângulos de Bragg e variação das distâncias interplanares.                                                                                            | Tipo I e II            |
| Ultrasom         | Acustoelasticidade                                   | Velocidades ou tempo de percurso de ondas ultrassônicas de Rayleigh, longitudinais, etc., que se propagam através do material.                       | Tipo I                 |
| Micromagnético   | Magnética Indutiva, Magnetoelástica e Ferromagnética | Permeabilidade, intensidade do campo magnético tangencial ( $H_t$ ), parâmetros de correntes parasitas, amplitude do ruído acústico Barkhausen, etc. | Tipo I, II e III       |

Para escolha da metodologia de medição de tensão a ser utilizada é importante considerar as dimensões lineares dos campos de tensões que estão sendo investigados. Os

locais que requerem a aplicação de ensaios de tensões residuais são de diferentes tamanhos, podendo variar de dutos de grandes diâmetros até pequenos microchips. As extensões dos campos de tensões existentes nestes componentes estão demonstradas na Figura 2.36, através da dimensão linear dos defeitos e microestrutura. Diversas características devem ser consideradas na determinação da técnica a ser empregada para a análise de tensões em uma estrutura e uma das principais características é a avaliação do alcance da cobertura dos ensaios aplicados. Entre as técnicas de ensaios não destrutivos para medição de tensões a que apresenta a maior abrangência dimensional de cobertura é a técnica de difração de raios-X, cujo range de cobertura inclui a avaliação de campos de tensões de  $10^{-8}$  m até  $10^{-1}$  m (HAUK, 1997).

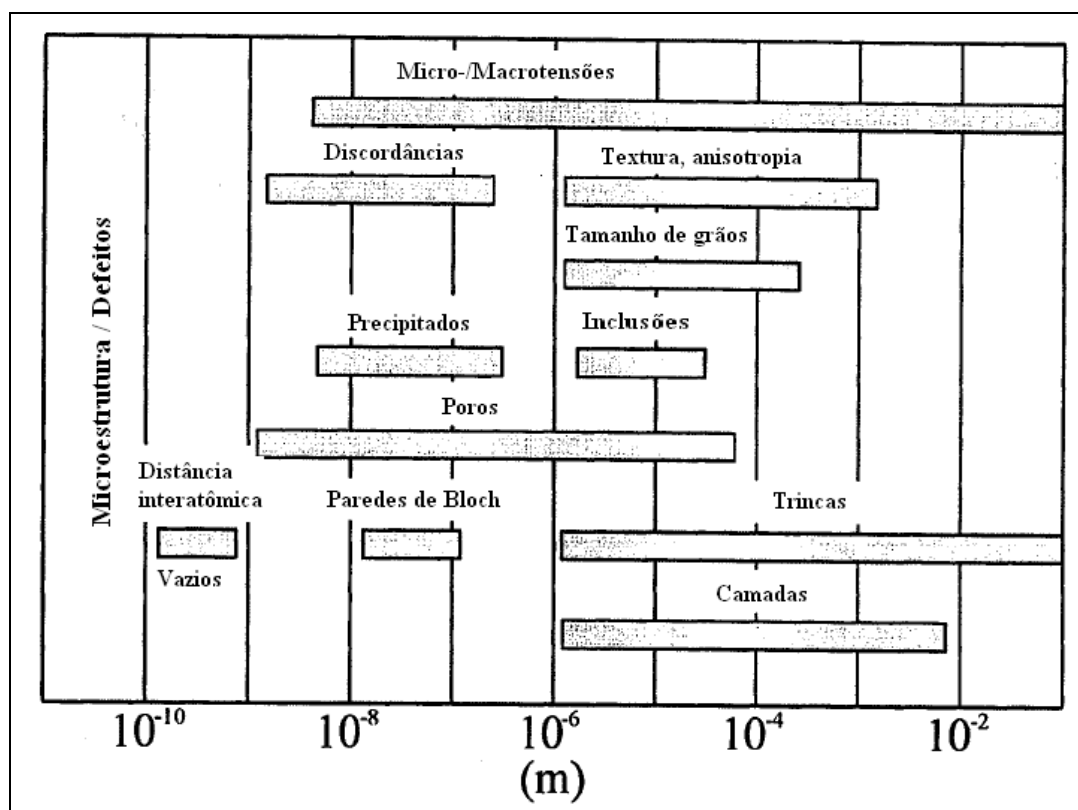


Figura 2.36 – Dimensão linear dos defeitos e microestruturas. (FONTE: HAUKE, 1997).

Segundo PREVÉY (1996), a medição de TR por difração de raios-X é uma ferramenta poderosa para ser utilizada em processos de análise de danos e falhas. A quantificação das tensões residuais existentes em um componente, que podem acelerar ou retardar os processos de fadiga e corrosão sob tensão, é crucial no entendimento e na análise de danos e falhas estruturais.

A tensão determinada através de difração de raios-X é uma média aritmética da tensão em um determinado volume do material definido pela área irradiada vs. penetração do feixe de raios-X, tais regiões podem variar de centímetros quadrados até regiões menores que milímetros quadrados na superfície e a profundidade de penetração equivalente as diferentes fontes de radiação (Cr-K $\alpha$ , Cu-K $\alpha$ , Mo-K $\alpha$ , etc.) (HAUK, 1997, PRÉVEY 1996). A Figura 2.37 mostra a comparação do alcance de penetração na superfície dos diversos tipos de ensaios de medição de tensões.

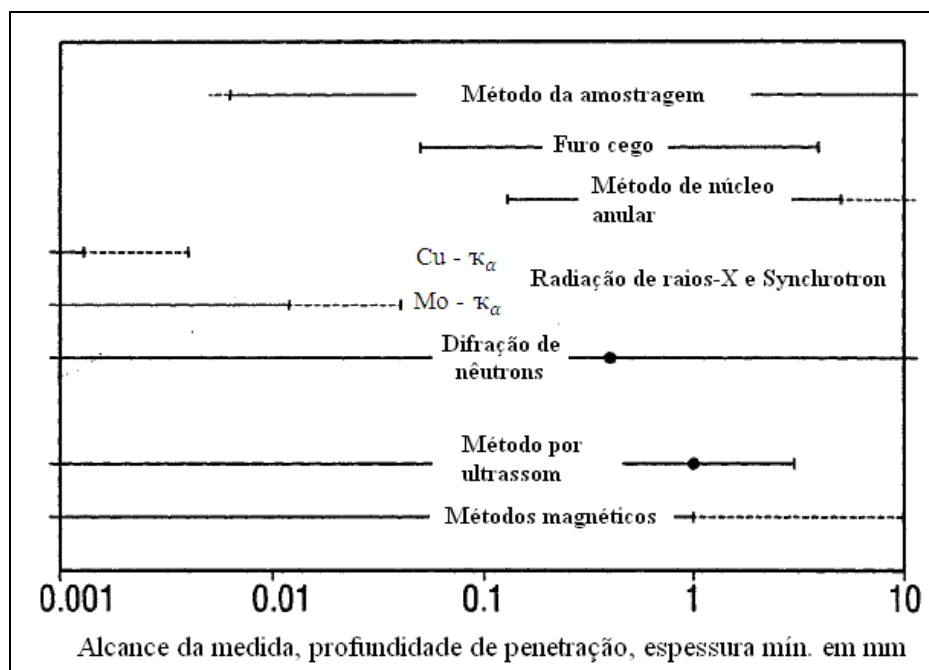


Figura 2.37 – Alcance de penetração das técnicas de medição de tensões (FONTE: HAUKE, 1997).

Alguns exemplos de equipamentos portáteis de medição de difração por raios-X disponíveis no mercado estão ilustrados nas Figuras 2.37, 2.38, 2.39, 2.40 e 2.41.



Figura 2.38 – Equipamento portátil de medição de tensões residual por difração de raios-X , Stressrad (FONTE: Radicon).



Figura 2.39 – Equipamento portátil de medição de tensões residual por difração de raios-X ( $\text{Sen}^2\Psi$ ) (FONTE: Stresstech Group).



Figura 2.40 – Aplicação na análise de tensões residuais em tubos (FONTE: Stresstech Group).



Figura 2.41 – Aplicação na análise de tensões residuais em dutos em operação (FONTE: Stresstech Group).

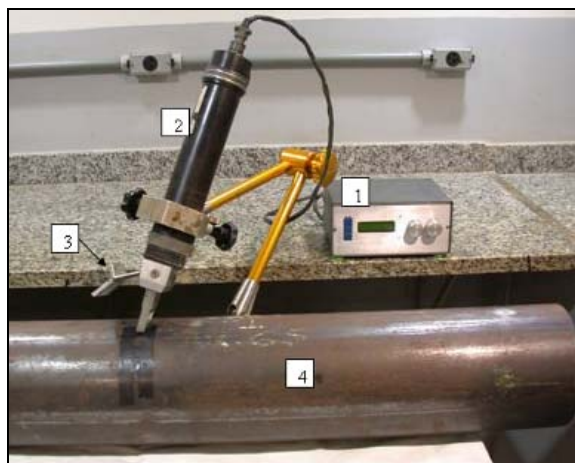


Figura 2.42 – Equipamento portátil de medição de tensões residual por difração de raios-X  
(Dupla exposição) - (FONTE: LAT/UFF).

Segundo WITHERS & BHADSHIA (2001), a metodologia de medição de TR por furo cego combinada com extensometria é uma metodologia barata e amplamente utilizada, sendo inclusive já aplicada na medição de tensões residuais de materiais poliméricos. Equipamentos portáteis de medição de tensões residuais por furo cego estão ilustrados na Figura 2.43 e Figura 2.44.

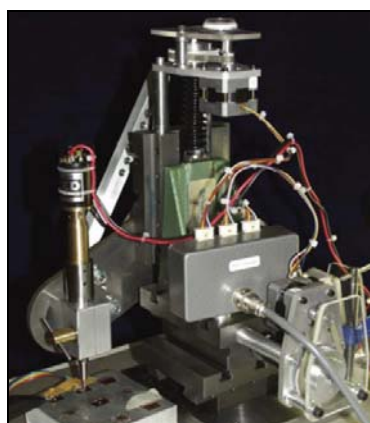


Figura 2.43 – Equipamento de medição de tensões residuais pela metodologia do furo-cego  
(FONTE: LORD, 2009).



Figura 2.44 – Equipamento de medição de tensões residuais pela metodologia do furo-cego

(FONTE: KANDIL *et al.*, 2001).

Na aplicação da metodologia de medição de tensões por furo cego deve ser levada em consideração a possibilidade de erros relacionados com a existência de fortes gradientes de tensão e pela existência de deformações plásticas na região de medição, causadas pela concentração de tensões induzida pelo próprio furo e pelas tensões residuais pré-existentes. WITHERS & BHADSHIA (2001) consideram que para minimizar os erros nos resultados obtidos, esta metodologia de ser aplicada para avaliar tensões residuais de até 50% do limite de escoamento do material; PRÉVEY (1986) descreve que a metodologia deve ser aplicada para avaliar tensões residuais de até 60% do limite de escoamento do material; LORD (2009) considera que a metodologia deve utilizada em 70% do limite de escoamento do material; e, RUUD (2008) apresenta que a deformação causada pelo próprio furo em aços, devido a remoção de metal na região de medição, pode gerar erros de até 69 MPa.

As principais limitações da metodologia de medição de tensão por difração de raios-X estão relacionadas com a profundidade de penetração da medida realizada, gerando a necessidade da realização de polimento eletrolítico caso seja necessário a avaliação das tensões através da espessura do componente, o material analisado deve ser policristalino, com tamanhos de grãos finos e não ter texturas severas (RUUD, 2008, PRÉVEY, 1986).

As metodologias de medição de tensões por difração de raios-X e furo cego combinado com extensometria, estão fundamentadas pelas seguintes normas técnicas:

a) Furo Cego combinado com extensometria:

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS
  - i. ASTM E837 - Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method.

b) Difração de raios-X:

- BRITISH STANDARD
  - i. BSI BS EN 15305 - Non-destructive Testing - Test Method for Residual Stress analysis by X-ray Diffraction;
  - ii. BSI BS EN 13925-1 - Non-destructive testing - X-ray diffraction from polycrystalline and amorphous materials - Part 1: General principles;
  - iii. BSI BS EN 13925-2 - Non-destructive testing - X-ray diffraction from polycrystalline and amorphous materials - Part 2: Procedures;

- iv. BSI BS EN 13925-3 - Non-destructive testing - X-ray diffraction from polycrystalline and amorphous materials - Part 3: Instruments;
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS
  - i. ASTM E 1426 - Standard Test Method for Determining the Effective Elastic Parameter for X-Ray Diffraction Measurements of Residual Stress;
  - ii. ASTM E 915 - Standard Test Method for Verifying the Alignment of X-Ray Diffraction Instrumentation for Residual Stress Measurement.
- SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS
  - i. SAE J784a - Residual Stress Measurement by X-Ray Diffraction
- INTERNATIONAL CENTRE FOR DIFFRACTION DATA (Recommended Methods and Practices)
  - i. 5.2.1 - Sample Preparation Methods in X-ray Powder Diffraction
  - ii. 6.1.1 - Standard Reference Materials for X-ray Diffraction Part I: Overview of Current and Future Materials
  - iii. 6.2.1 - Standard Reference Materials for X-ray Diffraction. Part II: Calibration Using d-Spacing Standards

- iv. 7.1.1 - Optimization of Stepsize in X-ray Powder Diffractogram Collection
- v. 8.2.1 - A Practical Method for the Determination of the Instrumental Full Width at Half Maximum
- vi. 10.2.1 - PC-PDF.: A Search/Display System Utilizing the CD-ROM and the Complete Powder Diffraction File
- vii. 11.1.1 - Quantitative X-ray Powder Diffraction Method Using the Full Diffraction Pattern
- viii. 11.2.1 - RIR - Measurement and Use in Quantitative XRD
- ix. 11.3.1- High Temperature X-ray Diffraction - A Primer
- x. 11.7.1- Reference Intensity Ratios (a listing)
- xi. 11.8.1- The Reference Intensity Ratio: Its Measurement and Significance

## **2.9 - Medição de dureza com equipamento portátil pelo método da impedância ultrassônica de contato (UCI)**

O ensaio de dureza através do método da impedância ultrassônica de contato (UCI - *Ultrasonic Contact Impedance*) é fundamentado no registro da alteração da frequência de uma haste ressonante, causada pela natureza elástica da área finita de contato entre a superfície de ensaio e o penetrador durante o ensaio (FRANK, 2006, FRANK, 2011).

Uma das grandes questões referentes aos testes convencionais de dureza Vickers ou Brinell é a determinação das dimensões remanescentes no material ensaiado, oriundas da

aplicação da carga pelo indentador. Já no ensaio de dureza pelo método da impedância ultrassônica de contato, as dimensões das diagonais provenientes do processo de indentação não são determinadas opticamente como nos ensaios convencionais, tais dimensões são detectadas eletronicamente através da medição de uma frequência ultrassônica. A sonda de medição é composta essencialmente por um diamante Vickers acoplado na ponta de uma haste metálica. Durante o ensaio esta haste é excitada na direção longitudinal através de um transdutor piezoelétrico na frequência de ressonância de aproximadamente 70.000 Hz, a representação esquemática simplificada da sonda é mostrada na Figura 2.45 (FRANK, 2006, FRANK, 2011).

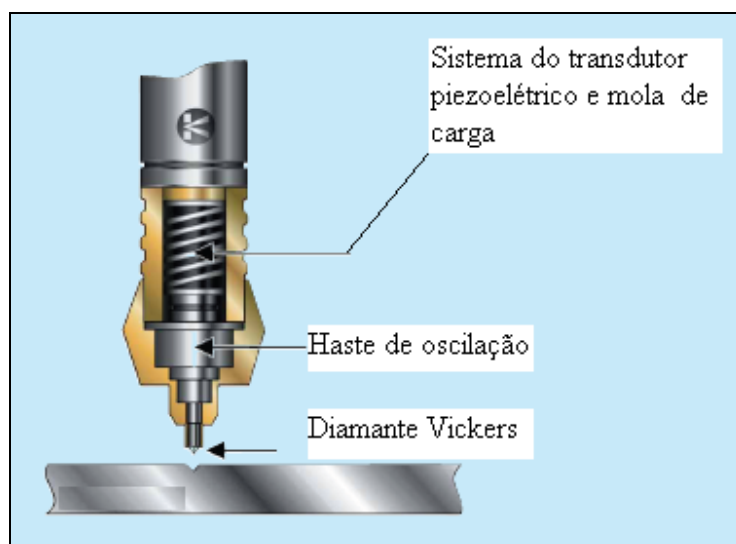


Figura 2.45 – Representação esquemática da sonda de medição de dureza pelo método da impedância ultrassônica de contato (FRANK, 2006).

Uma carga específica é aplicada na haste através da ação de uma mola, onde a ponta contendo o diamante Vickers penetra no material, criando um contato elástico, que resulta na variação da frequência da haste. Esta variação está relacionada diretamente com a superfície de contato do diamante Vickers no material ensaiado, e, conseqüentemente, com

o tamanho da indentação criada pelo ensaio. Assim, para materiais macios, uma maior penetração do diamante ocorre, gerando grandes alterações na variação da frequência, conforme ilustrado no gráfico da Figura 2.46, onde é possível observar a relação entre as variações de frequência registradas pela sonda do durômetro com a dureza Vickers (FRANK, 2006).

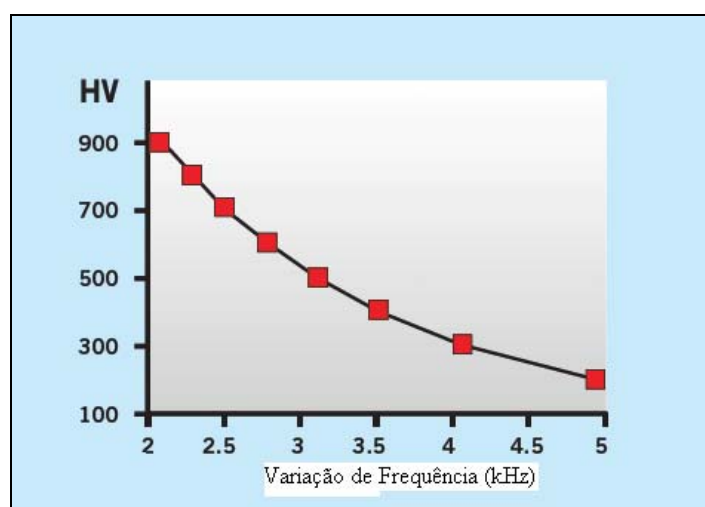


Figura 2.46 – Representação dureza vs. frequência no registro da sonda de medição  
(FONTE: FRANK, 2006).

O equipamento monitora constantemente a frequência de ressonância do sistema e registra a variação da frequência quando a carga para o ensaio é aplicada, apresentando instantaneamente o valor da dureza medido. A Figura 2.47 apresenta o equipamento portátil com a sonda automatizada em uma aplicação real de ensaios de dureza na ZTA de uma solda circunferencial em duto (FRANK, 2006).

Comercialmente é possível encontrar sondas de medição com cargas variando entre 1 a 98 N, em diversos tipos de configuração e tamanhos, podendo ainda ser operadas de forma automatizada (Figura 2.47) ou manualmente (Figura 2.48). A Figura 2.49 ilustra os

principais tipos e acessórios disponíveis para estes equipamentos (FRANK, 2006, FRANK, 2011).

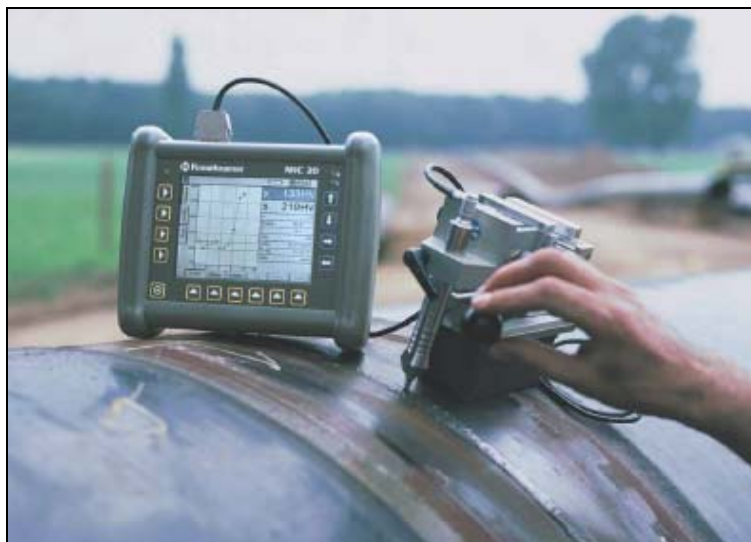


Figura 2.47 – Equipamento portátil com sonda automatizada de ensaios de dureza pelo método impedância ultrassônica de contato (FONTE: FRANK, 2006).



Figura 2.48 – Equipamento portátil com sonda manual de ensaios de dureza pelo método impedância ultrassônica de contato (FONTE: FRANK, 2006).



Figura 2.49 – Acessórios e equipamentos portáteis de ensaios de dureza UCI (1) Unidade eletrônica de processamento; (2) Sondas de carga; (3) Gabarito de automatização do ensaio; e, (4) Bloco padrão. (FONTE: FRANK, 2006).

A metodologia de ensaios de dureza UCI está fundamentada pela norma técnica da ASTM A1038 (ASTM, 2010).

## Capítulo 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido em duas etapas, a saber: 1) avaliação em laboratório do comportamento das tensões e da dureza no aço API 5L X70 no regime elástico e plástico; e, 2) avaliação e comparação dos resultados de tensões medidas em um trecho de um gasoduto em operação que sofreu sobrecarga pela movimentação do solo (TBG, 2010). Nos ensaios de laboratório o aço foi submetido a um processo de deformação plástica, com o objetivo de descrever o desempenho do material em regiões estiradas plasticamente, a fim de estabelecer parâmetros de comparação para o processo de avaliação de integridade em regiões de dutos deformados plasticamente pela ação do solo.

### 3.1 - Material utilizado nos ensaios

O material utilizado em todas as etapas trabalho foi o aço de alta resistência e baixa liga (ARBL), API 5L X70, conforme a norma API 5L (API, 2004), por laminação a quente. A composição química (teor em peso) nominal deste aço, segundo a respectiva norma, é apresentada na Tabela 3.1. As propriedades mecânicas deste aço são apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.1 – Composição química especificada, do aço API 5L X70, % em peso, (API, 2004).

| <b>Máximo</b>                   | <b>C</b> | <b>Mn</b> | <b>P</b> | <b>S</b> | <b>Nb</b> | <b>Ti</b> | <b>V</b> |
|---------------------------------|----------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|----------|
| Chapa – Norma<br><br>API 5L X70 | 0,076    | 1,512     | 0,016    | 0,002    | 0,048     | 0,018     | 0,046    |

Tabela 3.2 – Propriedades mecânicas do tubo API 5L X70 (API, 2004).

| <b>Material</b> | <b>Limite de<br/>Escoamento (SMYS)<br/>[MPa]</b> | <b>Limite de<br/>Resistência<br/>(SMUTS) [MPa]</b> | <b>Alongamento<br/>(%)</b> |
|-----------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------|
| API 5L X70      | 483                                              | 565                                                | 40                         |

O tubo foi fabricado na CONFAB, pelo processo de conformação mecânica a frio U-O-E, conforme ilustrado na Figura 2.16. A soldagem longitudinal foi realizada pelo processo SAW.

### **3.1.1 - Revestimento externo dos materiais**

O tubo utilizado nos ensaios de laboratório foi revestido externamente, durante o processo de fabricação, com FBE (*Fusion-Bonded Epoxy*), conforme mostrado na Figura 3.1, cuja metodologia consiste na aplicação do epóxi em pó através de pistolas eletrostáticas, sobre a superfície do tubo, formando uma camada uniforme, que cura imediatamente após sua aplicação. A espessura usual para este sistema varia entre 350 e 450µm e a temperatura de operação do duto, na qual esse sistema pode ser empregado é de até 90° C (SOCOTHERM BRASIL, 2011).

A região inspecionada em campo foi revestida durante a fase de construção do gasoduto com manta termocontrátil que é um revestimento constituído em um laminado de polietileno extrudado reticulado e estirado, que sob aquecimento contrai até sua dimensão original. A face interna é envolvida por um adesivo anticorrosivo termo-sensível e sua principal aplicação é no uso para a proteção anticorrosiva das juntas soldadas em dutos campo. É compatível com os principais tipos de revestimentos dos tubos e considerável

aderência, flexibilidade e resistência a danos mecânicos e a agentes químicos e biológicos. A Figura 3.2 ilustra um exemplo de uma manta termocontrátil danificada, em um duto que sofreu sobrecarga do solo (ARGENT, 2005).

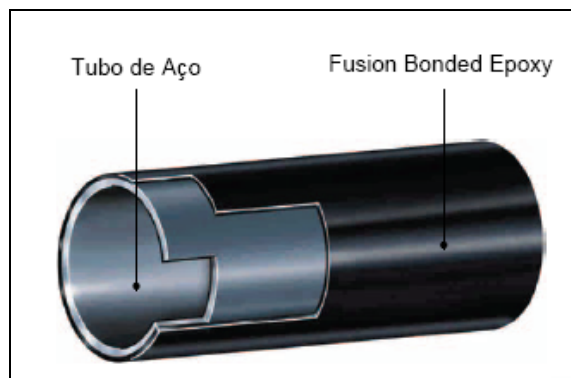


Figura 3.1 – Representação esquemática do revestimento externo do tubo – FBE (FONTE: SOCOTHERM BRASIL, 2011).



Figura 3.2 – Manta Termocontrátil (FONTE: ARGENT, 2005).

### 3.2 - Ensaios de dobramento em laboratório

Para simulação de regiões estiradas plasticamente foi utilizado o ensaio de dobramento a frio conforme a norma ASTM E 290 (ASTM, 2009). Para este ensaio, foram extraídos 15 (quinze) corpos de prova obtidos através de corte a frio de um niple de 24 polegadas de diâmetro, espessura nominal equivalente a  $\frac{1}{4}$  de polegadas e 1 metro de

comprimento, posicionados de acordo com a configuração estabelecida na Figura 3.3, cujas dimensões estão explicitadas na Figura 3.4. Todos os corpos de prova foram retirados do metal base.

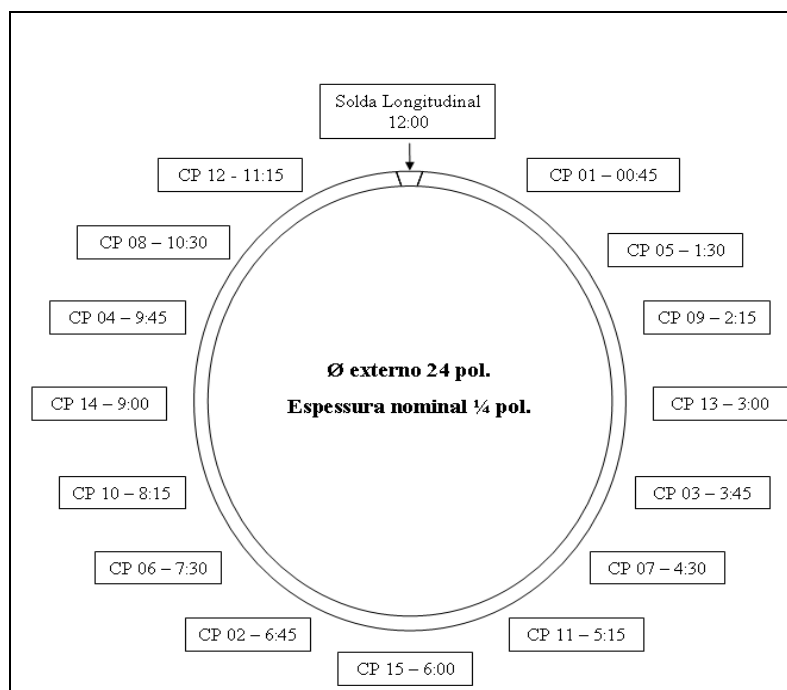


Figura 3.3 – Representação esquemática da posição horária dos corpos de prova.

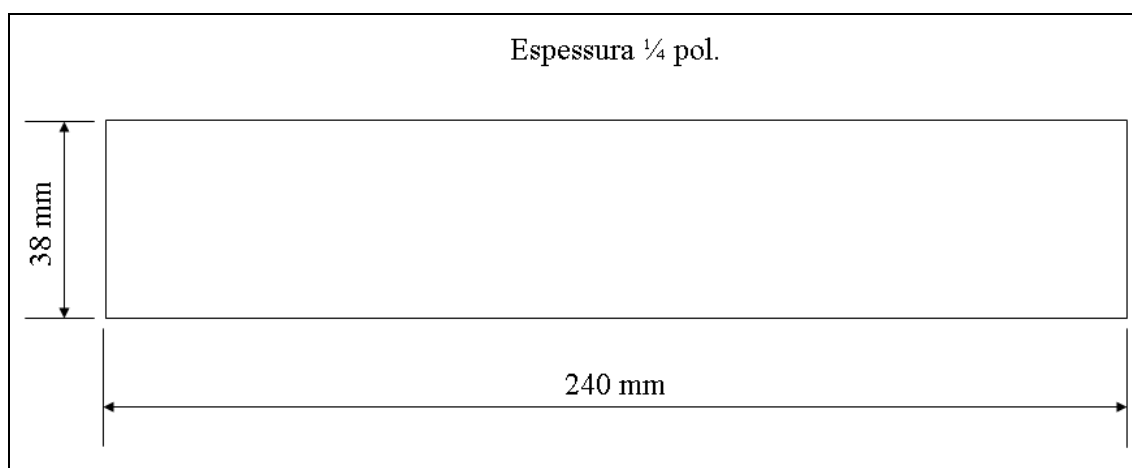


Figura 3.4 – Corpo de prova para ensaio de dobramento.

Os ensaios de dobramento foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos da UFF, utilizando o equipamento universal de ensaios mecânicos, ilustrado na Figura 3.5.



Figura 3.5 – Equipamento universal de ensaios mecânicos (FONTE: LEM/UFF).

Os ensaios foram realizados em três estágios de severidade de deformação plástica, grau I ( $\alpha = 90^\circ$ ), grau II ( $\alpha = 135^\circ$ ) e grau III ( $\alpha = 160^\circ$ ), conforme ilustrado na Figura 3.6.

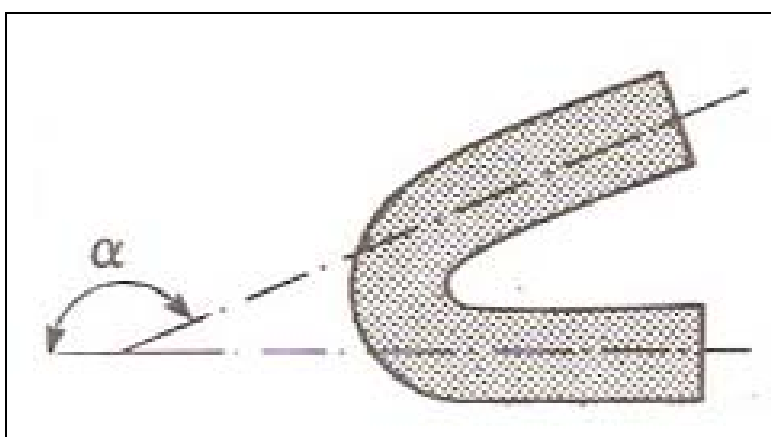


Figura 3.6 – Graus de severidade de deformação plástica nos ensaios de dobramento  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\alpha = 135^\circ$  e  $\alpha = 160^\circ$ .

Considerando a possibilidade de indução de tensões residuais no corpo de prova, através do contato entre a matriz e o punção (WANG & GONG, 2008) durante o ensaio de dobramento, através de monitoramento visual foi garantida a isenção de contato entre a superfície revestida do corpo de prova, representada pela região hachurada da Figura 3.7, e a matriz.

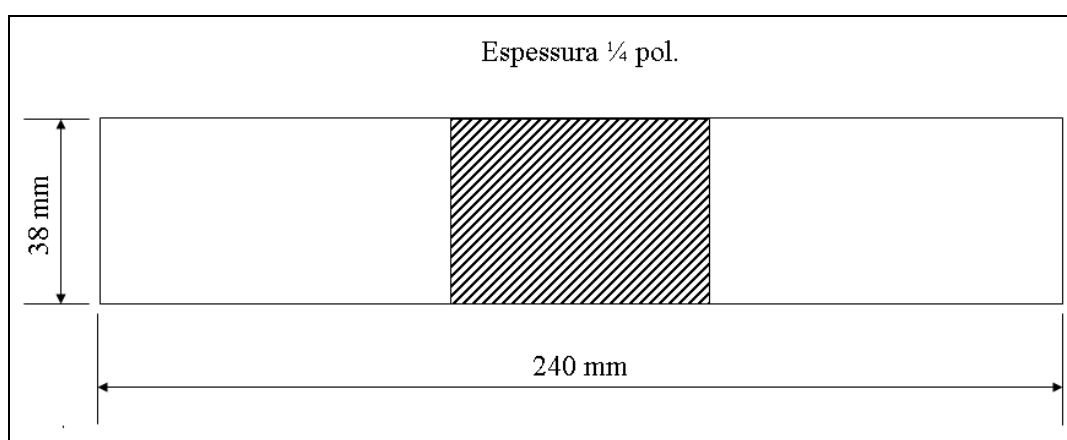


Figura 3.7 – Representação da superfície isenta de contato entre o corpo de prova e a matriz (região hachurada).

Com o objetivo de não induzir tensões residuais no corpo de prova através da remoção do revestimento, antes da execução dos ensaios de dobramento o revestimento de FBE do corpo de prova foi removido através de acetona P.A. na região quadriculada da Figura 3.8.

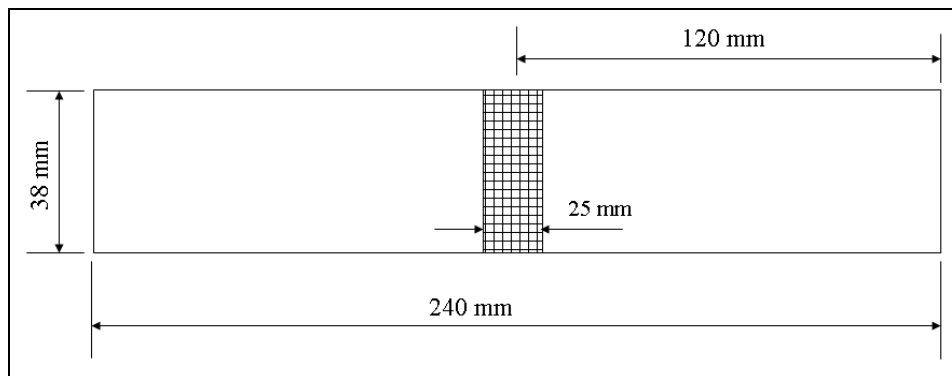


Figura 3.8 – Detalhe da região de remoção do revestimento (em quadriculado).

A configuração do posicionamento do corpo de prova em relação ao punção e a matriz estão ilustradas na Figura 3.9 e Figura 3.10, e conforme se pode observar, o contato do punção ocorreu na superfície intradorso do corpo de prova. Nota-se também que a superfície revestida do corpo de prova está orientada para a matriz. Assim sendo, todas as medidas foram tomadas para evitar a indução de tensões residuais por contato na superfície extradorso dos corpos de prova.

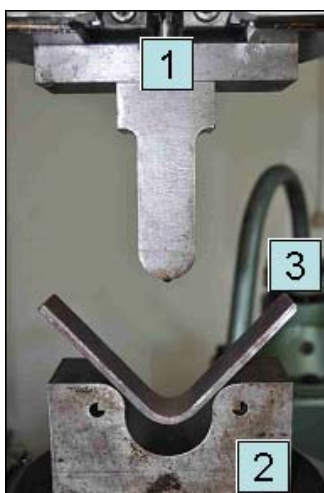


Figura 3.9 – Detalhe do posicionamento do corpo de prova durante o ensaio de dobramento.

(1) Punção; (2) Matriz; e, (3) Corpo de Prova.

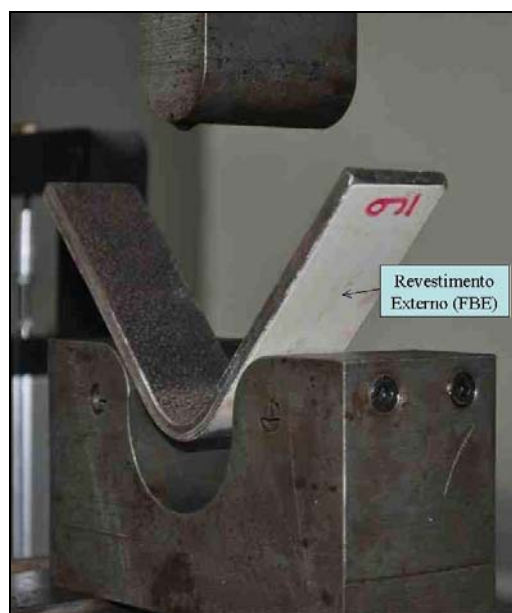


Figura 3.10 – Detalhe do revestimento externo do corpo de prova em relação à matriz.

A Figura 3.11 mostra os corpos de prova posteriormente aos ensaios de dobramento com os diversos graus de severidade de deformação plástica  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\alpha = 135^\circ$  e  $\alpha = 160^\circ$ .



Figura 3.11 – Corpos de prova posteriormente aos ensaios de dobramento.

### 3.3 - Ensaios de Dureza

A avaliação da dureza superficial dos corpos de prova nos diversos níveis de deformação plástica em que os mesmos foram submetidos foi feita através de ensaios de dureza pelo método impedância ultrassônica de contato (UCI), de acordo com a norma ASTM A1038 (ASTM, 2010). Foi usado o equipamento Krautkramer MIC 10, com a sonda de aplicação de carga de 5 N, ilustrado na Figura 3.12.



Figura 3.12 – Equipamento Krautkramer MIC 10. (1) Unidade eletrônica de processamento; (2) Sonda de carga; e (3) Cabo de interligação.

Com o objetivo de evitar interferência entre os resultados dos ensaios de dureza e de medição de TR por difração de raios-X, devido à indentação remanescente do ensaio de dureza, estabeleceram-se duas regiões distintas para execução dos ensaios, conforme Figura 3.13, onde na região hachurada foram feitos os ensaios de dureza e na região “A” os ensaios de TR.

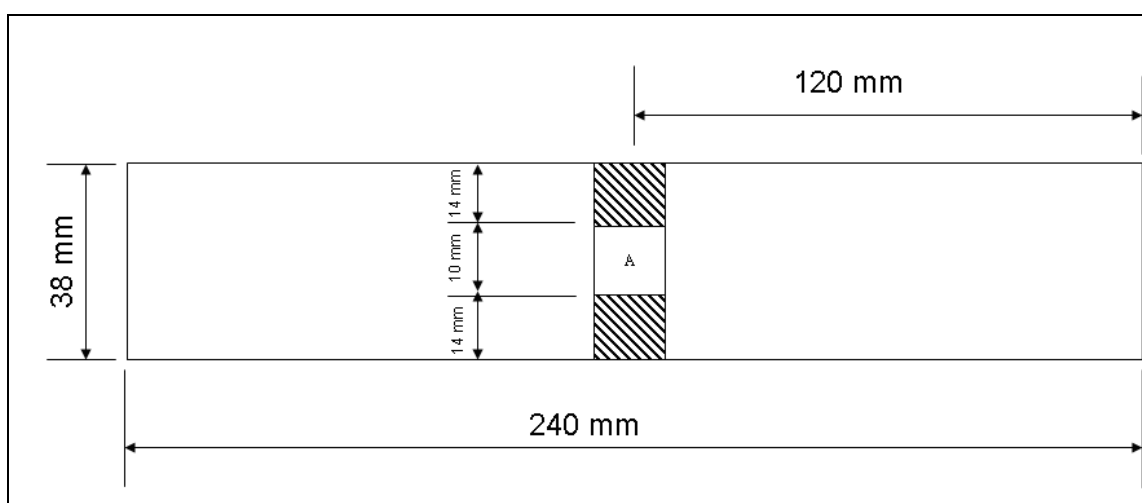


Figura 3.13 – Detalhe da região de ensaios de dureza (região hachurada) e de tensões residuais (região “A”).

O equipamento Krautkramer MIC 10 vem calibrado de fábrica para aços ligados e de baixa liga através de blocos padrão certificados de acordo com a norma ASTM E 92 (FRANK, 2006). Para a comparação estatística entre os valores de dureza Vickers, obtidos através dos ensaios de dureza convencional (HV) e da metodologia UCI foi retirada uma amostra do material utilizado nos experimentos.

Estes ensaios foram realizados em uma superfície com área de  $300\text{mm}^2$  e com o mesmo acabamento superficial, feito através de um equipamento semiautomático de polimento de amostras metalográficas (Figura 3.14), utilizando gradativamente lixas

número 200, 400, 600 e 800 e pasta de alumina. Os ensaios de dureza com equipamento convencional foram executados no LEM/UFF, através do equipamento ilustrado na Figura 3.15 e Figura 3.16, com uma carga aplicada de  $30 \text{ kgf/cm}^2$ , tempo de penetração de 25 segundos. É possível identificar claramente pela Figura 3.17, as distintas indentações remanescentes no corpo de prova, oriundas do método de ensaio convencional e o método UCI.



Figura 3.14 – Equipamento semiautomático de polimento de amostras metalográficas  
(FONTE: ROHDE, 2010).



Figura 3.15 – Equipamento de ensaio de dureza convencional (FONTE: LEM/UFF).

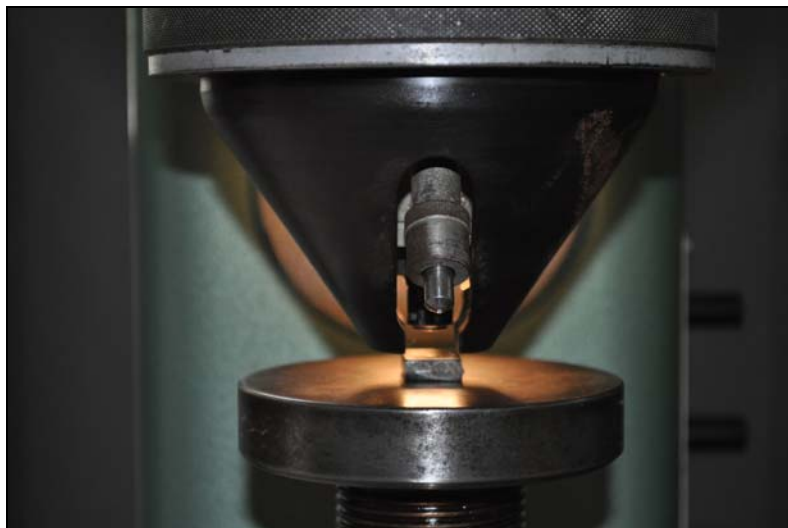


Figura 3.16 – Detalhe do corpo de prova durante o ensaio (FONTE: LEM/UFF).

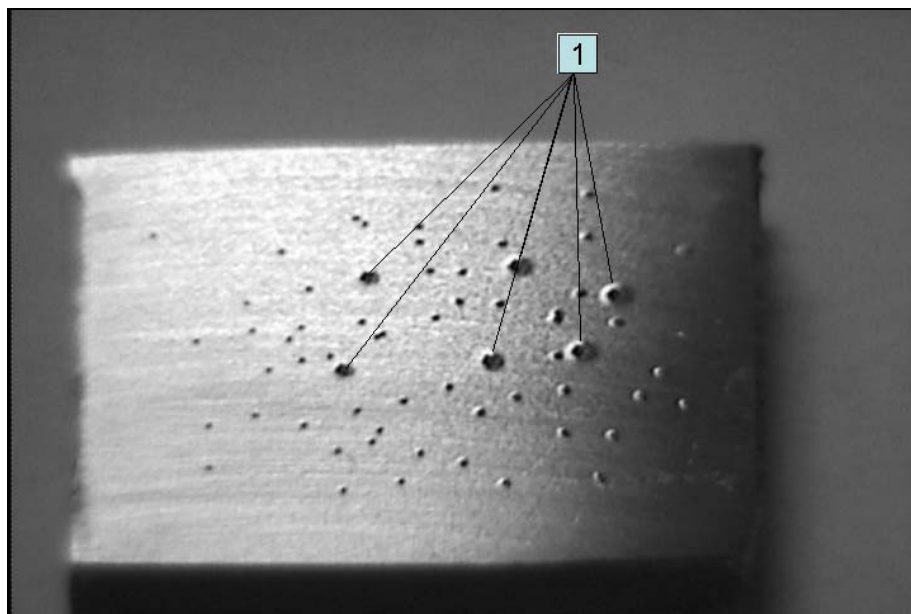


Figura 3.17 – Indentações remanescentes no corpo de prova. (1) Equipamento de dureza convencional e, demais indentações são remanescentes dos ensaios de dureza UCI.

As dimensões das diagonais obtidas nos ensaios de dureza convencional,  $d_1$  e  $d_2$ , estão ilustradas na Figura 3.18.

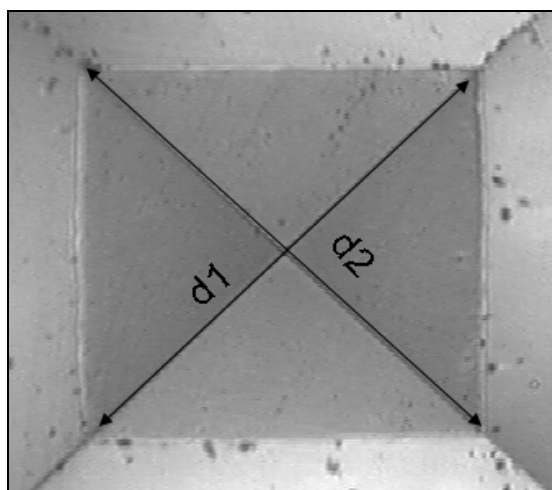


Figura 3.18 – Representação da indentação e as dimensões obtidas no ensaio de dureza convencional.

Para obtenção do valor da dureza Vickers (HV), foi utilizado o seguinte fator de conversão (LETA *et al.*, 2004), onde F é a carga aplicada no ensaio e d1 e d2 as diagonais obtidas no ensaio:

$$HV = \frac{1,8544F}{\left(\frac{d1 + d2}{2}\right)^2}$$

### **3.4 - Microscopia ótica**

Os ensaios de microscopia ótica foram realizados no Laboratório de Caracterização de Materiais da Universidade Federal do Ceará, onde as amostras foram preparadas em um equipamento semiautomático de polimento de amostras metalográficas (Figura 3.14), cuja metodologia para preparo da superfície foi feita utilizando gradativamente lixas número 200, 400, 600, 800 e 1200 e o acabamento final foi feito através de pasta de alumina. O ataque para revelação da microestrutura foi feito pela aplicação do reagente Nital 5%, com tempo de 15 segundos.

### **3.5 - Ensaios de tensometria por difração de raios-X**

Neste trabalho foram utilizados dois equipamentos portáteis para execução dos ensaios de tensometria por difração de raios-X, para os ensaios de campo foi utilizado um equipamento com a metodologia da dupla exposição e para os ensaios de laboratório com a metodologia do  $\text{Sen}^2\Psi$ .

### 3.5.1 - Preparo da superfície

A metodologia utilizada para obtenção do perfil da variação das tensões residuais através da profundidade foi o polimento eletrolítico, que se trata da remoção eletrolítica do metal em uma solução altamente iônica por meio de um potencial e corrente elétrica. O polimento eletrolítico é normalmente usado para remover uma camada bem fina de material na superfície de um componente de metal, na ordem de micrometros. Foi utilizado um eletrólito à base de cloreto de sódio com parâmetros de tensão e corrente de 24 V e 1 A, respectivamente e a profundidade da camada removida foi aferida por relógio comparador digital. O equipamento de eletropolimento usado está ilustrado na Figura 3.19.



Figura 3.19 – Equipamento de polimento eletrolítico, composto de: (1) fonte tensão e corrente; (2) pincel com eletrólito; (3) – relógio comparador digital (FONTE: LAT/UFF).

### 3.5.2 - Princípios básicos da metodologia tensometria por difração de raios-X

Os princípios básicos da técnica foram desenvolvidos há mais de cinquenta anos e são baseados em duas teorias: a teoria da difração de raios-X em materiais cristalinos e a teoria da elasticidade do material sólido, oriunda da mecânica dos sólidos. Esta teoria prevê as seguintes relações:

- a) Tensão:  $\sigma = \Delta F / \Delta A$ ;
- b) Deformação:  $\varepsilon = \Delta l / l$ ;
- c) Lei de Hooke (relação entre tensão e deformação) para estado uniaxial:  $\varepsilon = \sigma / E$ , onde E é o módulo de elasticidade do material;

Lei de Hooke para estado triaxial:

$$\varepsilon_1 = \left( \frac{\sigma_1}{E} \right) - \mu \cdot \frac{(\sigma_2 + \sigma_3)}{E} \quad (1)$$

$$\varepsilon_2 = \left( \frac{\sigma_2}{E} \right) - \mu \cdot \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{E} \quad (2)$$

onde  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  e  $\varepsilon_3$  são as deformações principais,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$  são as tensões principais, e  $\mu$  é o coeficiente de Poisson.

Todavia, para efeitos de adequação ao estado real de tensões, são utilizadas coordenadas polares, como mostra a Figura 3.20.

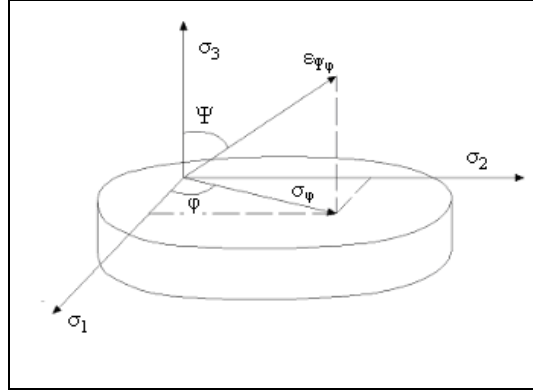


Figura 3.20 – Sistema de coordenadas polares (FONTE: CINDRA FONSECA, 2000).

Sabe-se que:

$$\varepsilon_{\varphi,\psi} = (\sigma_1 \cdot \cos^2 \varphi + \sigma_2 \cdot \sin^2 \varphi) \cdot \sin^2 \psi - \mu \cdot \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{E} \quad (4)$$

onde  $\varphi$  é o ângulo azimutal e  $\psi$  é o ângulo polar. Nesta equação, a componente da tensão perpendicular à superfície  $\sigma_3$  é zero, e as componentes  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  se posicionam na superfície.

Então a equação 4 pode ser escrita como:

$$\varepsilon_{\varphi,\psi} = \frac{(1 + \mu) \cdot \sigma_\varphi \cdot \sin^2 \psi}{E} - \frac{\mu \cdot (\sigma_1 + \sigma_2)}{E} \quad (5)$$

onde  $\sigma_\varphi$  é a componente da tensão na direção que faz o ângulo  $\varphi$  com a tensão principal  $\sigma_1$ .

Baseado nas equações 4 e 5 foram desenvolvidas várias metodologias de medição de tensões.

A Figura 3.21 mostra três planos de uma família de planos com espaçamento interplanar  $d$ , que hipoteticamente refletem os raios incidentes. Os raios 1 e 2 se refletem, respectivamente, no primeiro e no segundo planos. Em cada reflexão o ângulo de incidência e o de reflexão são representados por  $\theta$ . Diferentemente do que é usado normalmente em ótica, esses ângulos são medidos em relação à superfície do plano refletor, e não em relação à normal do plano. Na situação desta figura, o espaçamento interplanar  $d$  é análogo à aresta da célula unitária ao. As ondas dos raios 1 e 2 chegam em fase ao cristal. Depois da reflexão, elas estão novamente em fase; diferentemente do que ocorrem com os raios de luz, os raios-X não se refratam ao entrar no cristal. Então, a fase relativa entre as ondas dos raios 1 e 2 é determinada, exclusivamente, pela diferença de percursos. Para que os raios estejam em fase, a diferença de percurso deve ser igual a um múltiplo inteiro do comprimento de onda  $\lambda$  dos raios-X.

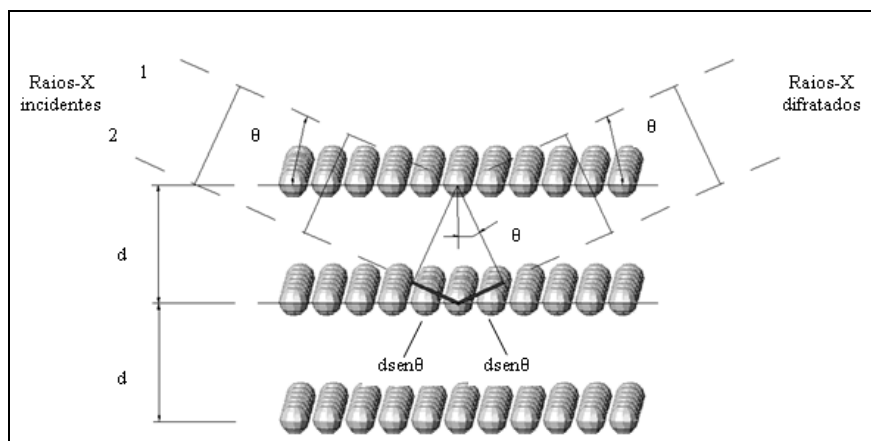


Figura 3.21 – Diferença de percursos dos raios incidentes em função da distância interplanar (FONTE: CINDRA FONSECA, 2000).

Pela Figura 3.21 é possível identificar que a diferença de percursos é  $2d \sin\theta$ . Este resultado é válido para qualquer par de planos adjacentes da família de planos representada na Figura. Temos, então:

$$n.\lambda = 2.d.\text{Sen}\theta \quad (6)$$

onde  $n$  é o número de ordem do máximo de intensidade da suposta reflexão (ou seja, da difração ou espalhamento) dos raios-X. A equação 6 é a Lei de Bragg, assim denominada em homenagem ao físico britânico W. L. Bragg, que a deduziu pela primeira vez.

### 3.5.3 - Metodologia da dupla exposição

A Figura 3.22 mostra o medidor portátil de tensões mecânicas por raios-X, utilizado nos ensaios de campo, pelo método de dupla exposição, com radiação  $\text{CrK}\alpha$ , difratando o plano  $\{211\}$ . O equipamento é constituído por um tubo compacto de raios-X, refrigerado a ar, acoplado a uma fonte de alta voltagem, operando com 25kV e 1,5mA, com 2 anodos de Cr que emitem dois feixes de raios-X convergentes, sendo as duas linhas de difração registradas em filme, colocado no colimador (2), sob ângulos  $\psi_1 = 0^\circ$  e  $\psi_2 = 50^\circ$ .



Figura 3.22 – Equipamento de análise de tensões, (1) Tubo de raios-X; (2) Colimador com filme; (3) Unidade de controle da tensão e corrente (FONTE: TBG, 2010).

A unidade de controle (3) permite o monitoramento e ajuste do nível de energia de alimentação do tubo de raios-X (1), este tubo utiliza dois anodos de cromo ( $\lambda_{CrK\alpha} = 2,29092 \text{ \AA}$ ) para produção dos feixes F1 e F2 (Figura 3.23), e filtros de vanádio para obtenção de radiação monocromática. A tensão e corrente de trabalho da fonte de raios-X é de 25 kV e 1,5 mA, respectivamente. O tempo de exposição, para a medição de tensões residuais em aços carbono, é de aproximadamente 6 minutos. Os feixes difratados pelos planos cristalográficos {211} do ferro formam cones que interceptam o filme segundo curvas cônicas. Como resultado da geometria especial do colimador (2), os dois feixes de raios-X primários F1 e F2, iluminam o mesmo elemento da superfície da amostra ao longo da linha B1BB2 (Figura 3.23). Os raios difratados formam os cones de difração, cujos eixos são os feixes primários. No trajeto dos feixes difratados, coloca-se o filme em um cassete fixado no conjunto de colimação. O cassete possui duas janelas, que permitem que apenas uma parte dos cones de difração impressione o filme. A superfície interna do filme tangencia os dois círculos de focalização P1 e P2 nos pontos D1 e D2 (Figura 3.23). D1 e D2 são pontos onde ocorre a focalização completa dos feixes difratados. As linhas de interseção da superfície do filme com os planos de focalização são os eixos longitudinais das janelas do cassete (ver (2) na Figura 3.24). O plano do círculo de focalização de cada feixe incidente forma um ângulo com a superfície da amostra igual ao ângulo entre o eixo longitudinal da janela e o feixe difratado. Por outro lado, estes ângulos são iguais aos ângulos que cada feixe incidente faz com a superfície da amostra, no caso em que os planos difratantes sejam paralelos a esta superfície. No caso do equipamento usado, estes ângulos são de  $90^\circ$  e  $40^\circ$ .

Desta maneira, a informação registrada em uma das janelas corresponde ao ângulo de  $90^\circ$  ou ao ângulo  $\psi_1 = 0^\circ$  entre o feixe incidente e a normal à superfície da amostra. O plano do segundo círculo de focalização forma o ângulo  $\psi_2 = 50^\circ$  com a normal à superfície da amostra. Portanto, na segunda janela, registra-se a informação respectiva ao feixe difratado dos planos da rede cristalina que fazem o ângulo  $\psi_2 = 50^\circ$  com a superfície da amostra. Pelo exposto, medem-se as tensões orientadas ao longo da linha de interseção do plano formado pelos raios primários com a superfície da amostra, isto é, na direção perpendicular à linha B1BB2 (Figura 3.23). A inclinação necessária da superfície do objeto relativamente aos círculos de focalização, para que se obtenha a geometria de difração antes descrita, é feita através de duas hastes calibradoras, localizadas no colimador ((2) na Figura 3.22)). Estas hastes também regulam a distância filme-amostra e a direção de medição das tensões.

Na parte inferior de cada janela (Figura 3.24) são colocados, perpendicularmente aos eixos longitudinais (2), as linhas de referência, feitas de arame fino de tungstênio (3), que formam sombra na radiografia de raios-X e servem para determinar a posição das intensidades máximas difratadas. Em cada filme de raios-X (Figura 3.24), obtém-se duas linhas difratadas (4), correspondentes aos ângulos  $\psi_1 = 0^\circ$  e  $\psi_2 = 50^\circ$ . Para determinação do valor das tensões, é necessário medir as distâncias L1 e L2, ao longo do eixo das janelas, entre as intensidades máximas das linhas difratadas e as linhas de referência.

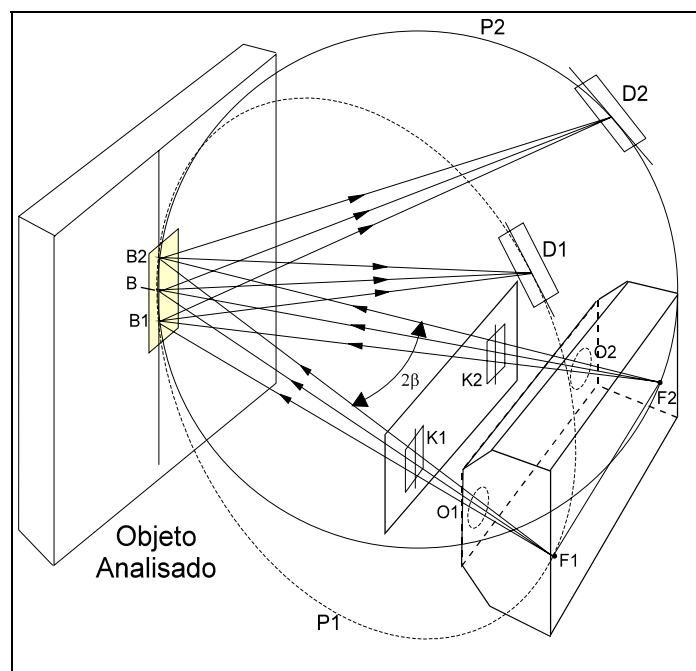


Figura 3.23 – Esquema óptico do equipamento.

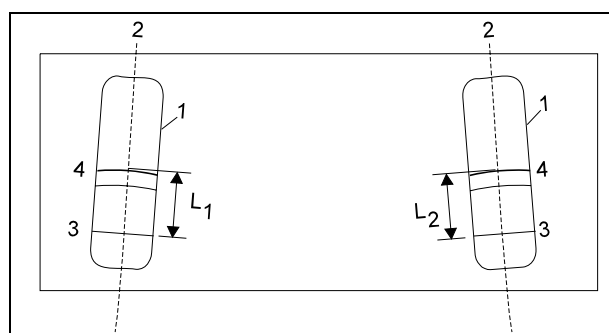


Figura 3.24 – Cassete com filme de raios-X.

A equação utilizada neste equipamento é demonstrada através da variação da distância interplanar para obter uma variação do ângulo de difração. Sendo assim, pela diferenciação da equação 6, obtém-se:

$$\frac{\Delta d}{d} = -\cot \theta \cdot \Delta \theta \quad (7)$$

O método da dupla exposição é baseado na medição das duas componentes de deformação,  $\varepsilon_{\varphi\psi 1}$  e  $\varepsilon_{\varphi\psi 2}$ , determinadas conforme a equação (7).

A diferença entre as duas componentes da deformação é dada por:

$$\varepsilon_{\varphi,\psi 2} - \varepsilon_{\varphi,\psi 1} = \frac{1-\nu}{E} \sigma_{\varphi} (\sin^2 \psi_2 - \sin^2 \psi_1) \quad (8)$$

A componente de tensão  $\sigma_{\varphi}$  da equação (8) pode ser escrita:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{E}{1+\nu} \frac{(\varepsilon_{\varphi,\psi 2} - \varepsilon_{\varphi,\psi 1})}{(\sin^2 \psi_2 - \sin^2 \psi_1)} \quad (9)$$

A deformação em termos de difração por ser expressa por:

$$\varepsilon_{\varphi,\psi} = \frac{(d_{\varphi,\psi} - d_o)}{d_o} = -\cot g \theta_o \cdot (\theta_{\varphi,\psi} - \theta_o) \quad (10)$$

onde:  $d_{\varphi\psi}$ ,  $d_o$  e  $\theta_{\varphi\psi}$ ,  $\theta_o$  são os valores das distâncias interplanares e dos ângulos de difração para os estados com tensão e sem tensão do material, respectivamente.

Das equações (9) e (10) pode ser obtida a fórmula final para determinação da componente de tensão  $\sigma_{\varphi}$ :

$$\sigma_{\varphi} = \frac{E}{(1+\nu)} \frac{\cot g \theta_o (\theta_{\varphi,\psi 2} - \theta_{\varphi,\psi 1})}{(\sin^2 \psi_2 - \sin^2 \psi_1)} \quad (11)$$

Esta equação seria válida para quaisquer variações de  $\psi_1$  e  $\psi_2$  impostas ao equipamento.

É possível observar, através da equação 11, que a TR existente no material é diretamente proporcional à derivada de  $2\theta$ , em função de  $\sin^2 \psi$ . Sendo assim, é feita uma

representação gráfica dos vários ângulos  $2\theta$  medidos, tendo  $\sin^2\psi$  como ordenada. A função que se ajusta aos pontos representados neste gráfico será linear de primeira ordem, onde seu declive fornecerá o estado de tensão da amostra: tração, compressão ou relaxação (Figura 3.25).

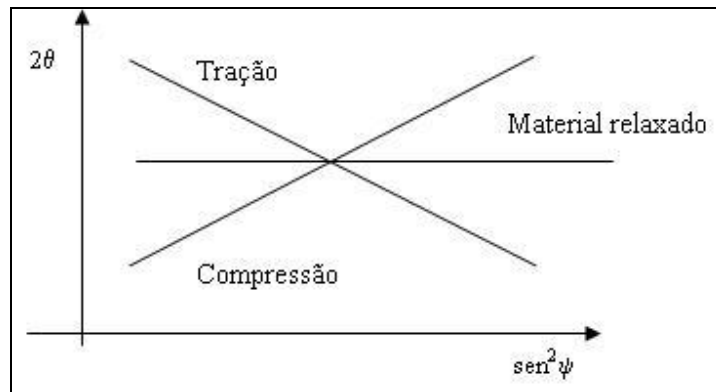


Figura 3.25 – Estado de tensão do material em função do declive da curva  $2\theta \times \sin^2\psi$ .

Assim sendo, para determinar qualquer componente da tensão será necessário medir os ângulos de difração correspondentes à reflexão dos planos cristalinos com as normais caracterizadas pelos ângulos  $\psi_1$  e  $\psi_2$ . A diferença angular  $\Delta\theta = \theta_{\psi_2} - \theta_{\psi_1}$  da equação (11), para o método da dupla exposição, pode ser expressa por:

$$\Delta\theta = K(L_0 - L_{50}) \quad (12)$$

Onde  $L_0$  e  $L_{50}$  são as distâncias das linhas de difração dos 2 feixes usados simultaneamente sob os ângulos  $\psi_1 = 0^\circ$  e  $\psi_2 = 50^\circ$  até a linha de referência e  $K$  é o fator de escala de transferência de unidades lineares para angulares. A leitura do filme para determinar os valores de  $L_0$  e  $L_{50}$  é feita através de um microdensitômetro (Figura 3.26a) acoplado a um software, que faz a medição da posição dos picos de difração por aproximação, através de uma função de Cauchy de segunda ordem (Figura 3.26b).

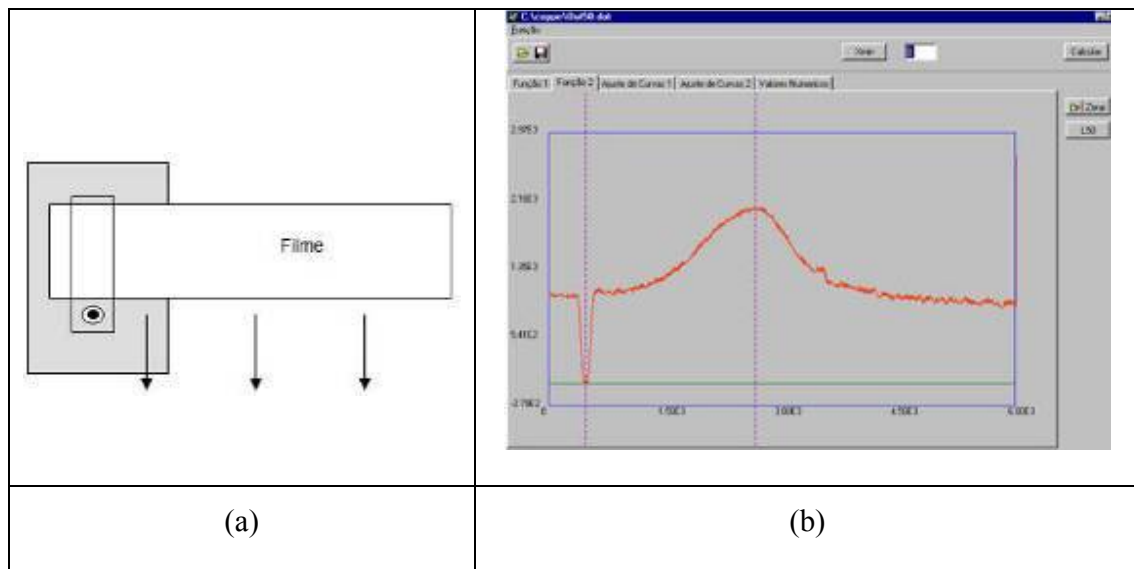


Figura 3.26 – a) Microdensitômetro de leitura do filme; (b) Posição do pico de difração.

Substituindo a expressão (12) na equação (11) teremos a equação (13) para o cálculo da tensão:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{E}{1 + \nu} \cot g \theta_0 \cdot K \{ (L_{50} - L_0) - \Delta L_{calib} \} \quad (13)$$

Onde:

$\Delta L_{calib}$  = valor da calibração do equipamento com um material isento de tensões.

### 3.5.4 - Metodologia do $\text{Sen}^2\Psi$

No equipamento russo *Stressrad*, para determinar os valores de pico de difração em função do ângulo  $\psi$ , selecionam-se na unidade de controle e processamento do equipamento os ângulos  $\psi$  que se pretende medir. É recomendável selecionar no mínimo 5 ângulos, por exemplo, 0°, 10°, 25°, 30° e 45°. Após a determinação dos valores de pico de

difração relativos a cada um dos ângulos  $\psi$  escolhidos, é determinado o declive da curva que se ajusta a esses pontos ( $2\theta$  vs.  $\sin^2\psi$ ) e o valor da tensão, bem como a incerteza subjacente (CINDRA FONSECA, 2000).

O equipamento fornece, através de um *software*, o valor da TR no ponto medido. A Figura 3.27 ilustra a representação do pico de difração para um determinado ângulo  $\psi$ , a Figura 3.28 mostra a integração de todos os picos de difração dos ângulos  $\psi$  utilizados no ensaio e a Figura 3.29 apresenta o gráfico  $2\theta$  vs.  $\sin^2\psi$  com o ajuste linear entre os ângulos  $\psi$  medidos.

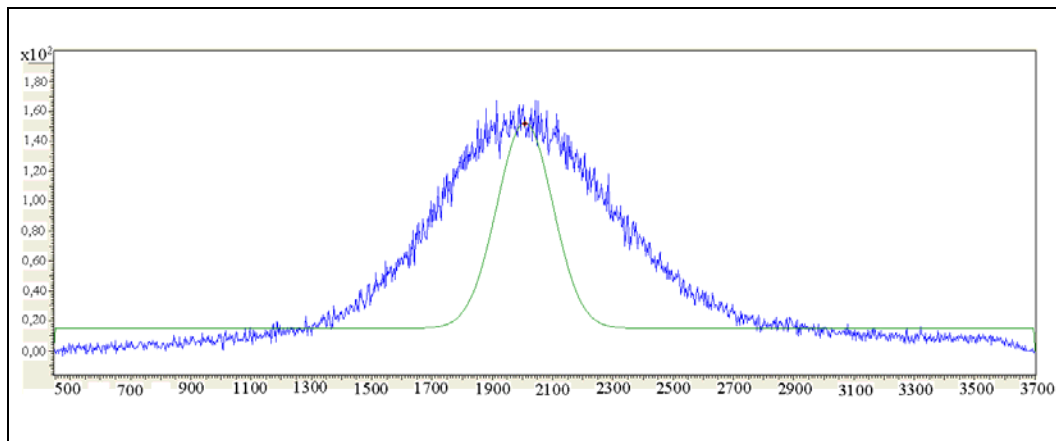


Figura 3.27 – Representação do pico de difração.

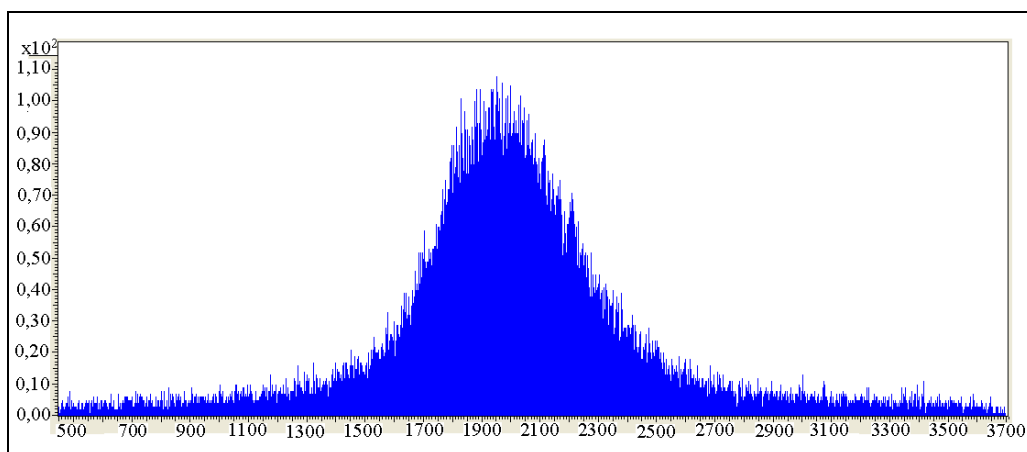


Figura 3.28 – Integração dos pico de difração dos ângulos  $\psi$  de um ensaio.

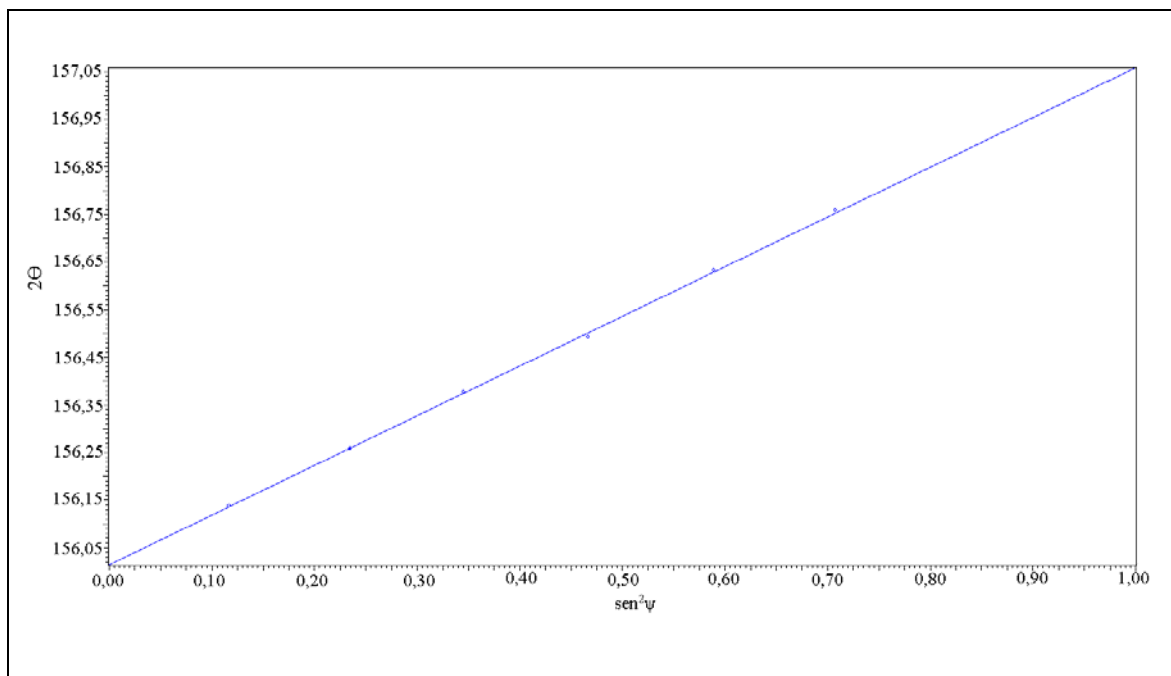


Figura 3.29 – Representação gráfica  $2\theta$  vs.  $\sin^2\psi$ .

A Figura 3.30 ilustra o medidor portátil de tensões mecânicas por raios-X Stressrad, de origem Russa, fabricado pela empresa Radicon Ltd., utilizado nos ensaios de laboratório, pelo método do  $\sin^2\psi$ , com radiação  $\text{CrK}\alpha$ , difratando o plano  $\{211\}$ . Os ângulos de incidência de raios-X ajustados no equipamento foram  $\psi_1 = 0^\circ$ ,  $\psi_2 = 17^\circ$ ,  $\psi_3 = 24^\circ$ ,  $\psi_4 = 30^\circ$ ,  $\psi_5 = 35^\circ$  e  $\psi_6 = 40^\circ$ , cujo tempo de incidência de raios-X para cada ângulo foi de 30 segundos.

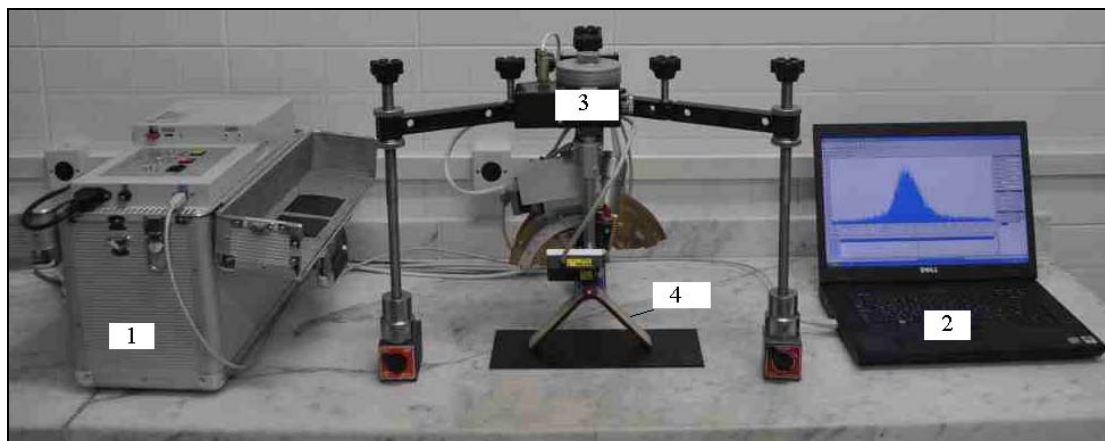


Figura 3.30 – Equipamento portátil de medição. (1) Unidade de controle; (2) Computador; (3) Unidade de medida; e, (4) Corpo de prova.

A unidade de medição do equipamento, ilustrada em detalhes na Figura 3.31, dispõe de um sistema automatizado para ajuste do goniômetro, do foco do feixe de raios-X por laser e da direção da medição em relação ao corpo de prova.

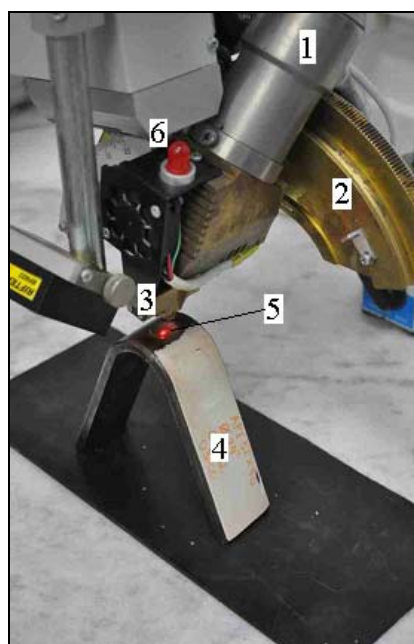


Figura 3.31 – Unidade de medição. (1) Tubo de raios-X com anodo de Cr; (2) Goniômetro; (3) Colimador; (4) Corpo de prova; (3) Feixe de laser de ajuste de foco; e, (6) Luz indicadora da radiação.

Cada ensaio realizado no laboratório englobou a medição da tensão na mesma região, no sentido longitudinal ( $0^\circ$ ), circunferencial ( $90^\circ$ ) e a  $45^\circ$  do corpo de prova, conforme ilustrado na Figura 3.32.

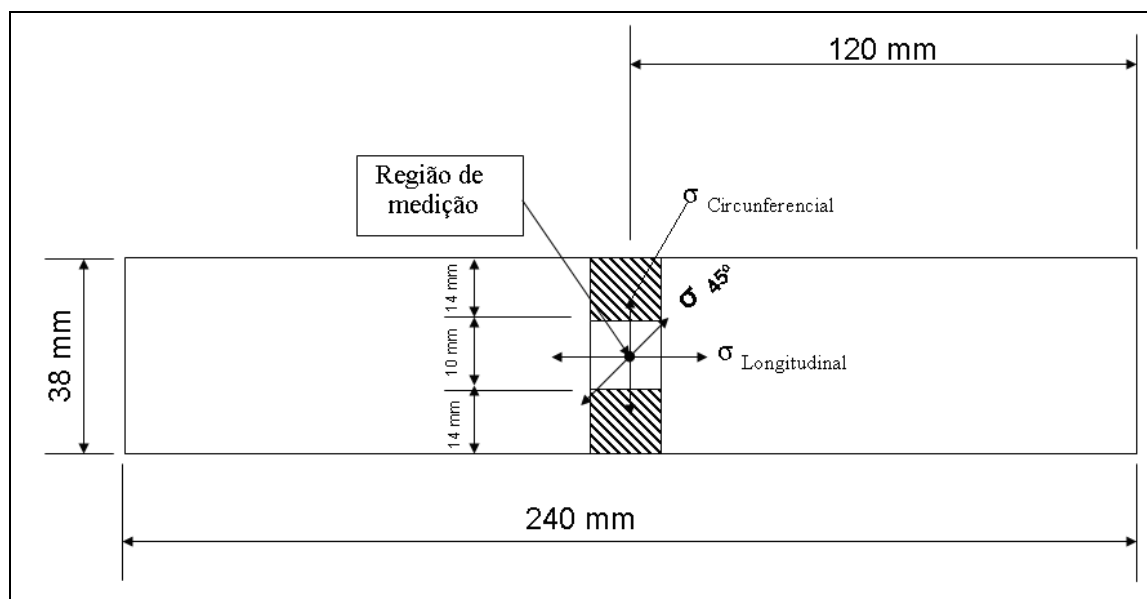


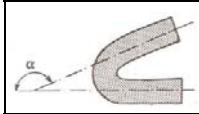
Figura 3.32 – Representação esquemática dos ensaios de difração de raios-X nos corpos de prova.

## Capítulo 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os ensaios executados em laboratório incluíram análise da TR por difração de raios-X e de dureza por impedância ultrassônica de contato (UCI), em corpos de prova de dobramento, conforme mostrado na Tabela 4.1.

Eles foram realizados em três estágios de severidade de deformação plástica, grau I ( $\alpha = 90^\circ$ ), grau II ( $\alpha = 135^\circ$ ) e grau III ( $\alpha = 160^\circ$ ). Foram também realizados ensaios de dureza convencional (HV) e de microscopia ótica (MO).

Tabela 4.1 – Resumo dos ensaios executados.

| Corpos de Prova<br> | Dobrimento                        |                               |                                 |                                  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
|                                                                                                        | $\alpha = 0^\circ$                | $\alpha = 90^\circ$<br>Grau I | $\alpha = 135^\circ$<br>Grau II | $\alpha = 160^\circ$<br>Grau III |
| 01                                                                                                     | Tensão Residual (TR) e Dureza UCI | TR e Dureza UCI               | TR e Dureza UCI                 | TR e Dureza UCI                  |
| 02                                                                                                     |                                   |                               |                                 |                                  |
| 03                                                                                                     |                                   |                               |                                 |                                  |
| 04                                                                                                     |                                   |                               |                                 |                                  |
| 05                                                                                                     |                                   | TR e Dureza UCI               |                                 |                                  |
| 06                                                                                                     |                                   |                               |                                 |                                  |
| 07                                                                                                     |                                   |                               |                                 |                                  |
| 08                                                                                                     |                                   | TR e Dureza UCI               | TR e Dureza UCI                 |                                  |
| 09                                                                                                     |                                   | TR e Dureza UCI               |                                 |                                  |
| 10                                                                                                     |                                   |                               |                                 |                                  |
| 11                                                                                                     |                                   |                               | TR e Dureza UCI                 |                                  |
| 12                                                                                                     |                                   |                               |                                 |                                  |
| 13                                                                                                     |                                   |                               |                                 | TR e Dureza UCI                  |
| 14                                                                                                     |                                   |                               |                                 |                                  |
| 15                                                                                                     | TR, Dureza UCI/HV e MO            |                               |                                 |                                  |

#### 4.1 - Ensaaios de avaliação das tensões e durezas superficiais

A análise do comportamento superficial das TR (longitudinal, a 45° e circunferencial) e da dureza foi realizada em quatro condições de corpos de prova: sem deformação plástica e após severos dobramentos,  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\alpha = 135^\circ$  e  $\alpha = 160^\circ$ .

Foi possível observar claramente a variação e as magnitudes da TR e dureza superficial nos corpos de prova com diversos graus de deformação plástica aos quais os mesmos foram submetidos. Nos ensaios realizados na condição de  $\alpha = 0^\circ$ , sem deformação plástica, foi possível analisar TR e dureza oriundas do processo de fabricação U-O-E dos tubos, nas condições de  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\alpha = 135^\circ$  e  $\alpha = 160^\circ$ , com deformação plástica, e perceber as alterações de comportamento da TR e dureza geradas pelos processos de deformação.

As tensões residuais superficiais observadas em todos os ensaios mostraram a presença do efeito *Bauschinger*, caracterizado pelas tensões residuais compressivas nas superfícies que foram estiradas plasticamente. Este comportamento pode ser explicado pelo surgimento de tensões reversas (*back stresses*), no sentido oposto ao carregamento externo ao qual o componente foi submetido e deformado plasticamente a frio, devido à movimentação das discordâncias que interagem com outros defeitos do reticulado cristalino do material (outras discordâncias, contornos de grão e precipitados), conforme mostrado por ABEL & MUIR (1972), KOSTRYZHEV *et al.* (2007) e KOSTRYZHEV (2009).

#### 4.1.1 - Ensaios antes do dobramento ( $\alpha = 0^\circ$ )

A Tabela 4.2 e Tabela 4.3 apresentam os resultados dos ensaios de TR por difração de raios-X e de dureza UCI, respectivamente, nos corpos de provas antes do dobramento ( $\alpha = 0^\circ$ ).

Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de TR ( $\alpha = 0^\circ$ ).

| Corpo de Prova | Tensão Residual [MPa] |              |                 |
|----------------|-----------------------|--------------|-----------------|
|                | Longitudinal          | 45°          | Circunferencial |
| 1              | -82 ± 7               | -44 ± 13     | -70 ± 7         |
| 2              | -60 ± 8               | -45 ± 13     | -52 ± 15        |
| 3              | -61 ± 6               | -46 ± 5      | -44 ± 4         |
| 4              | -85 ± 12              | -40 ± 6      | -60 ± 3         |
| 5              | -52 ± 11              | -41 ± 7      | -60 ± 4         |
| 6              | -23 ± 2               | -39 ± 1      | -60 ± 5         |
| 7              | -52 ± 11              | -56 ± 4      | -92 ± 12        |
| 8              | -51 ± 1               | -20 ± 4      | -92 ± 1         |
| 9              | -40 ± 4               | -78 ± 7      | -96 ± 4         |
| 10             | -53 ± 8               | -43 ± 1      | -41 ± 4         |
| 11             | -68 ± 14              | -60 ± 1      | -92 ± 1         |
| 12             | -24 ± 5               | -53 ± 5      | -105 ± 4        |
| 13             | -75 ± 6               | -22 ± 7      | -44 ± 6         |
| 14             | -32 ± 5               | -24 ± 1      | -50 ± 6         |
| 15             | -42 ± 3               | -26 ± 7      | -96 ± 6         |
| Média          | -53,30 ± 6,8          | -42,50 ± 4,3 | -70,27 ± 5,4    |

Tabela 4.3 – Resultados dos ensaios de dureza UCI ( $\alpha = 0^\circ$ ).

| <b>Corpo<br/>de<br/>Prova</b> | <b>Ensaio de Dureza [HV (UCI) 5]</b> |          |          |          |          |          |          |          |          |           |
|-------------------------------|--------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
|                               | <b>1</b>                             | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> | <b>6</b> | <b>7</b> | <b>8</b> | <b>9</b> | <b>10</b> |
| <b>1</b>                      | 217                                  | 229      | 223      | 209      | 227      | 211      | 238      | 228      | 218      | 236       |
| <b>2</b>                      | 213                                  | 218      | 249      | 203      | 200      | 216      | 245      | 206      | 202      | 224       |
| <b>3</b>                      | 213                                  | 263      | 223      | 255      | 244      | 243      | 227      | 221      | 232      | 239       |
| <b>4</b>                      | 225                                  | 221      | 247      | 244      | 265      | 210      | 234      | 205      | 214      | 237       |
| <b>5</b>                      | 202                                  | 224      | 213      | 211      | 228      | 227      | 202      | 219      | 210      | 220       |
| <b>6</b>                      | 202                                  | 206      | 200      | 210      | 212      | 189      | 205      | 210      | 205      | 199       |
| <b>7</b>                      | 245                                  | 245      | 231      | 215      | 212      | 254      | 213      | 207      | 245      | 219       |
| <b>8</b>                      | 211                                  | 220      | 249      | 182      | 205      | 203      | 200      | 210      | 230      | 198       |
| <b>9</b>                      | 208                                  | 190      | 187      | 209      | 203      | 217      | 174      | 213      | 200      | 193       |
| <b>10</b>                     | 203                                  | 225      | 157      | 170      | 221      | 244      | 171      | 236      | 219      | 191       |
| <b>11</b>                     | 190                                  | 210      | 205      | 215      | 200      | 203      | 222      | 200      | 208      | 173       |
| <b>12</b>                     | 202                                  | 220      | 188      | 219      | 208      | 221      | 220      | 207      | 210      | 232       |
| <b>13</b>                     | 211                                  | 199      | 190      | 201      | 193      | 184      | 202      | 200      | 210      | 194       |
| <b>14</b>                     | 191                                  | 209      | 213      | 234      | 244      | 237      | 229      | 168      | 273      | 219       |
| <b>15</b>                     | 210                                  | 212      | 220      | 208      | 210      | 202      | 213      | 214      | 216      | 219       |

Os resultados dos ensaios de dureza apresentados na Tabela 4.3 foram analisados estatisticamente através do Teste de Normalidade *Anderson-Darling*, onde se observou que eles seguem a distribuição normal. A Tabela 4.4 apresenta as médias, os desvios padrões e o *p-value* obtidos no teste de normalidade de cada corpo de prova.

Tabela 4.4 – Representação consolidada da média e DV da dureza em cada corpo de prova ( $\alpha = 0^\circ$ ).

| <b>Corpo de Prova</b> | <b>Dureza Média<br/>[HV(UCI)5]</b> | <b>Desvio Padrão</b> | <b><i>P-value</i></b> |
|-----------------------|------------------------------------|----------------------|-----------------------|
| <b>1</b>              | 223,6                              | 9,823                | 0,836                 |
| <b>2</b>              | 217,6                              | 17,33                | 0,116                 |
| <b>3</b>              | 236,0                              | 15,75                | 0,917                 |
| <b>4</b>              | 230,2                              | 18,74                | 0,916                 |
| <b>5</b>              | 215,6                              | 9,513                | 0,584                 |
| <b>6</b>              | 203,8                              | 6,763                | 0,411                 |
| <b>7</b>              | 228,6                              | 17,39                | 0,095                 |
| <b>8</b>              | 210,8                              | 18,61                | 0,481                 |
| <b>9</b>              | 199,4                              | 13,34                | 0,836                 |
| <b>10</b>             | 203,7                              | 30,19                | 0,493                 |
| <b>11</b>             | 202,6                              | 13,62                | 0,432                 |
| <b>12</b>             | 212,7                              | 12,36                | 0,448                 |
| <b>13</b>             | 198,4                              | 8,449                | 0,820                 |
| <b>14</b>             | 221,7                              | 29,13                | 0,887                 |
| <b>15</b>             | 212,4                              | 5,337                | 0,888                 |

A média dos resultados de dureza, com 95% de confiança, de acordo com o teste de normalidade *Anderson-Darling* ( $p\text{-value} = 0,682$ ), segue uma distribuição normal com média de 214,5HV(UCI)5 e DV igual a 11,75, cuja função de densidade de probabilidade está ilustrada na Figura 4.1.

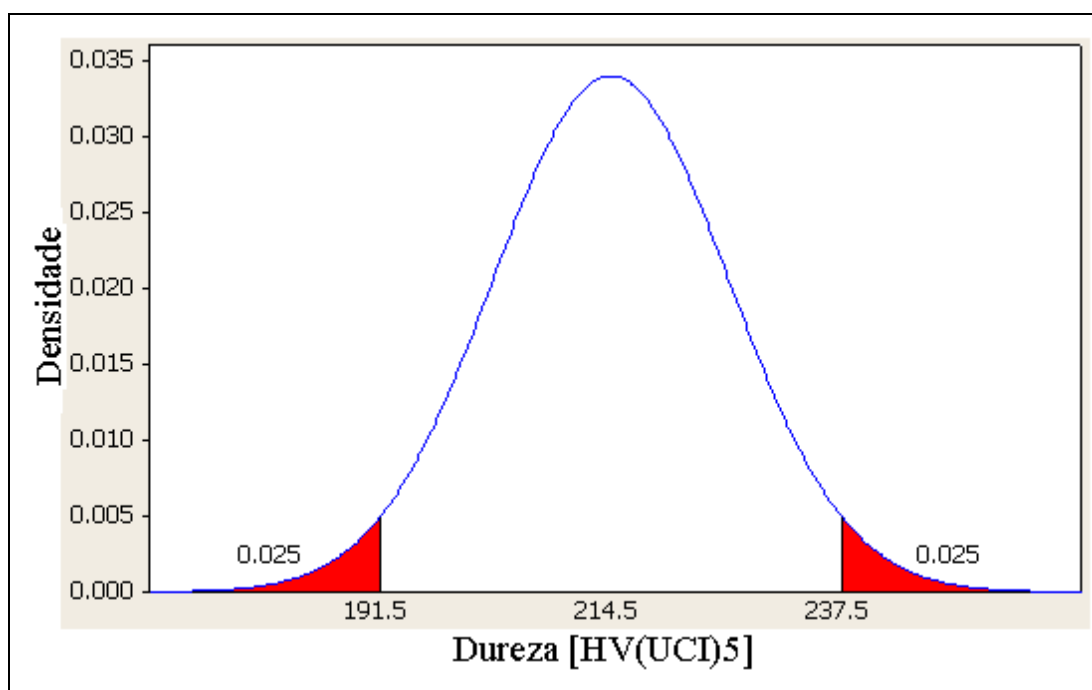


Figura 4.1 – Função de densidade de probabilidade da média dos ensaios de dureza UCI nos corpos de prova ( $\alpha = 0^\circ$ ).

Em todas as direções analisadas dos corpos de prova as tensões residuais superficiais apresentaram-se compressivas, de baixa magnitude, variando de -20MPa a -105MPa. A média da tensão longitudinal foi de -53,30MPa, da tensão a  $45^\circ$  foi -42,50MPa e da tensão circunferencial -70,27MPa. Considerando o estado superficial do

tubo, este resultado está coerente com os perfis de tensões residuais mostrados por WANG & GONG (2008), KRITZLER & WÜBBENHORST (2008) e KANDIL *et al.* (2001), tendo em vista o histórico de fabricação do tubo, que contempla conformação a frio seguida de jateamento superficial, antes da aplicação do revestimento.

Observando a média da dureza superficial de 214,5HV(UCI)5, para os corpos de prova com  $\alpha = 0^\circ$ , na ausência de revestimentos e/ou impurezas superficiais, é possível notar que o resultado obtido é coerente com aquele encontrado por HASHEMI (2011), que em amostras de aço API 5L X65 encontrou a dureza média de 221HV, e ainda com o resultado apresentado por AMEND & CLARK (2009) que para o aço API 5L X70, com 95% de confiança, encontrou a dureza média 216HV.

Para possibilitar uma melhor visualização dos resultados obtidos nos ensaios de dureza e TR, na condição dos corpos de prova sem deformação plástica ( $\alpha = 0^\circ$ ), eles foram apresentados graficamente através da Figura 4.2 (com tensões na direção longitudinal), Figura 4.3 (com tensões na direção a  $45^\circ$ ) e na Figura 4.4 (com tensões na direção circunferencial). Na Figura 4.5 é possível ter uma visão consolidada das tensões em todas as direções e a média da dureza em cada corpo de prova, o que permite uma comparação do comportamento dos valores de forma integrada.

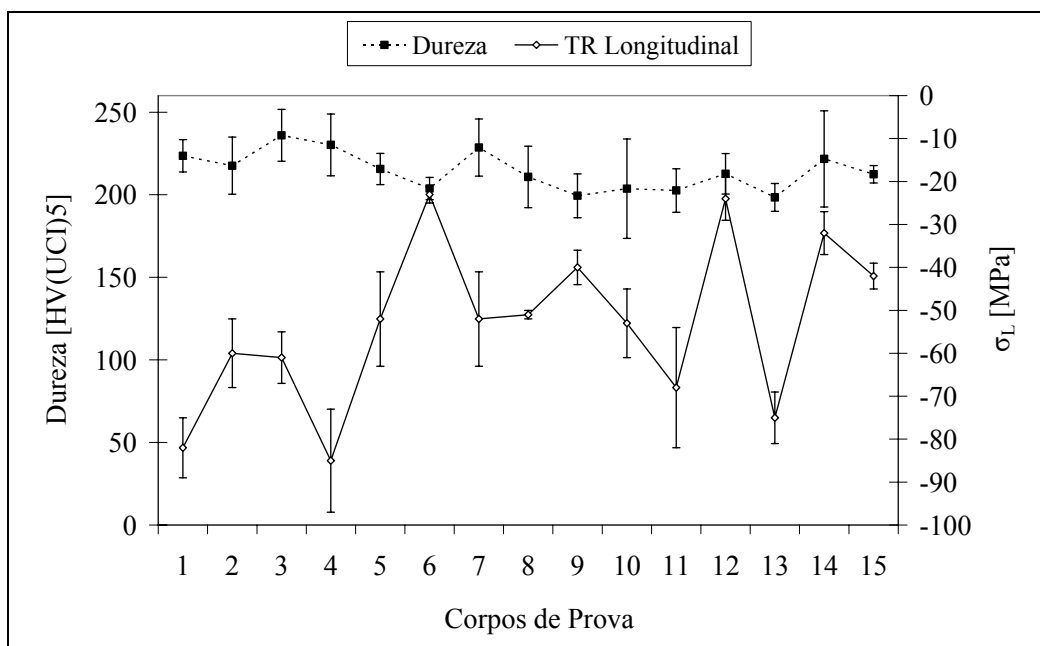


Figura 4.2 – Gráfico de integração dos resultados dos ensaios ( $\alpha = 0^\circ$ ) da TR longitudinal ( $\sigma_L$ ) e dureza UCI .

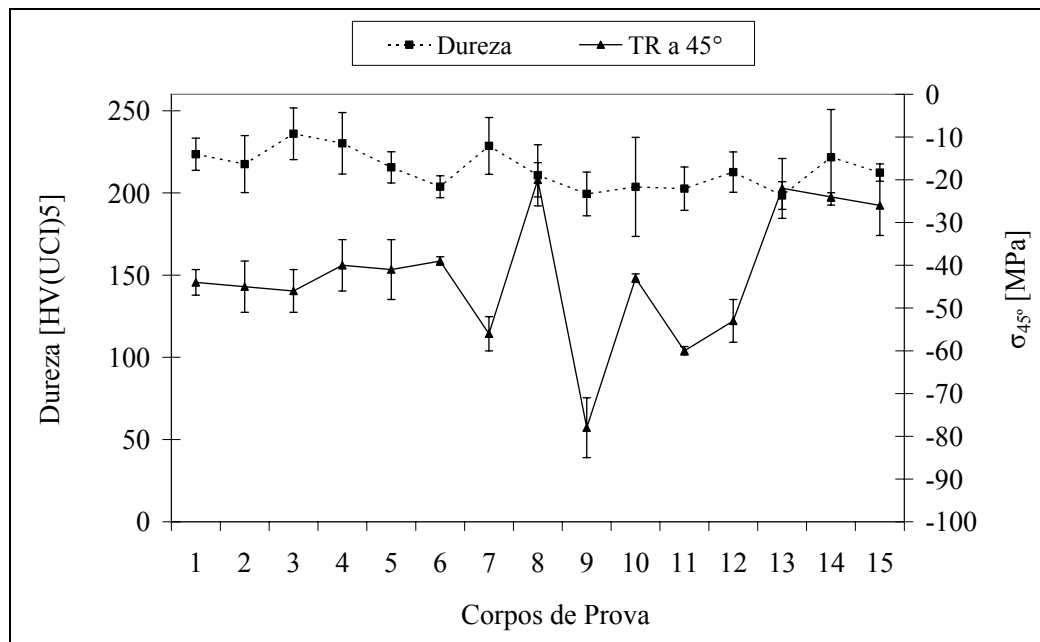


Figura 4.3 – Gráfico de integração dos resultados dos ensaios ( $\alpha = 0^\circ$ ) da TR a  $45^\circ$  ( $\sigma_{45^\circ}$ ) e dureza UCI .

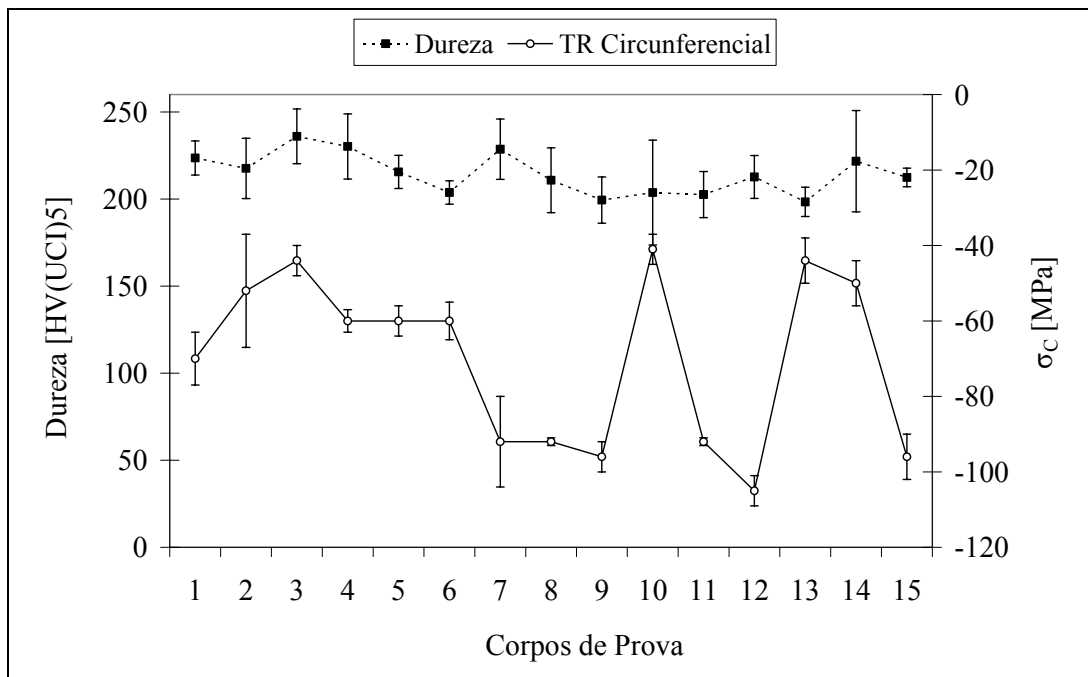


Figura 4.4 – Gráfico de integração dos resultados dos ensaios ( $\alpha = 0^\circ$ ) da TR circunferencial ( $\sigma_C$ ) e dureza UCI .

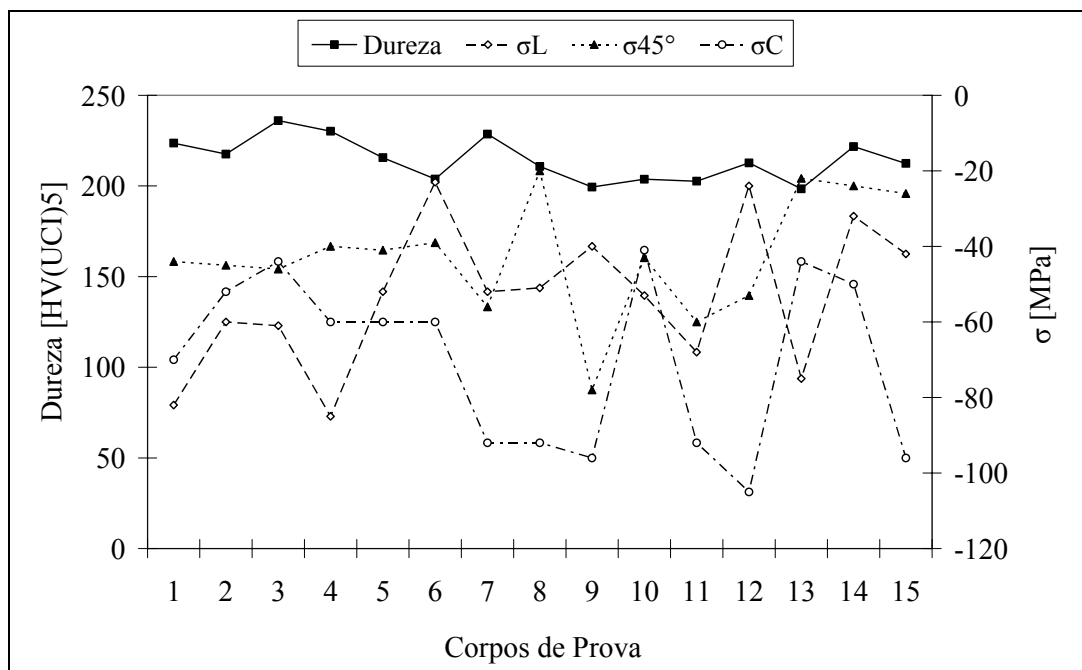


Figura 4.5 – Gráfico de integração dos resultados dos ensaios ( $\alpha = 0^\circ$ ) das tensões residuais ( $\sigma_C$ ,  $\sigma_{45^\circ}$  e  $\sigma_L$ ) e dureza UCI .

Analisando as Figuras 4.2 a 4.5, quanto ao comportamento dos resultados das medições de dureza UCI, é possível observar a homogeneidade nos resultados de dureza, e que não existe relação entre a variação das magnitudes das tensões residuais e as médias da dureza em cada corpo de prova.

Observando na Figura 4.5 o comportamento das tensões residuais nos corpos de prova antes do dobramento ( $\alpha = 0^\circ$ ), depreende-se que em todas as direções avaliadas as tensões são compressivas, de baixa magnitude, heterogêneas entre si e variam em relação ao SMYS do material, de 5 até 18% para a tensão longitudinal, de 4 até 16% para a tensão a  $45^\circ$  e de 8 até 22% para a tensão circunferencial.

#### **4.1.2 - Ensaios realizados nos corpos de prova com grau de deformação plástica equivalente a $\alpha = 90^\circ$**

A Tabela 4.5 e a Tabela 4.6 apresentam os resultados dos ensaios de TR por difração de raios-X e de dureza UCI, respectivamente, nos corpos de provas com grau I de deformação plástica,  $\alpha = 90^\circ$ .

Tabela 4.5 – Resultados dos ensaios de TR ( $\alpha = 90^\circ$ ).

| Corpo de Prova | Tensão Residual [MPa] |                   |                   |
|----------------|-----------------------|-------------------|-------------------|
|                | Longitudinal          | 45°               | Circunferencial   |
| <b>1</b>       | -137 ± 3              | -203 ± 7          | -297 ± 5          |
| <b>2</b>       | -150 ± 6              | -186 ± 5          | -297 ± 2          |
| <b>3</b>       | -145 ± 10             | -177 ± 3          | -280 ± 6          |
| <b>4</b>       | -170 ± 3              | -181 ± 10         | -280 ± 3          |
| <b>7</b>       | -108 ± 4              | -200 ± 8          | -283 ± 5          |
| <b>9</b>       | -133 ± 8              | -179 ± 6          | -279 ± 6          |
| <b>10</b>      | -171 ± 6              | -189 ± 4          | -263 ± 8          |
| <b>Média</b>   | <b>-144,8 ± 5,7</b>   | <b>-187 ± 6,1</b> | <b>-282,7 ± 5</b> |

Em todas as direções analisadas dos corpos de prova as tensões residuais superficiais apresentaram-se compressivas, variando de -108MPa a -283MPa. A média da tensão longitudinal foi de -144,8MPa, da tensão a 45° foi -187MPa e da tensão circunferencial -282,7MPa. Considerando as tensões residuais geradas no ensaio de dobramento a 90° e o estado superficial do tubo oriundo do processo de fabricação por conformação a frio (U-O-E), seguido de jateamento superficial para aplicação do revestimento, estes resultados estão coerentes com os perfis de tensões residuais mostrados por WANG & GONG (2008), KRITZLER & WÜBBENHORST (2008) e KANDIL *et al.* (2001).

Tabela 4.6 – Resultados dos ensaios de dureza UCI ( $\alpha = 90^\circ$ ).

| <b>Corpo<br/>de<br/>Prova</b> | <b>Ensaio de Dureza [HV(UCI)5]</b> |          |          |          |          |          |          |          |          |           |
|-------------------------------|------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
|                               | <b>1</b>                           | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> | <b>6</b> | <b>7</b> | <b>8</b> | <b>9</b> | <b>10</b> |
| <b>1</b>                      | 162                                | 160      | 138      | 117      | 116      | 140      | 166      | 154      | 151      | 155       |
| <b>2</b>                      | 140                                | 115      | 122      | 144      | 119      | 143      | 147      | 129      | 159      | 121       |
| <b>3</b>                      | 113                                | 171      | 111      | 127      | 137      | 113      | 120      | 143      | 129      | 166       |
| <b>4</b>                      | 165                                | 164      | 142      | 164      | 160      | 177      | 119      | 127      | 161      | 155       |
| <b>7</b>                      | 109                                | 96       | 104      | 120      | 157      | 185      | 179      | 130      | 182      | 192       |
| <b>9</b>                      | 158                                | 167      | 190      | 167      | 179      | 110      | 195      | 167      | 201      | 186       |
| <b>10</b>                     | 152                                | 184      | 141      | 118      | 184      | 97       | 147      | 93       | 137      | 110       |

Os resultados dos ensaios de dureza, de acordo com o teste de normalidade *Anderson-Darling*, seguem a distribuição normal e a Tabela 4.7 apresenta as médias, os desvios padrões e o *p-value* do teste de normalidade de cada corpo de prova.

Tabela 4.7 – Representação consolidada da média e DV da dureza em cada corpo de prova ( $\alpha = 90^\circ$ ).

| <b>Corpo de Prova</b> | <b>Dureza Média<br/>[HV(UCI)5]</b> | <b>Desvio-padrão</b> | <b><i>P-value</i></b> |
|-----------------------|------------------------------------|----------------------|-----------------------|
| 1                     | 145,8                              | 17,8                 | 0,157                 |
| 2                     | 133,9                              | 14,4                 | 0,322                 |
| 3                     | 133,0                              | 21,5                 | 0,198                 |
| 4                     | 153,4                              | 18,3                 | 0,087                 |
| 7                     | 145,4                              | 37,5                 | 0,146                 |
| 9                     | 172,0                              | 25,9                 | 0,113                 |
| 10                    | 136,3                              | 32,2                 | 0,623                 |

A média dos resultados de dureza, com 95% de confiança, de acordo com o teste de normalidade *Anderson-Darling* ( $p\text{-value} = 0,236$ ), segue uma distribuição normal com média de 145,7HV(UCI)5 e DV igual a 13,78, cuja função de densidade de probabilidade está ilustrada na Figura 4.6.

Da média da dureza superficial de 145,7HV(UCI)5, para os corpos de prova com grau I de deformação plástica equivalente a  $\alpha = 90^\circ$ , na ausência de revestimentos e/ou

impurezas superficiais é possível observar uma redução significativa na magnitude da dureza superficial. Comparativamente, a redução corresponde a 32% do valor obtido nos ensaios com os corpos de prova sem deformação plástica  $\alpha = 0^\circ$  (214,5HV(UCI)5), a 34% do valor apresentado por HASHEMI (2011) para dureza o aço API 5L X65 (221HV), e 32,5% do resultado apresentado por AMEND & CLARK (2009) para o aço API 5L X70 (216HV).

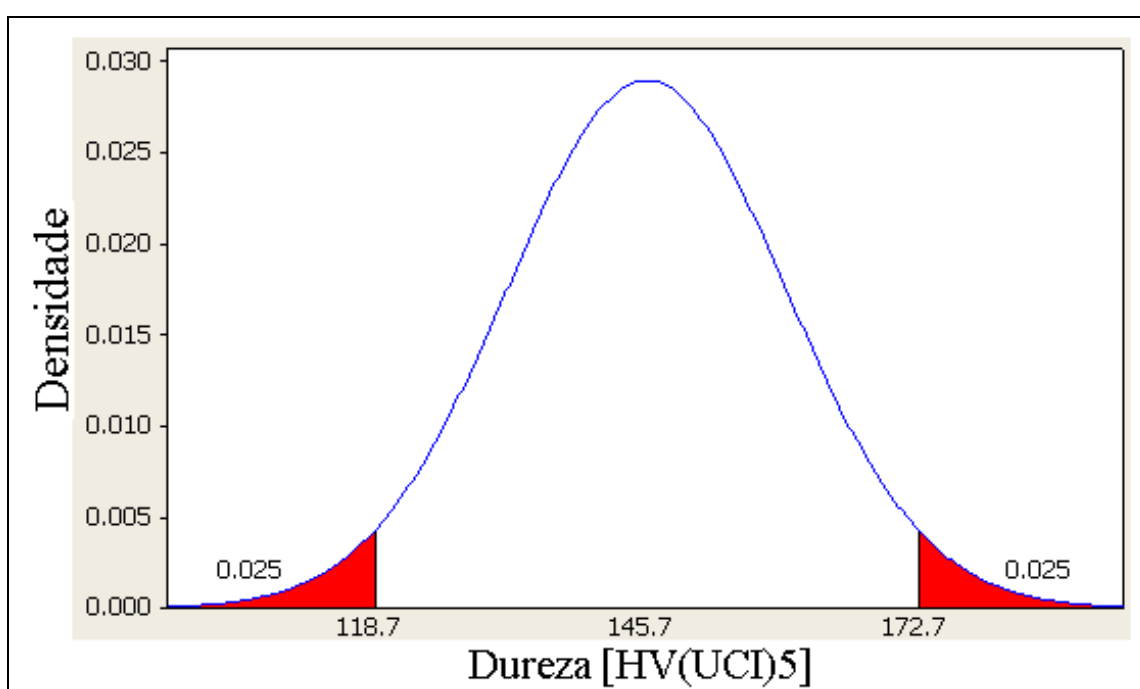


Figura 4.6 – Função de densidade de probabilidade, com 95% de confiança, da média dos ensaios de dureza UCI nos corpos de prova ( $\alpha = 90^\circ$ ).

Para possibilitar uma melhor visualização dos resultados obtidos nos ensaios de dureza e TR, na condição dos corpos de prova com deformação plástica ( $\alpha = 90^\circ$ ), eles foram apresentados graficamente através da Figura 4.7 (com tensões na direção longitudinal), Figura 4.8 (com tensões na direção a  $45^\circ$ ) e na Figura 4.9 (com tensões na

direção circunferencial). Na Figura 4.10 é possível ter uma visão consolidada das tensões em todas as direções e a média da dureza em cada corpo de prova, o que permite uma comparação do comportamento dos valores de forma integrada.

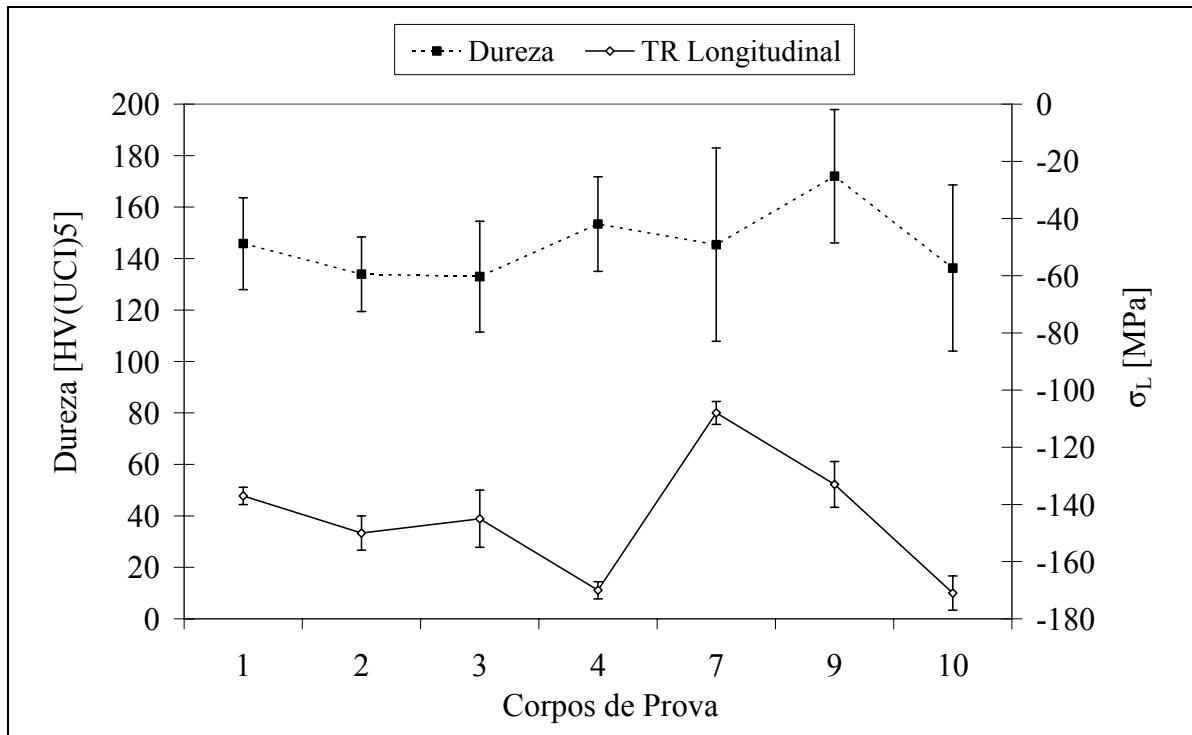


Figura 4.7 – Gráfico de integração dos resultados dos ensaios ( $\alpha = 90^\circ$ ) da TR longitudinal ( $\sigma_L$ ) e dureza UCI .

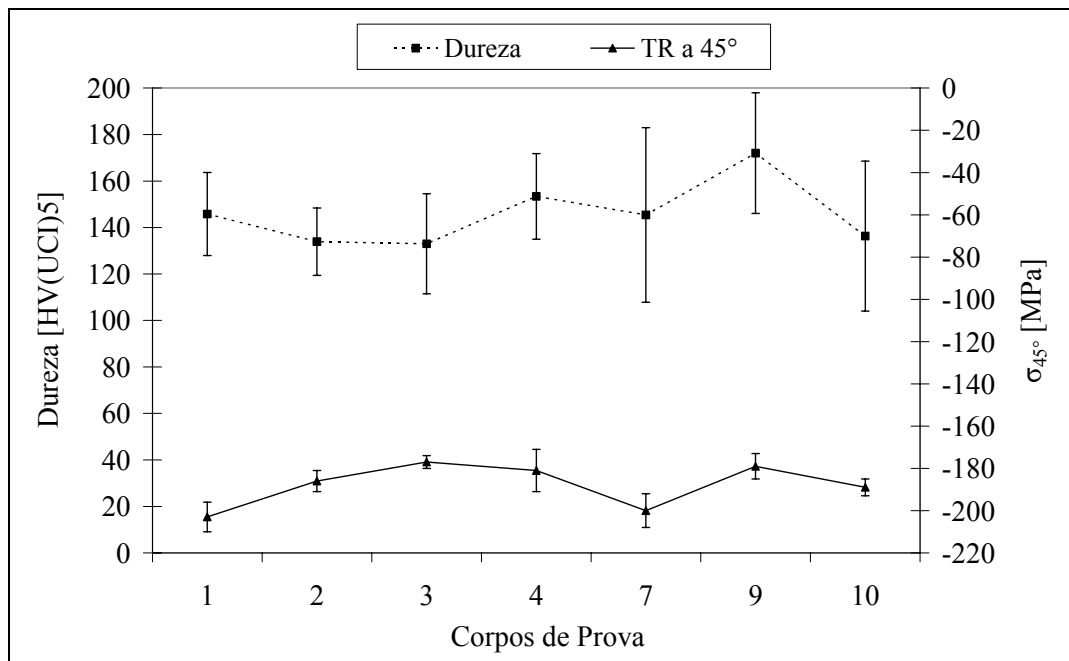


Figura 4.8 – Gráfico de integração dos resultados dos ensaios ( $\alpha = 90^\circ$ ) da TR a  $45^\circ$  ( $\sigma_{45^\circ}$ ) e dureza UCI .

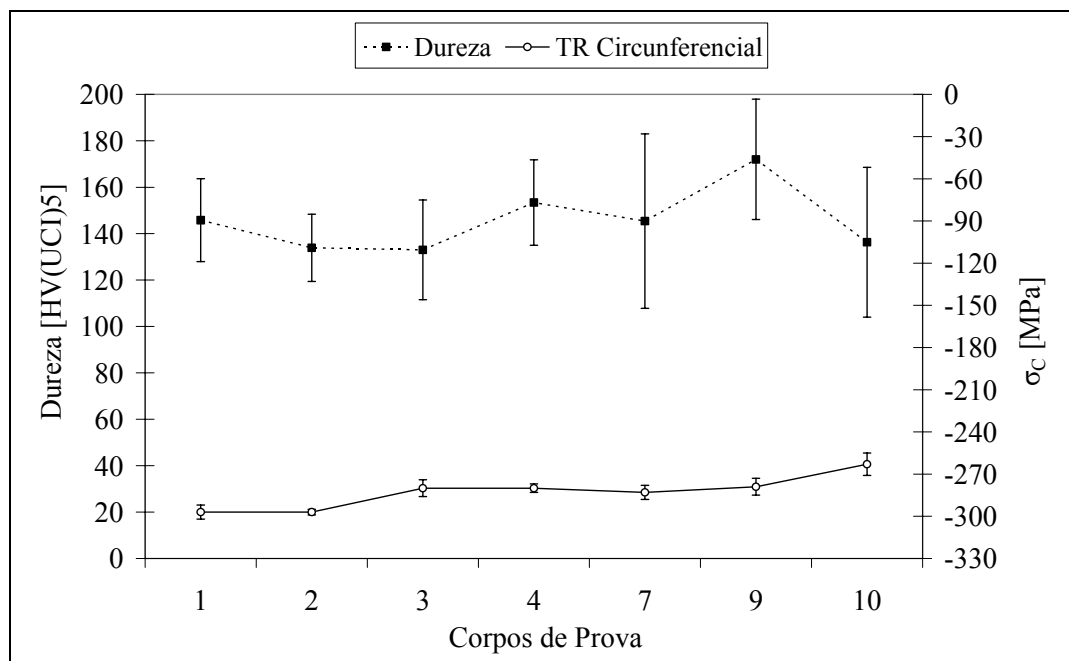


Figura 4.9 – Gráfico de integração dos resultados dos ensaios ( $\alpha = 90^\circ$ ) da TR circunferencial ( $\sigma_c$ ) e dureza UCI .

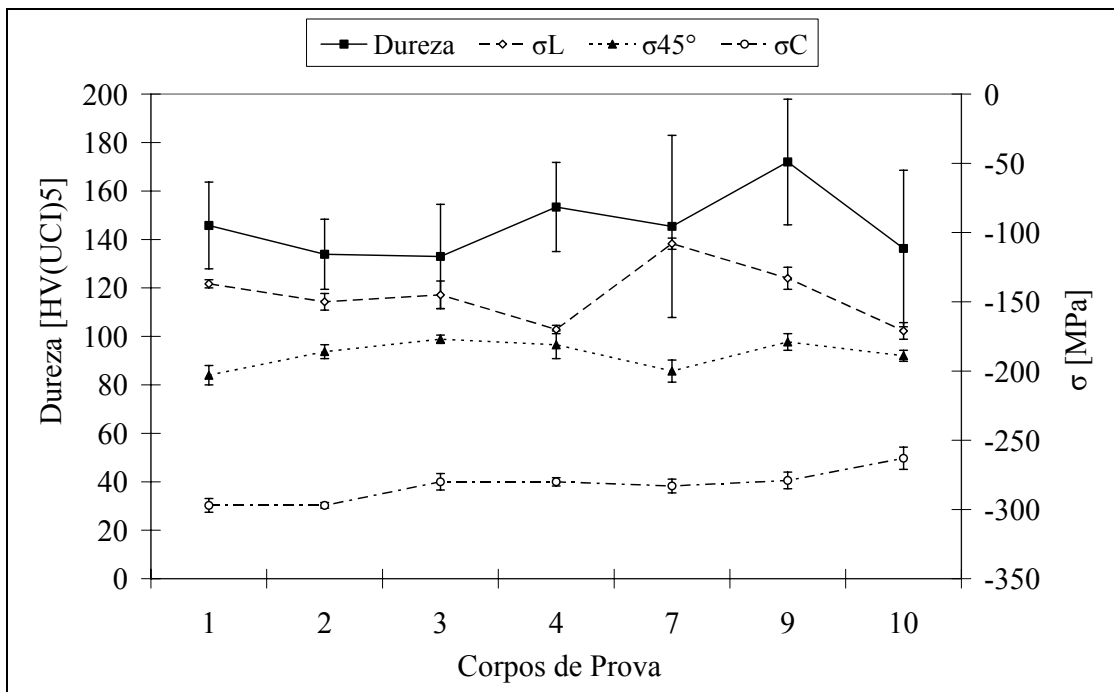


Figura 4.10 – Gráfico de integração dos resultados dos ensaios ( $\alpha = 90^\circ$ ) e das tensões residuais ( $\sigma_C$ ,  $\sigma_{45^\circ}$  e  $\sigma_L$ ) e dureza UCI .

Analisando as Figuras 4.7 a 4.10, quanto ao comportamento dos resultados das medições de dureza UCI, é possível observar a homogeneidade nos resultados de dureza, e que não existe relação entre a variação das magnitudes das tensões residuais e as médias da dureza em cada corpo de prova.

Observando na Figura 4.10 o comportamento das tensões residuais nos corpos de prova com deformação plástica equivalente a  $\alpha = 90^\circ$ , depreende-se que em todas as direções avaliadas as tensões são compressivas, de magnitudes significativas e variam em relação ao SMYS do material, de 22 até 35% para a tensão longitudinal, de 37 até 42% para a tensão a  $45^\circ$  e de 54 até 61% para a tensão circunferencial.

Provavelmente estes percentuais elevados são devidos à severidade da deformação plástica induzida e podem estar correlacionados com a perda de propriedades mecânicas do material devido ao efeito *Bauschinger*.

Estes resultados, ( $\alpha = 90^\circ$ ), se comparados aos resultados obtidos nos corpos de prova a  $\alpha = 0^\circ$ , nota-se a distinção entre os três diferentes patamares de tensões residuais em  $\alpha = 90^\circ$ , comportamento não percebido em  $\alpha = 0^\circ$ . Nesta condição de deformação ( $\alpha = 90^\circ$ ) a tensão longitudinal variou de -108MPa a -171MPa, a tensão a  $45^\circ$  de -177MPa a -203MPa e a tensão circunferencial de -263MPa a -297MPa, além de mostrar heterogeneidade no comportamento das tensões (longitudinal,  $45^\circ$  e circunferencial) entre si.

#### **4.1.3 - Ensaios realizados nos corpos de prova com grau de deformação plástica equivalente a $\alpha = 135^\circ$**

A Tabela 4.8 e a Tabela 4.9 apresentam os resultados dos ensaios de TR por difração de raios-X e de dureza UCI, respectivamente, nos corpos de provas com grau II de deformação plástica, equivalente a  $\alpha = 135^\circ$ .

Tabela 4.8 – Resultados dos ensaios de TR ( $\alpha = 135^\circ$ ).

| Corpo de Prova | Tensão Residual [MPa] |                   |                     |
|----------------|-----------------------|-------------------|---------------------|
|                | Longitudinal          | 45°               | Circunferencial     |
| <b>1</b>       | -150 ± 6              | -202 ± 2          | -283 ± 5            |
| <b>2</b>       | -170 ± 5              | -189 ± 11         | -292 ± 7            |
| <b>3</b>       | -160 ± 2              | -197 ± 5          | -340 ± 3            |
| <b>4</b>       | -175 ± 1              | -197 ± 16         | -313 ± 9            |
| <b>8</b>       | -138 ± 4              | -183 ± 3          | -290 ± 4            |
| <b>11</b>      | -151 ± 2              | -198 ± 5          | -305 ± 4            |
| <b>12</b>      | -180 ± 3              | -213 ± 8          | -311 ± 6            |
| <b>Média</b>   | <b>-160,5 ± 3,2</b>   | <b>-197 ± 7,1</b> | <b>-304,8 ± 5,4</b> |

Na condição  $\alpha = 135^\circ$ , em todas as direções analisadas dos corpos de prova, as tensões residuais superficiais apresentaram-se compressivas, variando de -138MPa a -340MPa. A média da tensão longitudinal foi de -160,5MPa, da tensão a 45° foi -197MPa e da tensão circunferencial -304,8MPa. Estes resultados estão coerentes com os perfis de tensões residuais mostrados por WANG & GONG (2008), KRITZLER & WÜBBENHORST (2008) e KANDIL *et al.* (2001), considerando as tensões residuais

geradas no ensaio de dobramento a  $\alpha = 135^\circ$  e o estado superficial do tubo conformado a frio (U-O-E), seguido de jateamento superficial antes da aplicação do revestimento.

Tabela 4.9 – Resultados dos ensaios de dureza UCI ( $\alpha = 135^\circ$ ).

| Corpo<br>de<br>Prova | Ensaio de Dureza [HV (UCI) 5] |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|----------------------|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                      | 1                             | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  |
| 1                    | 191                           | 193 | 220 | 194 | 181 | 130 | 159 | 89  | 140 | 89  |
| 2                    | 91                            | 174 | 163 | 166 | 163 | 179 | 163 | 106 | 128 | 147 |
| 3                    | 173                           | 141 | 174 | 187 | 160 | 96  | 99  | 98  | 120 | 131 |
| 4                    | 110                           | 158 | 97  | 191 | 110 | 120 | 98  | 101 | 150 | 146 |
| 8                    | 107                           | 125 | 175 | 182 | 110 | 159 | 98  | 150 | 175 | 151 |
| 11                   | 196                           | 191 | 153 | 196 | 160 | 130 | 196 | 175 | 96  | 107 |
| 12                   | 149                           | 187 | 153 | 160 | 192 | 197 | 170 | 161 | 134 | 150 |

As médias dos ensaios de dureza, apresentadas na Tabela 4.10, de acordo com o teste de normalidade *Anderson-Darling*, seguem a distribuição normal.

Tabela 4.10 – Representação consolidada da média e DV da dureza em cada corpo de prova ( $\alpha = 135^\circ$ ).

| <b>Corpo de Prova</b> | <b>Dureza Média<br/>[HV(UCI)5]</b> | <b>Desvio-padrão</b> | <b><i>P-value</i></b> |
|-----------------------|------------------------------------|----------------------|-----------------------|
| <b>1</b>              | 158,6                              | 45,47                | 0,312                 |
| <b>2</b>              | 148,0                              | 29,91                | 0,051                 |
| <b>3</b>              | 137,9                              | 34,44                | 0,365                 |
| <b>4</b>              | 128,1                              | 31,59                | 0,153                 |
| <b>8</b>              | 143,2                              | 31,04                | 0,303                 |
| <b>11</b>             | 160,0                              | 37,90                | 0,152                 |
| <b>12</b>             | 165,3                              | 20,78                | 0,438                 |

Com 95% de confiança, de acordo com o teste de normalidade *Anderson-Darling* ( $p\text{-value} = 0,789$ ), a média dos resultados de dureza segue uma distribuição normal com valor de 148,7HV(UCI)5 e DV igual a 13,37, cuja função de densidade de probabilidade está ilustrada na Figura 4.11.

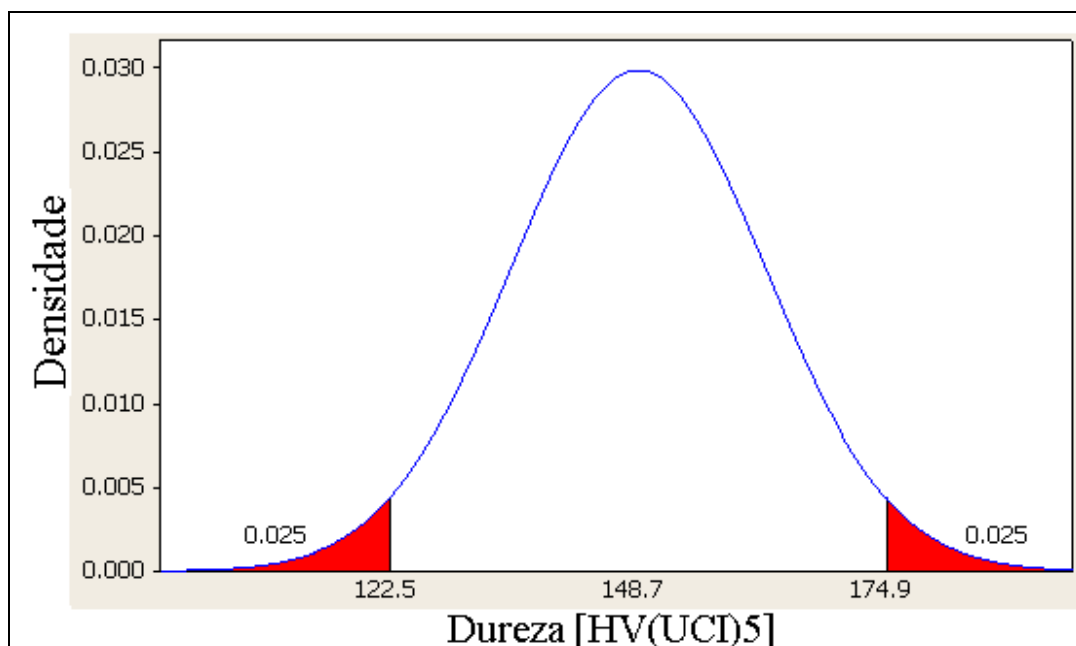


Figura 4.11 – Função de densidade de probabilidade, com 95% de confiança, da média dos ensaios de dureza UCI nos corpos de prova ( $\alpha = 135^\circ$ ).

Observando a média da dureza superficial de 148,7HV(UCI)5, dos corpos de prova com grau II de deformação plástica ( $\alpha = 135^\circ$ ), na ausência de revestimentos e/ou impurezas superficiais, é possível perceber uma redução significativa na magnitude da dureza superficial. Comparativamente, a redução corresponde a 31% do valor obtido nos ensaios com os corpos de prova sem deformação plástica  $\alpha = 0^\circ$  (214,5HV(UCI)5), a 33% do valor apresentado por HASHEMI (2011) para dureza do aço API 5L X65 (221HV), e 31,2% do resultado apresentado por AMEND & CLARK (2009) para o aço API 5L X70 (216HV).

Os resultados obtidos nos ensaios de dureza e TR, na condição de dobramento ( $\alpha = 135^\circ$ ), foram apresentados graficamente através da Figura 4.12 (com tensões na direção

longitudinal), Figura 4.13 (com tensões na direção a 45°) e na Figura 4.14 (com tensões na direção circunferencial), para permitir uma melhor visualização dos mesmos. Na Figura 4.15 é possível ter uma visão consolidada das tensões em todas as direções e a média da dureza em cada corpo de prova, o que permite uma comparação do comportamento dos valores de forma integrada.

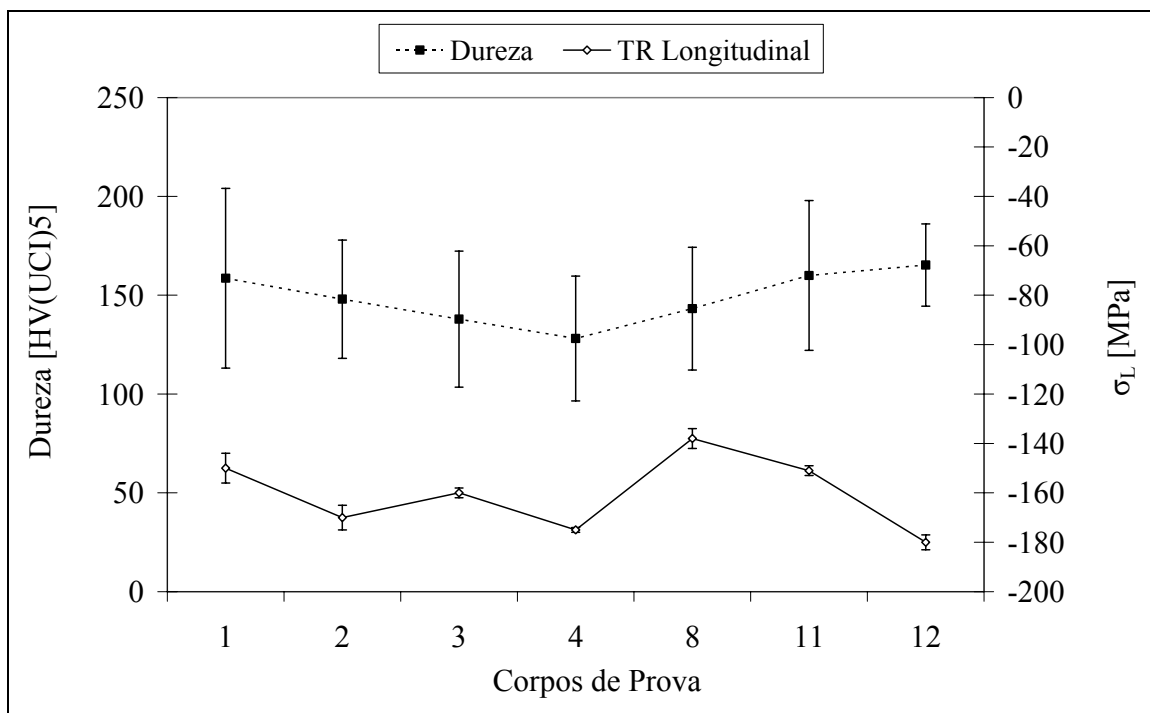


Figura 4.12 – Gráfico de integração dos resultados dos ensaios ( $\alpha = 135^\circ$ ) da TR longitudinal ( $\sigma_L$ ) e dureza UCI .

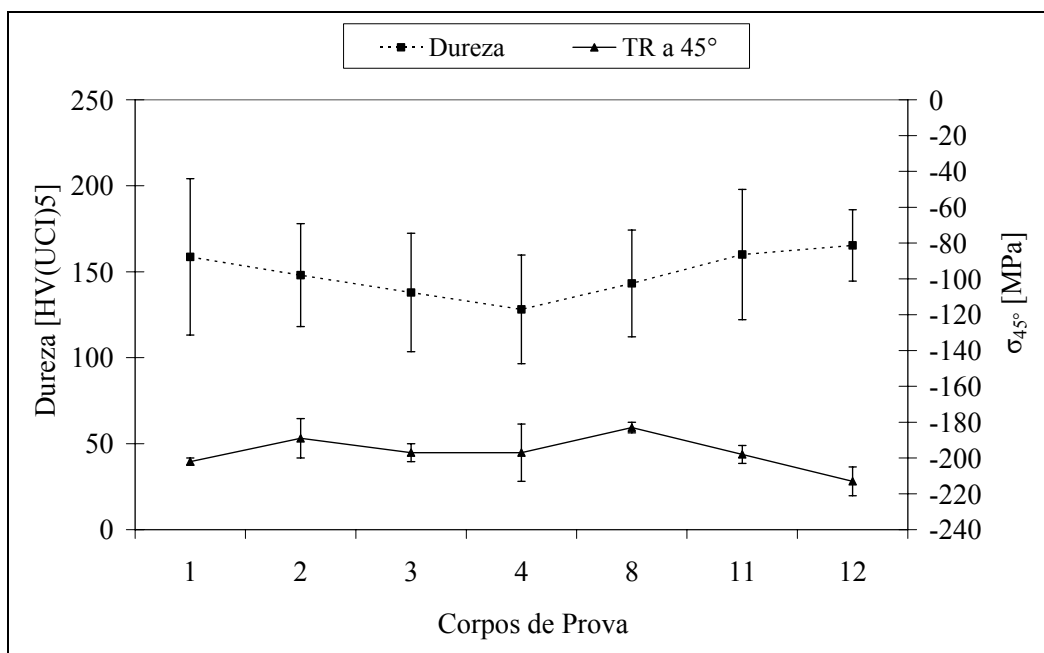


Figura 4.13 – Gráfico de integração dos resultados dos ensaios ( $\alpha = 135^\circ$ ) da TR a  $45^\circ$  ( $\sigma_{45^\circ}$ ) e dureza UCI .

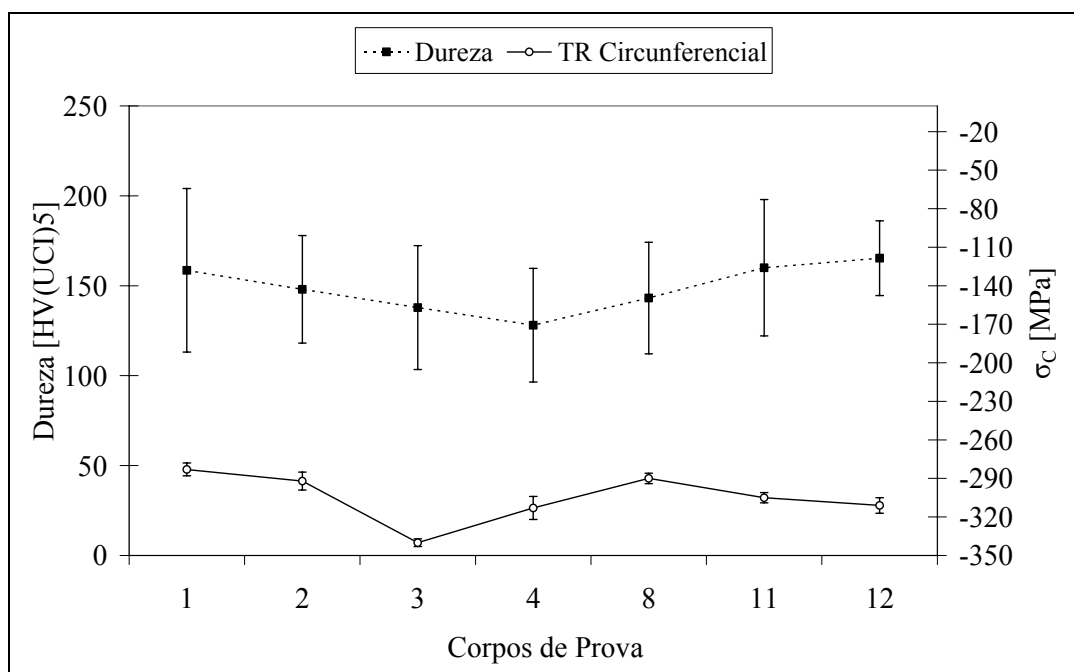


Figura 4.14 – Gráfico de integração dos resultados dos ensaios ( $\alpha = 135^\circ$ ) da TR circunferencial ( $\sigma_c$ ) e dureza UCI .

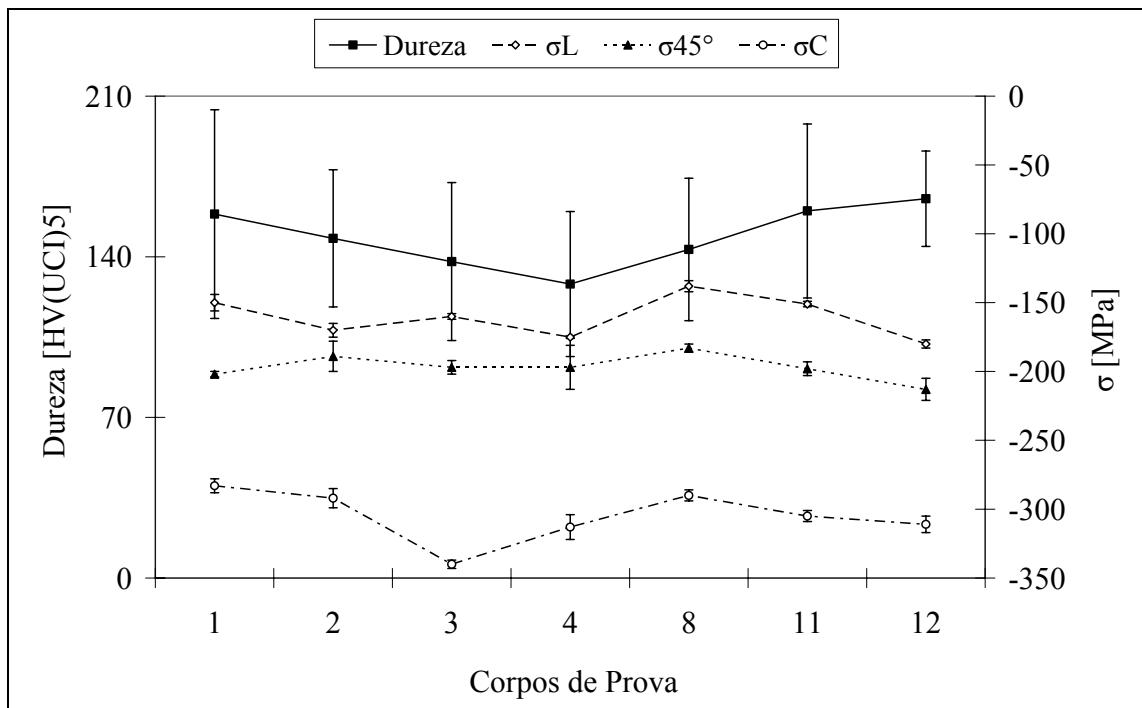


Figura 4.15 – Gráfico de integração dos resultados dos ensaios ( $\alpha = 135^\circ$ ) e das tensões residuais ( $\sigma_C$ ,  $\sigma_{45^\circ}$  e  $\sigma_L$ ) e dureza UCI.

Assim como foi observado nos ensaios com grau de deformação I, quanto ao comportamento dos resultados das medições de dureza UCI, nas Figuras 4.12 a 4.15 é possível perceber a homogeneidade nos resultados de dureza obtidos, e que não existe relação entre a variação das magnitudes das tensões residuais e as médias da dureza em cada corpo de prova.

A Figura 4.15 mostra que as tensões residuais, em todas as direções avaliadas na condição de  $\alpha = 135^\circ$ , são compressivas, de magnitudes significativas e variam em relação ao SMYS do material, de 29 a 37% para a tensão longitudinal, de 38 a 44% para a tensão a  $45^\circ$  e de 59 a 70% para a tensão circunferencial.

Neste caso, também, há uma clara distinção entre os três diferentes patamares de tensões residuais, onde a tensão longitudinal varia de -138MPa a -180MPa, a tensão a 45° de -183MPa a -213MPa e a tensão circunferencial varia de -283MPa a -340MPa, além da heterogeneidade do comportamento das tensões (longitudinal, 45° e circunferencial) entre si.

#### **4.1.4 - Ensaio realizados nos corpos de prova com grau de deformação plástica equivalente a $\alpha = 160^\circ$**

A Tabela 4.11 e a Tabela 4.12 apresentam os resultados dos ensaios de TR por difração de raios-X e de dureza UCI, respectivamente, nos corpos de provas com grau III de deformação plástica equivalente a  $\alpha = 160^\circ$ .

Tabela 4.11 – Resultados dos ensaios de TR ( $\alpha = 160^\circ$ ).

| <b>Corpo de Prova</b> | <b>Tensão Residual [MPa]</b> |                 |                        |
|-----------------------|------------------------------|-----------------|------------------------|
|                       | <b>Longitudinal</b>          | <b>45°</b>      | <b>Circunferencial</b> |
| <b>1</b>              | - 170 ± 1                    | -225 ± 7        | -358 ± 2               |
| <b>2</b>              | -186 ± 1                     | -206 ± 10       | -325 ± 7               |
| <b>3</b>              | -180 ± 5                     | -207 ± 6        | -312 ± 10              |
| <b>4</b>              | -168 ± 3                     | -210 ± 6        | -330 ± 10              |
| <b>5</b>              | -184 ± 15                    | -215 ± 8        | -320 ± 4               |
| <b>6</b>              | -199 ± 11                    | -220 ± 5        | -317 ± 0,5             |
| <b>13</b>             | -192 ± 1                     | -199 ± 12       | -335 ± 10              |
| <b>14</b>             | -189 ± 1                     | -206 ± 2        | -310 ± 5               |
| <b>Média</b>          | <b>-183,5 ± 4,7</b>          | <b>-211 ± 7</b> | <b>-326 ± 6</b>        |

As tensões residuais superficiais apresentaram-se compressivas, variando de -168MPa a -358MPa em todas as direções analisadas dos corpos de prova. A média da tensão longitudinal foi de -183,5MPa, da tensão a 45° foi -211MPa e da tensão circunferencial -326MPa. Considerando as tensões residuais geradas no ensaio de dobramento ( $\alpha = 160^\circ$ ) e o histórico de fabricação do tubo por conformação a frio (U-O-E), seguida de jateamento superficial antes da aplicação do revestimento, estes resultados estão coerentes com os perfis de tensões residuais mostrados nos trabalhos de WANG & GONG (2008), KRITZLER & WÜBBENHORST (2008) e KANDIL *et al.* (2001).

Os resultados dos ensaios de dureza, de acordo com o teste de normalidade *Anderson-Darling*, seguem a distribuição normal e a Tabela 4.13 apresenta as médias, os desvios padrões e o *p-value* do teste de cada corpo de prova.

Tabela 4.12 – Resultados dos ensaios de dureza UCI ( $\alpha = 160^\circ$ ).

| Corpo de Prova | Ensaio de Dureza [HV (UCI) 5] |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|----------------|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                | 1                             | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  |
| 1              | 105                           | 96  | 148 | 175 | 130 | 126 | 100 | 118 | 73  | 87  |
| 2              | 177                           | 177 | 185 | 166 | 142 | 174 | 165 | 158 | 192 | 110 |
| 3              | 130                           | 170 | 108 | 120 | 175 | 191 | 116 | 130 | 190 | 172 |
| 4              | 178                           | 170 | 174 | 175 | 171 | 150 | 147 | 198 | 202 | 189 |
| 5              | 194                           | 156 | 191 | 168 | 177 | 97  | 136 | 96  | 142 | 102 |
| 6              | 97                            | 93  | 94  | 181 | 134 | 146 | 160 | 110 | 209 | 151 |
| 13             | 99                            | 96  | 135 | 119 | 110 | 123 | 176 | 187 | 95  | 125 |
| 14             | 195                           | 142 | 133 | 172 | 195 | 160 | 135 | 195 | 150 | 126 |

Tabela 4.13 – Consolidação da média e DV da dureza em cada corpo de prova ( $\alpha = 160^\circ$ ).

| <b>Corpo de Prova</b> | <b>Dureza Média<br/>[HV(UCI)5]</b> | <b>Desvio-padrão</b> | <b><i>P-value</i></b> |
|-----------------------|------------------------------------|----------------------|-----------------------|
| <b>1</b>              | 115,8                              | 30,32                | 0,881                 |
| <b>2</b>              | 164,6                              | 23,81                | 0,145                 |
| <b>3</b>              | 150,2                              | 32,33                | 0,094                 |
| <b>4</b>              | 175,4                              | 17,99                | 0,508                 |
| <b>5</b>              | 145,9                              | 37,75                | 0,385                 |
| <b>6</b>              | 137,5                              | 39,5                 | 0,534                 |
| <b>13</b>             | 126,5                              | 31,98                | 0,089                 |
| <b>14</b>             | 160,3                              | 27,3                 | 0,176                 |

A média dos resultados de dureza, com 95% de confiança, de acordo com o teste de normalidade *Anderson-Darling* ( $p\text{-value} = 0,969$ ), segue uma distribuição normal com média de 147,0 HV(UCI)5 e DV igual a 19,96, cuja função de densidade de probabilidade está ilustrada na Figura 4.16.

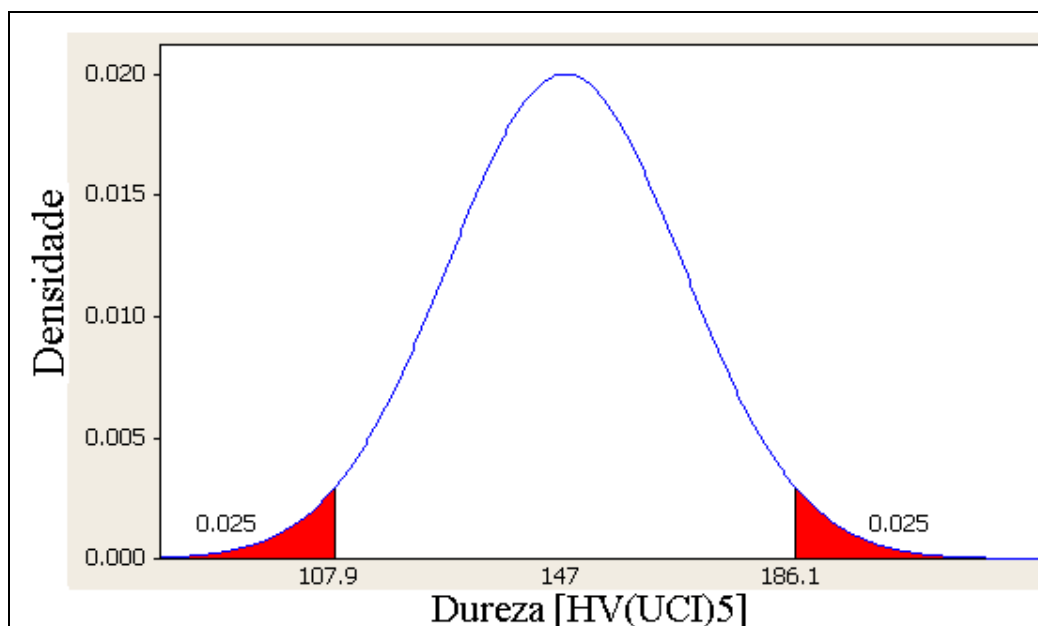


Figura 4.16 – Função de densidade de probabilidade, com 95% de confiança, da média dos ensaios de dureza UCI nos corpos de prova ( $\alpha = 160^\circ$ ).

É possível observar uma redução significativa na magnitude da média da dureza superficial de 147 HV(UCI)5 nos corpos de prova com grau III de deformação plástica ( $\alpha = 160^\circ$ ), na ausência de revestimentos e/ou impurezas superficiais. Comparativamente a redução corresponde a 31% do valor obtido nos ensaios com os corpos de prova sem deformação plástica  $\alpha = 0^\circ$  (214,5HV(UCI)5), a 33% do valor apresentado por HASHEMI (2011) para dureza do aço API 5L X65 (221HV), e 32% do resultado apresentado por AMEND & CLARK (2009) para o aço API 5L X70 (216HV).

Para possibilitar uma melhor visualização dos resultados obtidos nos ensaios de dureza e TR, na condição dos corpos de prova com deformação plástica ( $\alpha = 160^\circ$ ), eles foram apresentados graficamente através da Figura 4.17 (com tensões na direção

longitudinal), Figura 4.18 (com tensões na direção a 45°) e na Figura 4.19 (com tensões na direção circunferencial). Na Figura 4.20 é possível ter uma visão consolidada das tensões em todas as direções e a média da dureza em cada corpo de prova, o que permite uma comparação do comportamento dos valores de forma integrada.

Analisando ainda a Figura 4.20 é possível observar que os resultados de dureza UCI obtidos na condição extrema de  $\alpha = 160^\circ$ , quando comparados com aqueles do grau de deformação I ( $\alpha = 90^\circ$ ) e II ( $\alpha = 135^\circ$ ), podem ser considerados heterogêneos. Entretanto, não existe relação entre a variação das magnitudes das tensões residuais e as médias da dureza em cada corpo de prova.

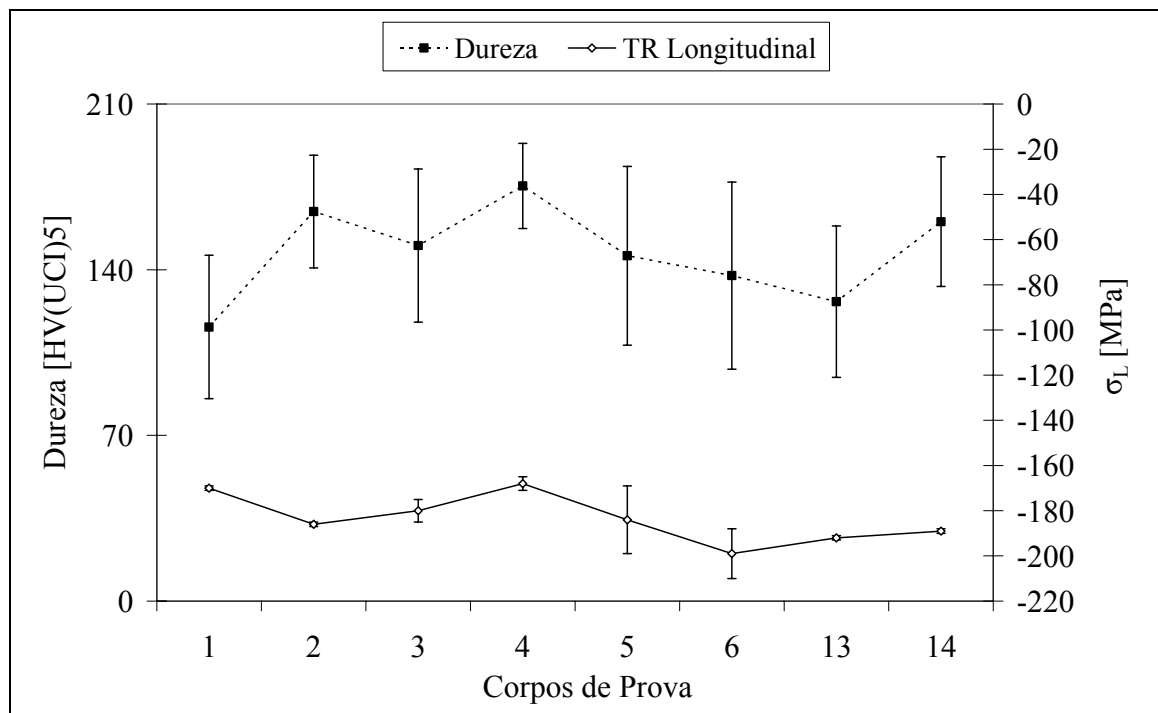


Figura 4.17 – Gráfico de integração dos resultados dos ensaios ( $\alpha = 160^\circ$ ) da TR ( $\sigma_L$ ) e dureza UCI .

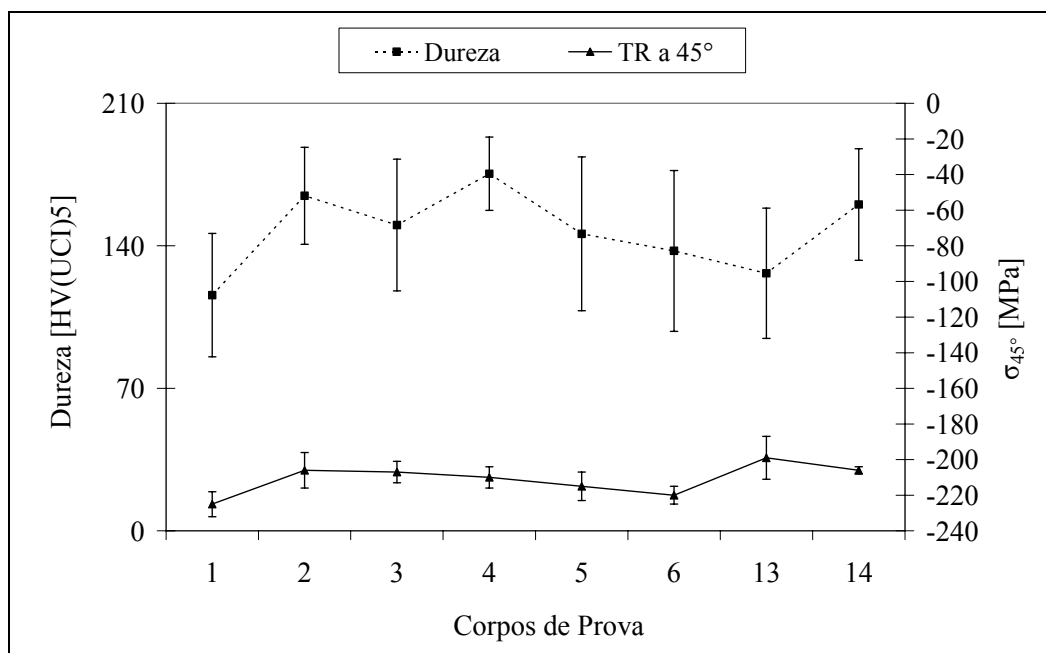


Figura 4.18 – Gráfico de integração dos resultados dos ensaios ( $\alpha = 160^\circ$ ) da TR ( $\sigma_{45^\circ}$ ) e dureza UCI .

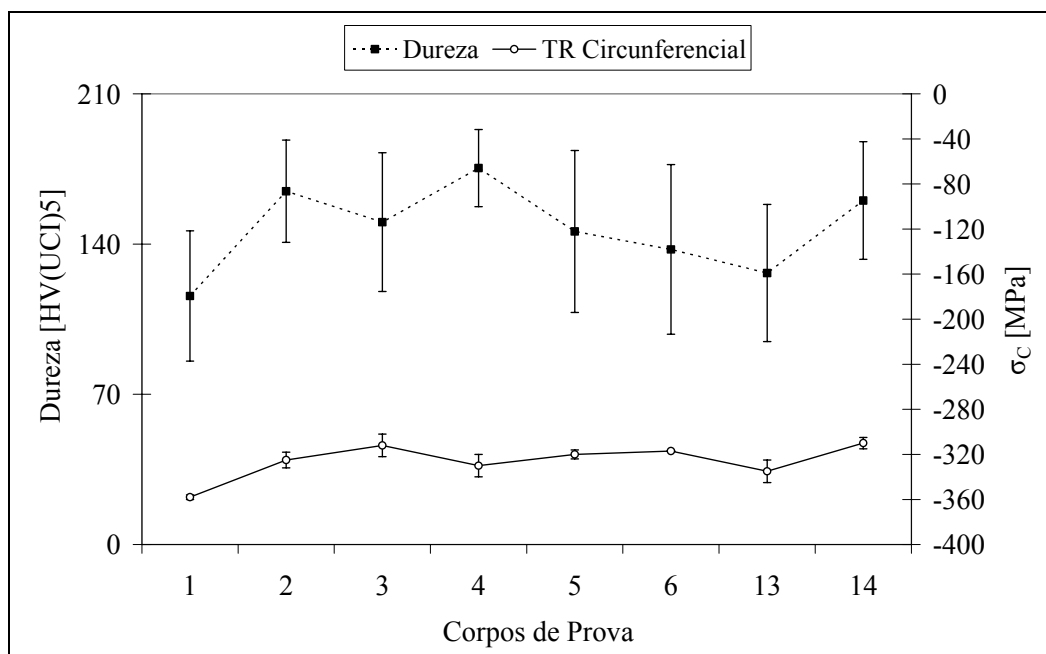


Figura 4.19 – Gráfico de integração dos resultados dos ensaios ( $\alpha = 160^\circ$ ) da TR ( $\sigma_c$ ) e dureza UCI .

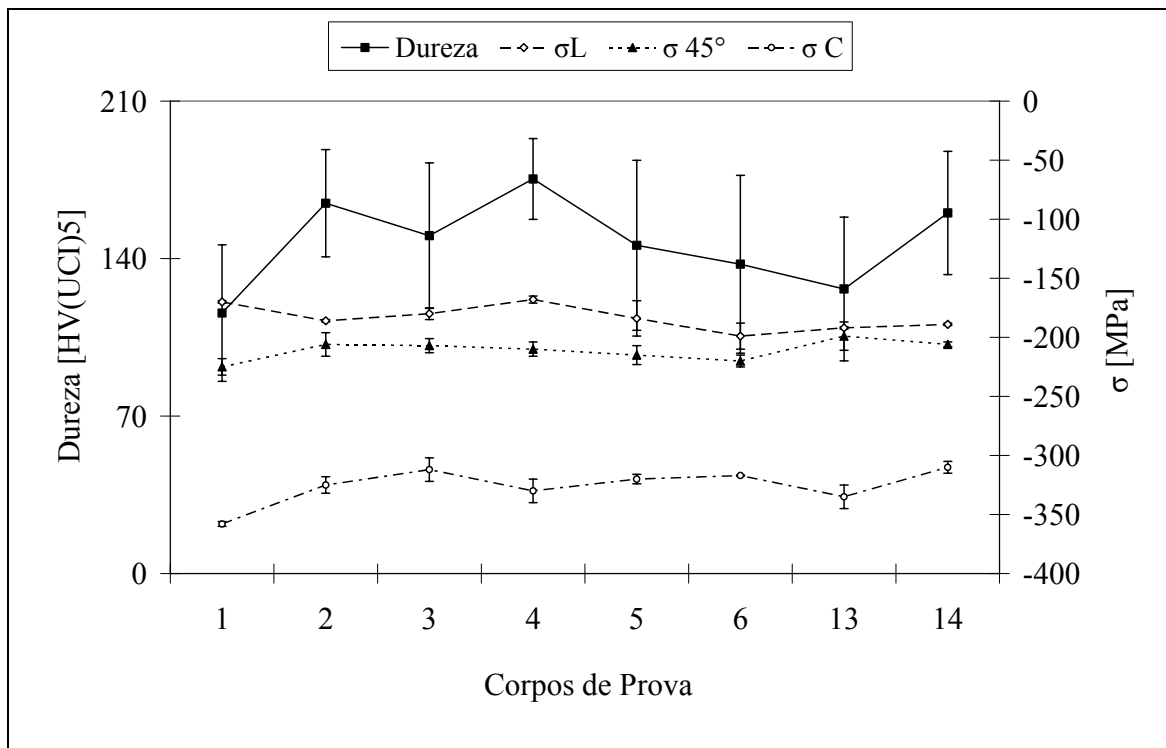


Figura 4.20 – Gráfico de integração dos resultados dos ensaios ( $\alpha = 160^\circ$ ) e das tensões residuais ( $\sigma_C$ ,  $\sigma_{45^\circ}$  e  $\sigma_L$ ) e dureza UCI .

Observando na Figura 4.20 o comportamento das tensões residuais superficiais nos corpos de prova com deformação plástica equivalente a  $\alpha = 160^\circ$ , depreende-se que em todas as direções avaliadas as tensões são compressivas, de magnitudes elevadas e variam em relação ao SMYS do material, de 35 até 41% para a tensão longitudinal, de 41 até 47% para a tensão a  $45^\circ$  e de 64 até 74% para a tensão circunferencial.

Nota-se ainda a distinção entre os três diferentes patamares de tensões residuais, a tensão longitudinal variando de -168MPa a -199MPa, a tensão a  $45^\circ$  variando de -199MPa a -225MPa e a tensão circunferencial variando de -310MPa a -358MPa, além da

heterogeneidade do comportamento das tensões (longitudinal, 45° e circunferencial) entre si.

#### **4.1.5 - Representação da variação da TR e dureza superficial em diferentes níveis de deformação**

Para visualizar a evolução das tensões residuais e da dureza superficial nos corpos de prova, com os diferentes graus de deformação a que os mesmos foram submetidos, os resultados foram tratados e apresentados graficamente através da integração dos experimentos laboratoriais nos diferentes níveis de deformação dos ensaios de dobramento.

Os corpos de prova 1, 2, 3 e 4 foram submetidos a quatro níveis de deformação, ou seja, sem deformação plástica ( $\alpha = 0^\circ$ ), grau I de deformação plástica ( $\alpha = 90^\circ$ ), grau II de deformação plástica ( $\alpha = 135^\circ$ ) e grau III de deformação plástica ( $\alpha = 160^\circ$ ), ensaios de tensometria por difração de raios-X e dureza UCI foram realizados em cada nível, e os resultados estão apresentados de forma integrada nas Figuras 4.21 a 4.24.

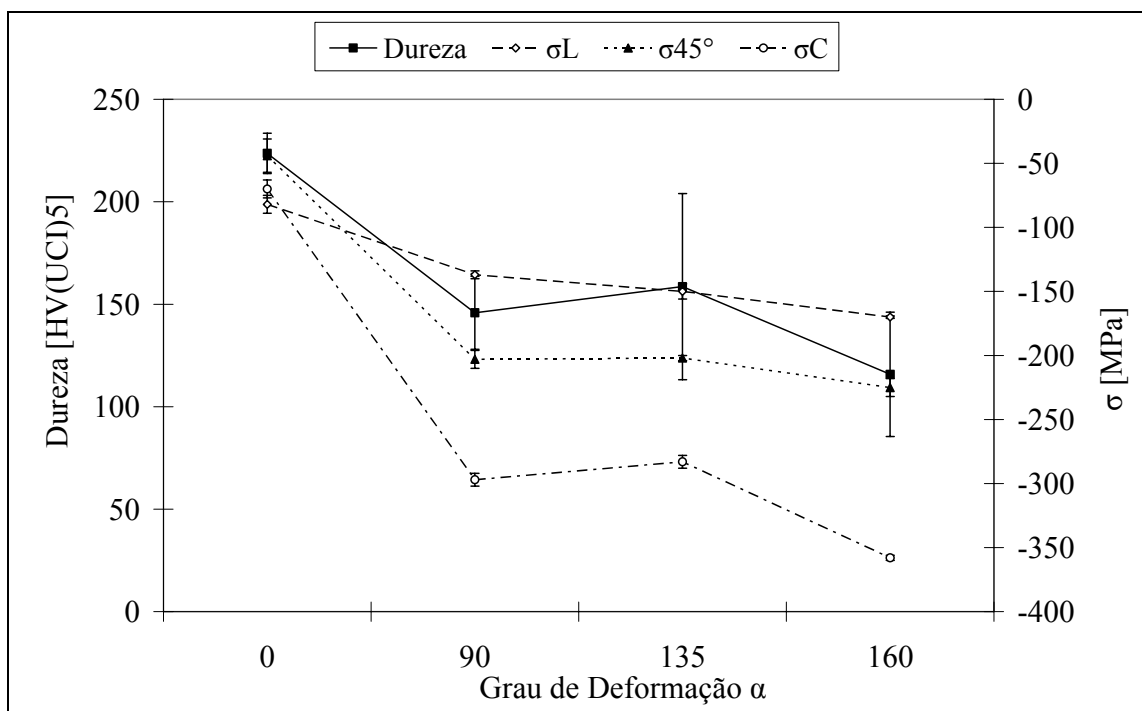


Figura 4.21 – TR e dureza superficial - Corpo de prova 01.

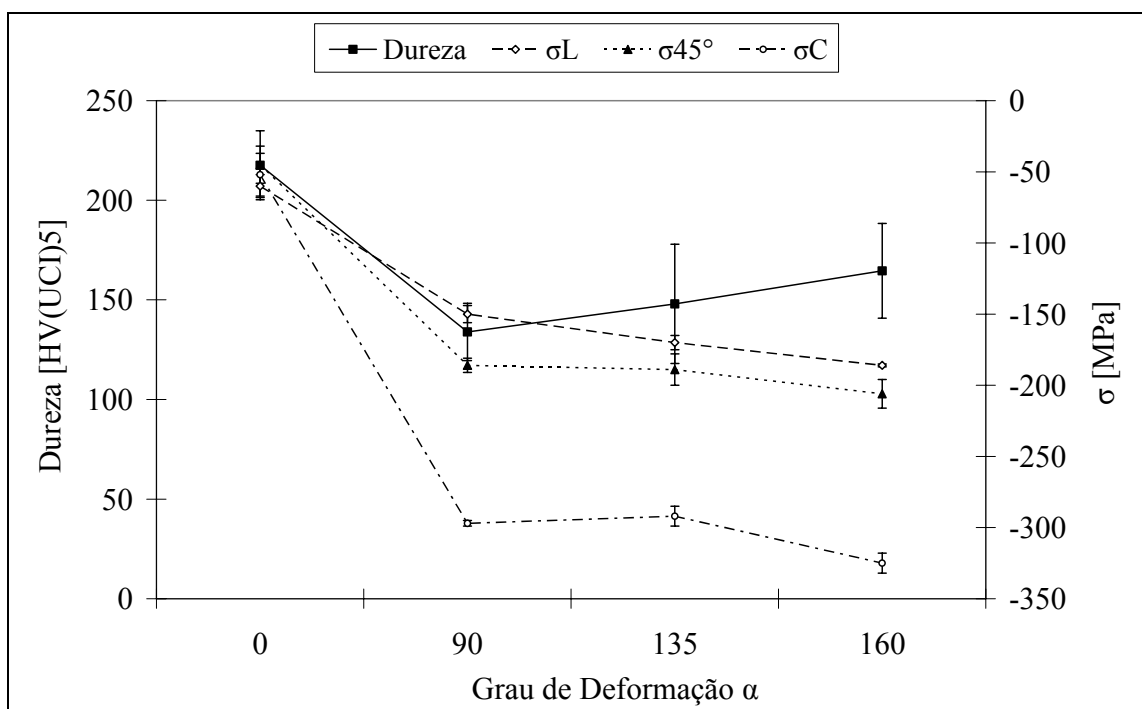


Figura 4.22 – TR e dureza superficial - Corpo de prova 02.

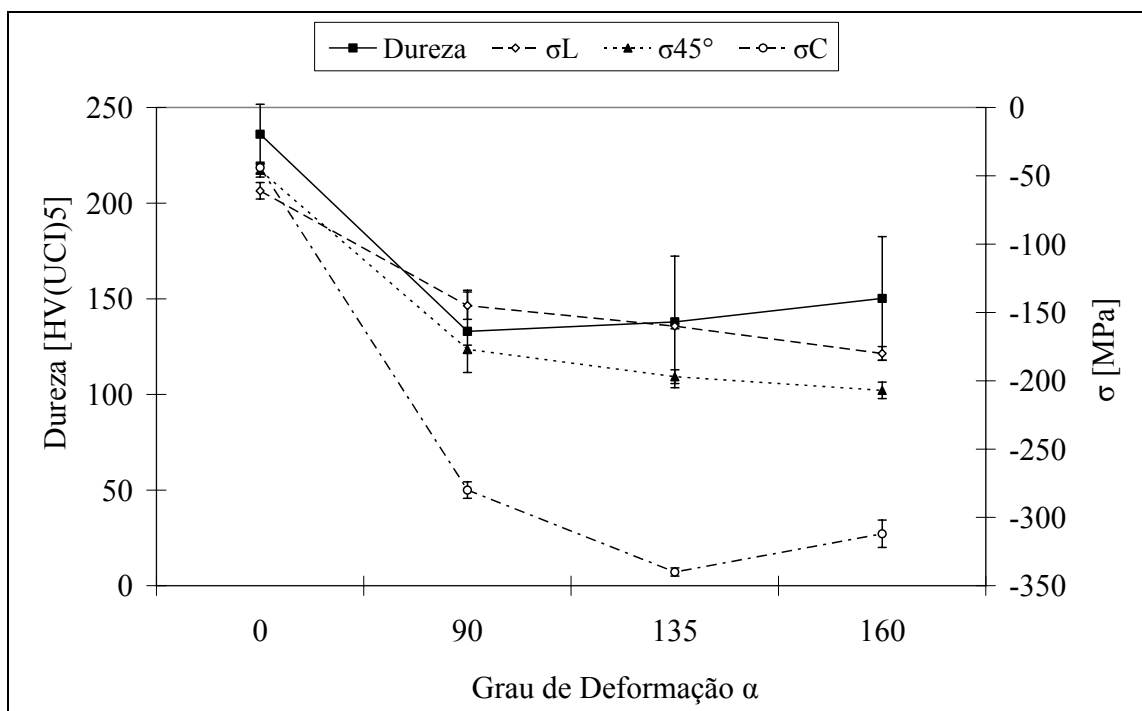


Figura 4.23 – TR e dureza superficial - Corpo de prova 03.

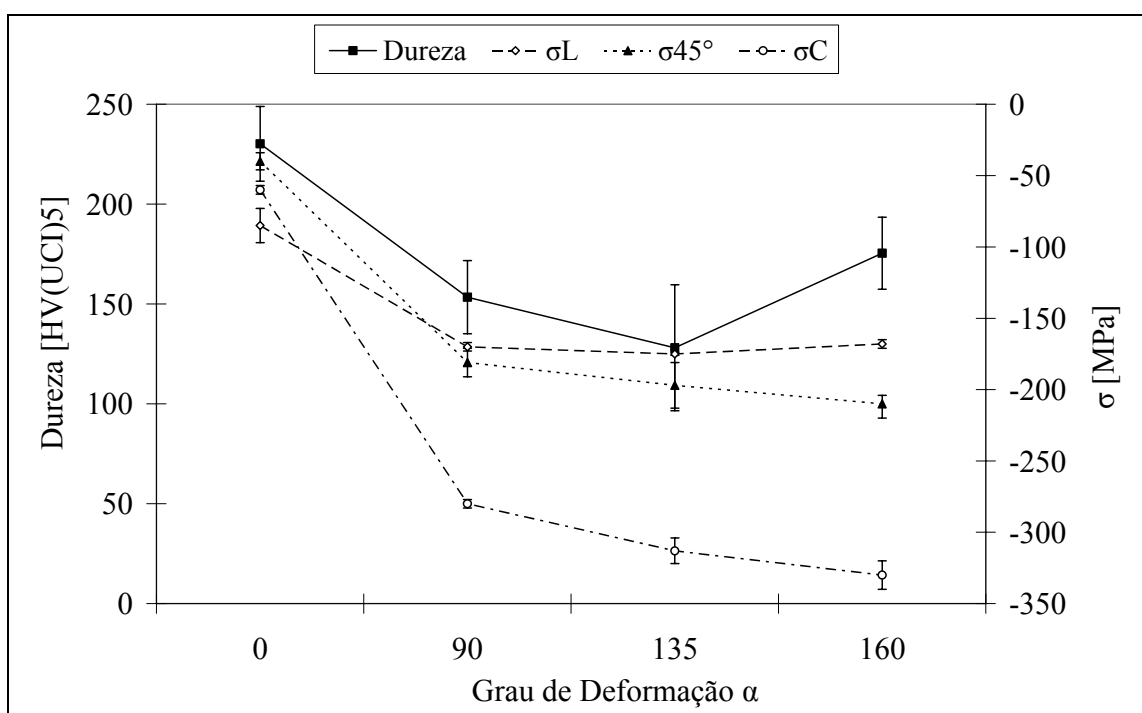


Figura 4.24 – TR e dureza superficial - Corpo de prova 04.

A variação da TR nos corpos de prova 1 (Figura 4.21), 2 (Figura 4.22), 3 (Figura 4.23) e 4 (Figura 4.24), da condição inicial sem deformação ( $\alpha = 0^\circ$ ) para a condição grau I de deformação plástica ( $\alpha = 90^\circ$ ) é homogênea entre os ensaios. A tensão longitudinal é de natureza compressiva e a média varia de -72MPa em  $\alpha = 0^\circ$  para -150,5MPa em  $\alpha = 90^\circ$ , o que corresponde a 16% do SMYS do material. A tensão a  $45^\circ$  é compressiva e a média varia de -43,7MPa em  $\alpha = 0^\circ$  para -186,7MPa em  $\alpha = 90^\circ$ , o que corresponde a 30% do SMYS do material, e finalmente, a tensão circunferencial é de natureza compressiva e a média varia de -56,5MPa em  $\alpha = 0^\circ$  para -288,5MPa em  $\alpha = 90^\circ$ , o que é correspondente a 48% do SMYS do material. A dureza superficial para esta mesma condição de deformação apresentou também um comportamento homogêneo, com a média de 226,8HV(UCI)5 para os corpos de prova na condição sem deformação ( $\alpha = 0^\circ$ ) e 141,5HV(UCI)5 para o grau I de deformação ( $\alpha = 90^\circ$ ), o que corresponde a 62% de redução.

Durante a deformação plástica nos ensaios de  $\alpha = 0^\circ$  a  $\alpha = 90^\circ$  os elevados percentuais observados na variação das tensões residuais em compressão (48% do SMYS do material), principalmente na direção circunferencial, e de redução da dureza (62%) podem ser atribuídos ao amolecimento permanente provocado pelo efeito *Bauschinger*, devido à severidade da deformação induzida. Este comportamento está coerente com aquele observado por ABEL & MUIR (1972) e WANG & GONG (2008).

O comportamento das tensões residuais nas condições de ensaios com deformação do grau I ( $\alpha = 90^\circ$ ) para grau II ( $\alpha = 135^\circ$ ) e do grau II ( $\alpha = 135^\circ$ ) para grau III ( $\alpha = 160^\circ$ ) apresentou-se de forma estável, de natureza compressiva e magnitudes variando entre -137MPa até -186MPa para a TR longitudinal, entre -177MPa até -225MPa para a TR a  $45^\circ$ , entre -280MPa até -358MPa para a TR circunferencial, que correspondem a 10,1%,

9,9% e 16,1% do SMYS do material, respectivamente. A dureza nestes mesmos níveis de deformação mostrou-se com pequenas variações e um comportamento estável, com média de 145,4HV(UCI)5.

Nota-se ainda a distinção entre os três diferentes patamares de tensões residuais, ou seja, TR longitudinais < TR a 45° < TR circunferenciais, a partir dos ensaios executados nos corpos de prova com grau de deformação plástica equivalente a  $\alpha$  igual a 90°, 135° e 160°.

Observando as Figuras 4.21 a 4.24, nos ensaios de dobramento de 0° a 90°, nota-se uma relação entre a dureza e a TR. Quando a deformação plástica foi imposta ao material depreende-se uma redução no patamar da dureza (amolecimento) e um aumento da TR em compressão. Este fenômeno não foi observado nos ensaios de dobramento de 90° a 135° e de 135° a 160°, que provavelmente tem relação com um patamar de saturação de amolecimento do material.

Os corpos de prova 7, 9 e 10 foram avaliados na condição sem deformação plástica ( $\alpha = 0^\circ$ ) e, em seguida, submetidos ao grau I de deformação plástica ( $\alpha = 90^\circ$ ). Ensaio de tensometria por difração de raios-X e dureza UCI foram realizados em cada nível, e os resultados estão apresentados de forma integrada na Figura 4.25, Figura 4.26 e na Figura 4.27. Analisando os resultados apresentados, observa-se que existem três diferentes patamares de tensões residuais nos corpos de prova em  $\alpha = 90^\circ$ , ou seja, TR longitudinais < TR a 45° < TR circunferenciais.

A magnitude média das TR na direção longitudinal é -48,3MPa em  $\alpha = 0^\circ$  e -137,3MPa em  $\alpha = 90^\circ$  (variação de 18% do SMYS do material), na direção a  $45^\circ$  é -59MPa em  $\alpha = 0^\circ$  e -189MPa em  $\alpha = 90^\circ$  (27% do SMYS do material) e na direção circunferencial é -76,3MPa em  $\alpha = 0^\circ$  e -275MPa em  $\alpha = 90^\circ$  (41% do SMYS do material). Nota-se ainda redução significativa da média da dureza entre os níveis de deformação, de 210,6HV(UCI)5 em  $\alpha = 0^\circ$  para 151,2HV(UCI)5 em  $\alpha = 90^\circ$ , correspondente a 28% de redução.

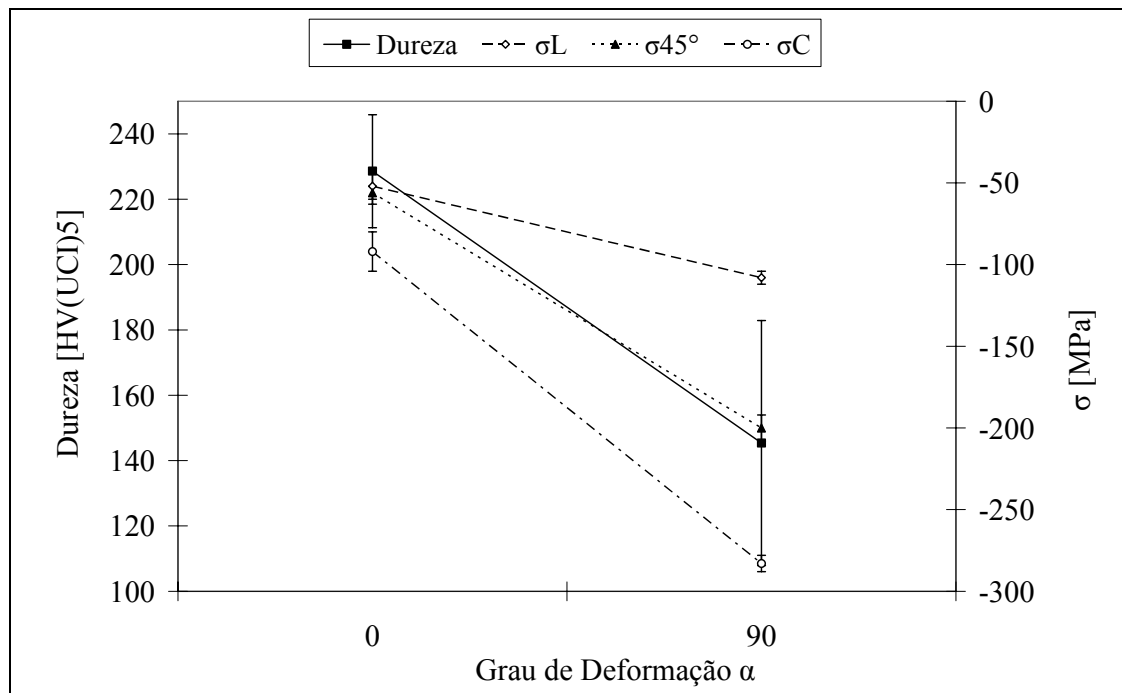


Figura 4.25 – TR e dureza superficial - Corpo de prova 07.

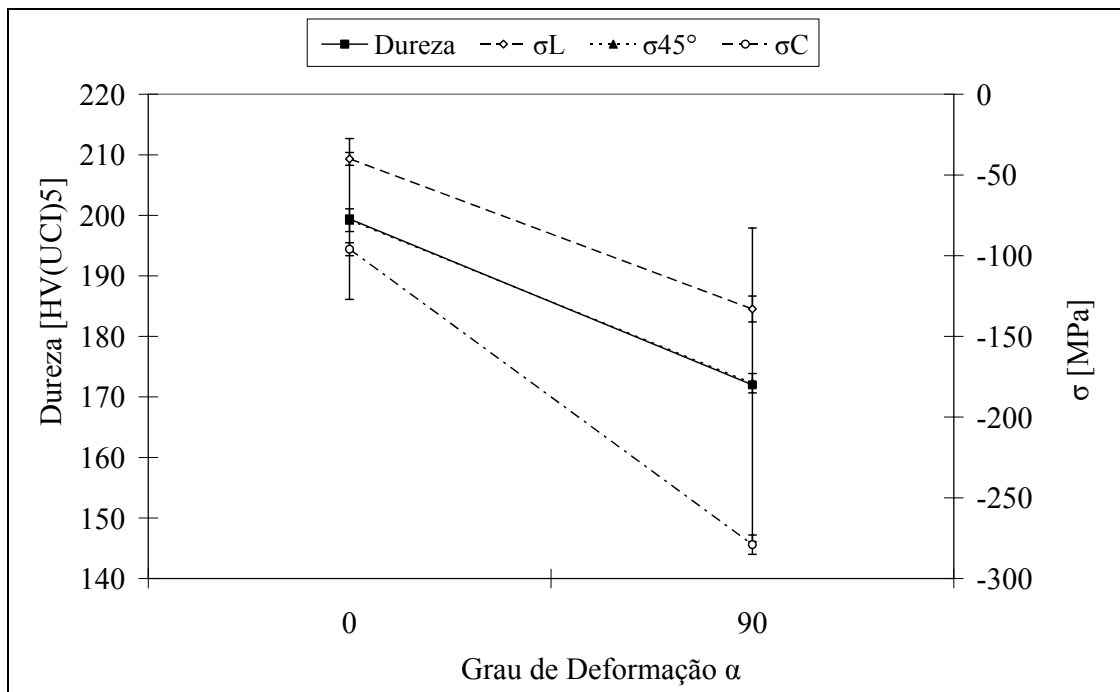


Figura 4.26 – TR e dureza superficial - Corpo de prova 09.

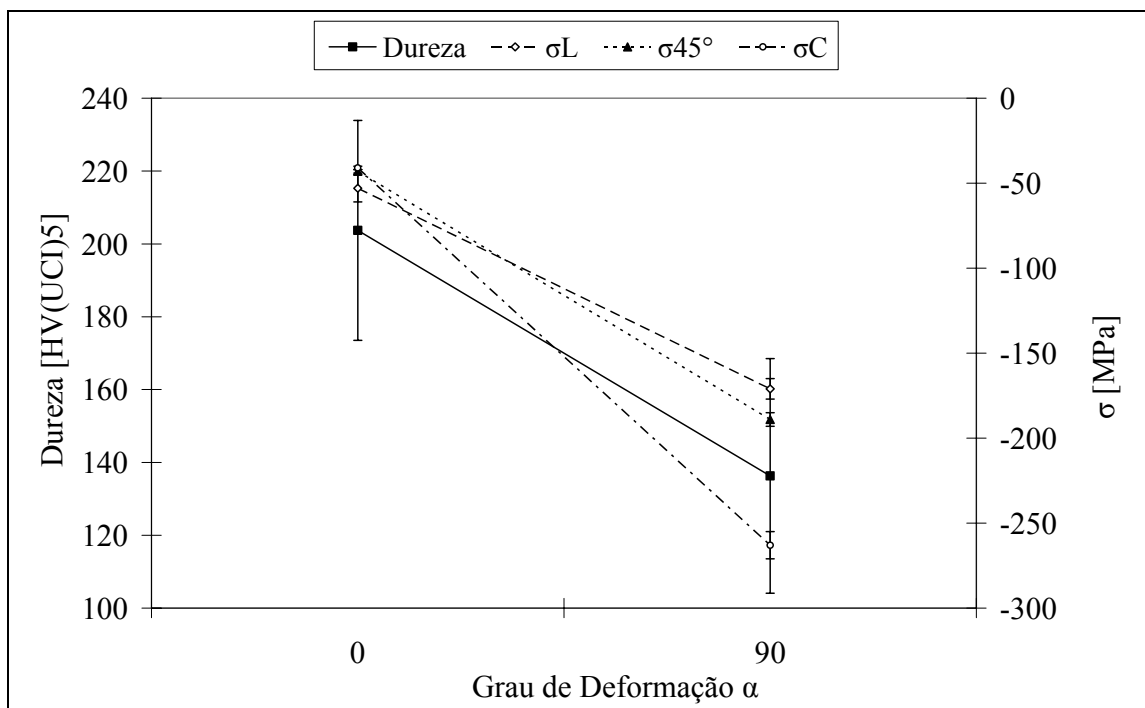


Figura 4.27 – TR e dureza superficial - Corpo de prova 10.

Os corpos de prova 8, 11 e 12 foram avaliados na condição sem deformação plástica ( $\alpha = 0^\circ$ ) e, em seguida, submetidos ao grau I de deformação plástica ( $\alpha = 135^\circ$ ). Em seguida foram feitos ensaios de tensometria por difração de raios-X e dureza UCI nas duas condições e os resultados estão apresentados de forma integrada na Figura 4.28, Figura 4.29 e Figura 4.30.

Analizando os resultados apresentados, observa-se que existem três diferentes patamares de tensões residuais nos corpos de prova em  $\alpha = 135^\circ$ , ou seja, TR longitudinal  $<$  TR a  $45^\circ <$  TR circunferencial. A magnitude média da TR na direção longitudinal é -47,7MPa em  $\alpha = 0^\circ$  e -156,3MPa em  $\alpha = 135^\circ$  (variação correspondente a 22 % do SMYS do material), de -44,3MPa em  $\alpha = 0^\circ$  e -198MPa na direção a  $45^\circ$  (32% do SMYS do material), e na direção circunferencial é -96,3MPa em  $\alpha = 0^\circ$  e -302MPa em  $\alpha = 135^\circ$  (43% do SMYS do material).

Foi percebida uma significativa redução da média da dureza entre os níveis de deformação, de 208,7HV(UCI)5 em  $\alpha = 0^\circ$  para 156,2HV(UCI)5 em  $\alpha = 135^\circ$ , correspondente a 25% de redução.

Da mesma forma que ocorreu na condição de deformação plástica a frio de 0 a  $90^\circ$ , neste caso, ou seja, de  $0^\circ$  a  $135^\circ$ , elevados percentuais foram observados na variação das tensões residuais compressivas, principalmente na direção circunferencial (43% do SMYS), e de redução da dureza (25%) o que pode ser atribuído ao amolecimento permanente provocado pelo efeito *Bauschinger*, devido à severidade da deformação plástica no material. Este comportamento está coerente com aquele observado por ABEL & MUIR (1972) e WANG & GONG (2008).

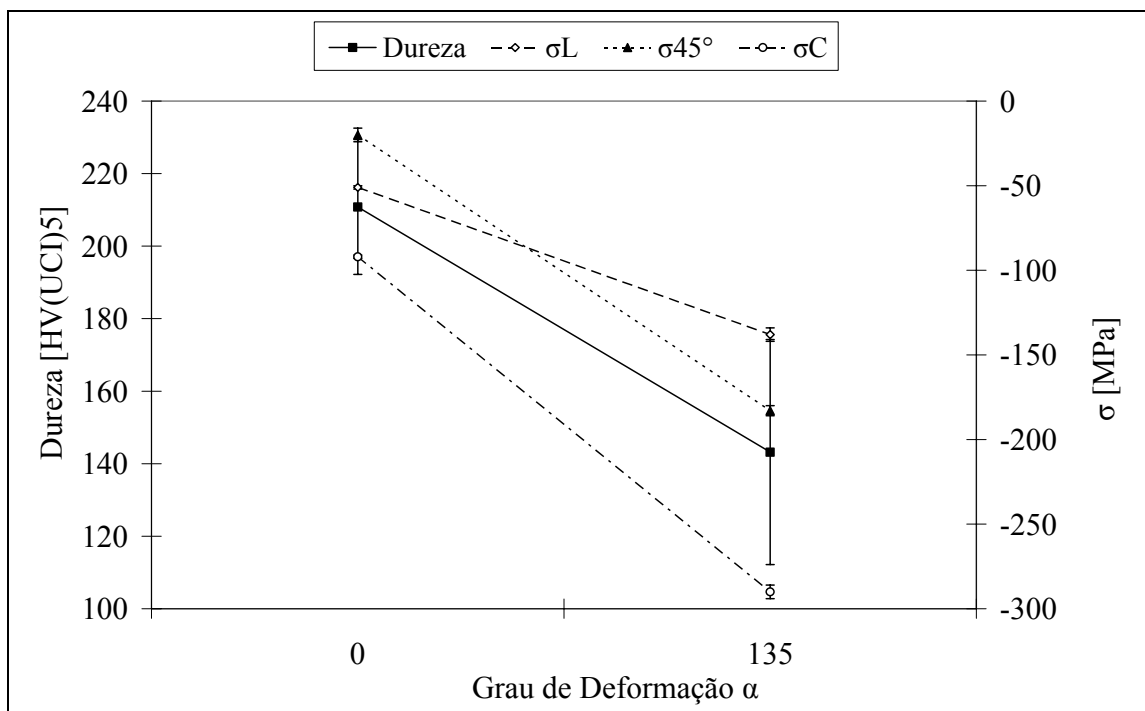


Figura 4.28 – TR e dureza superficial - Corpo de prova 08.

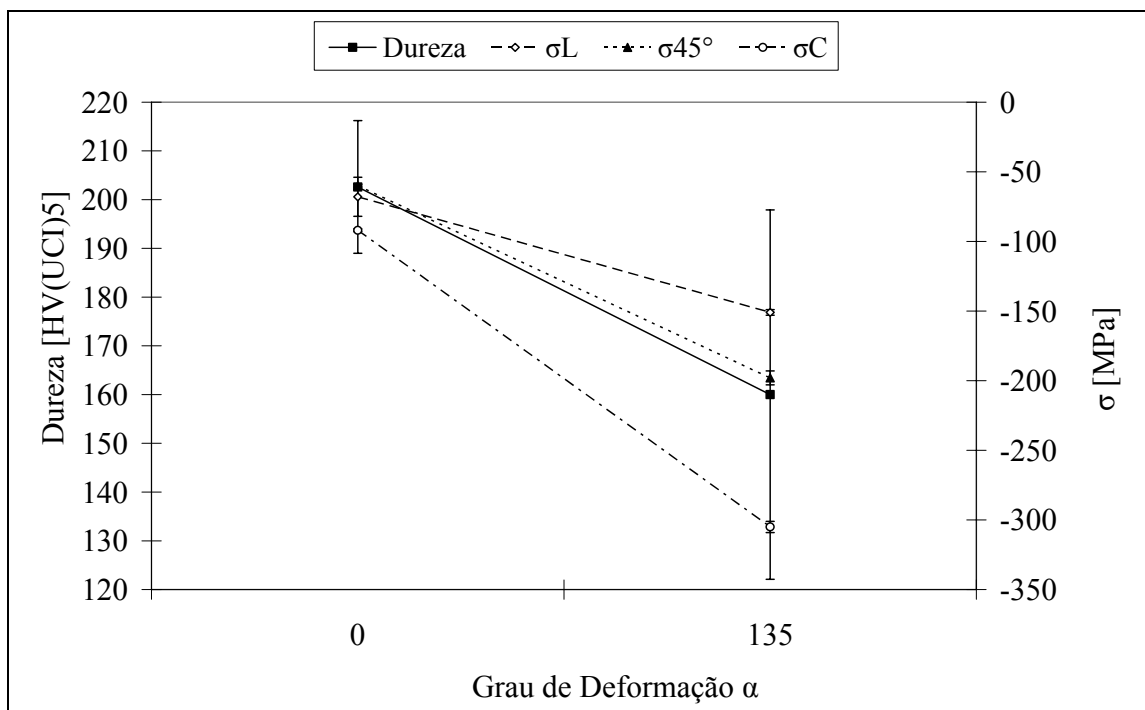


Figura 4.29 – TR e dureza superficial - Corpo de prova 11.

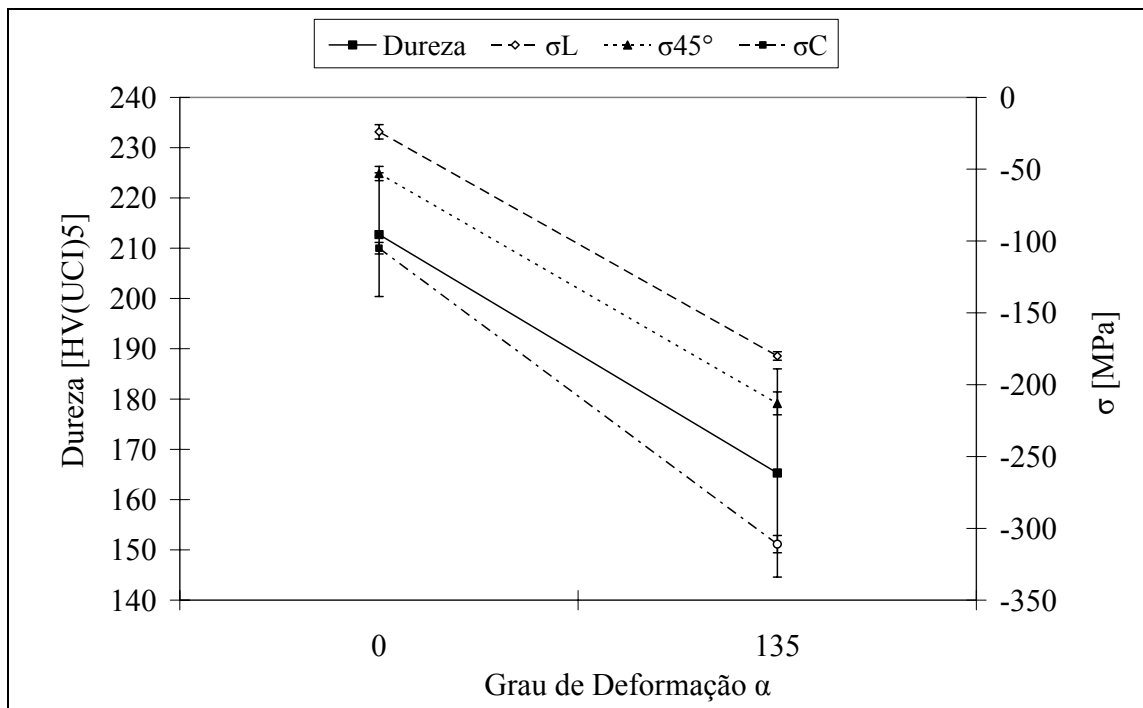


Figura 4.30 – TR e dureza superficial - Corpo de prova 12.

Os corpos de prova 5, 6, 13 e 14 foram avaliados na condição sem deformação plástica ( $\alpha = 0^\circ$ ) e, em seguida, submetidos ao grau I de deformação plástica ( $\alpha = 160^\circ$ ). Em seguida foram feitos ensaios de tensometria por difração de raios-X e dureza UCI nas duas condições e os resultados estão apresentados de forma integrada na Figura 4.31, Figura 4.32, Figura 4.33 e Figura 4.34.

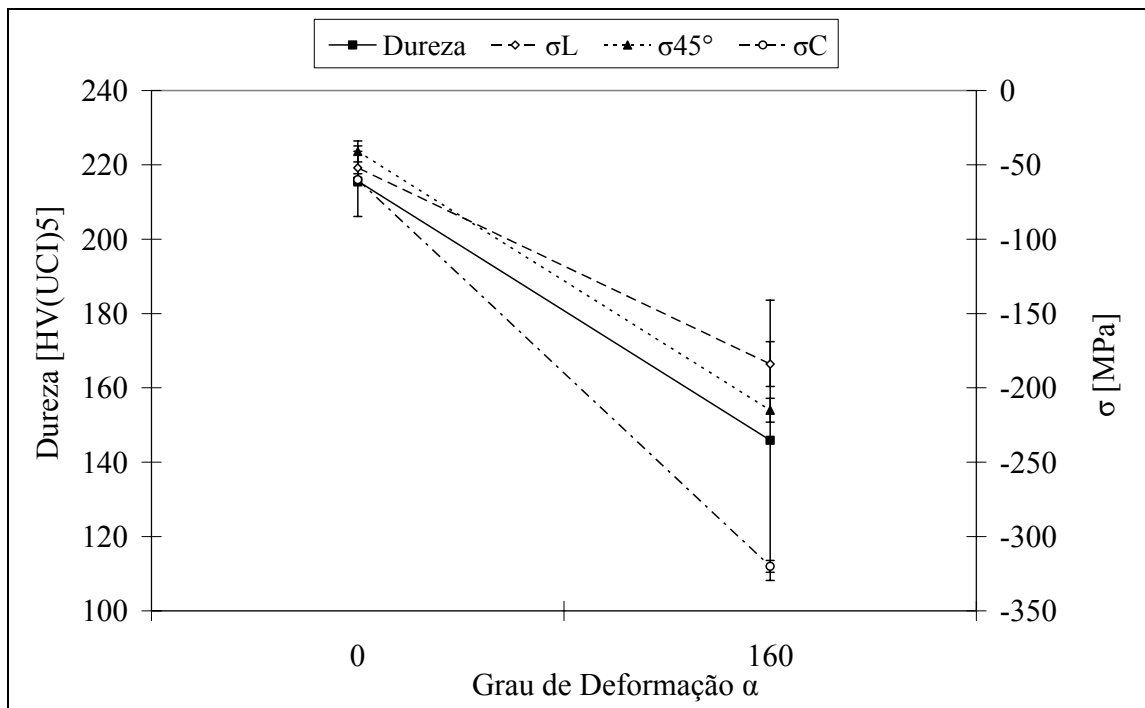


Figura 4.31 – TR e dureza superficial - Corpo de prova 05.

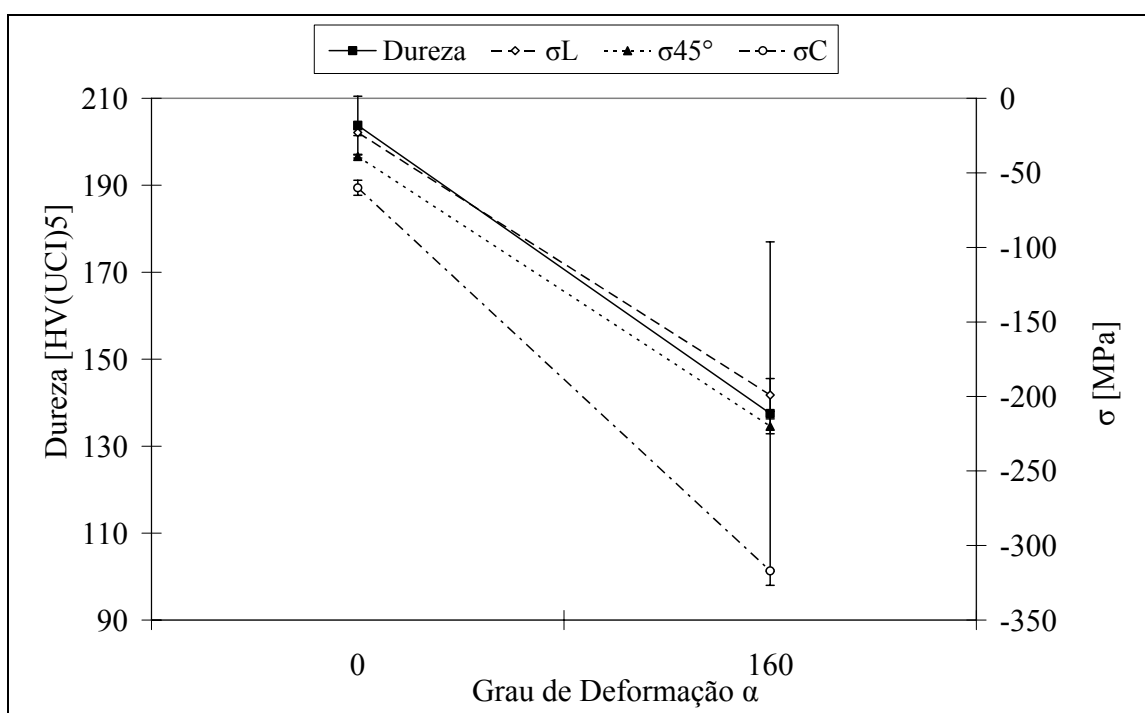


Figura 4.32 – TR e dureza superficial - Corpo de prova 06.

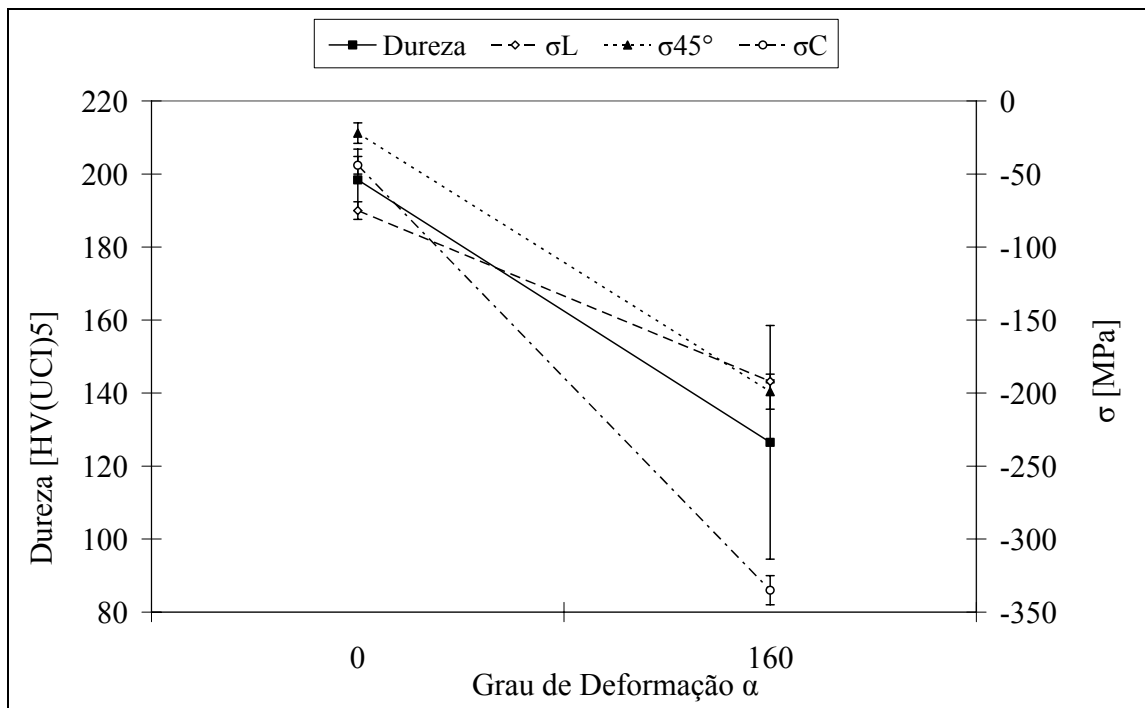


Figura 4.33 – TR e dureza superficial - Corpo de prova 13.

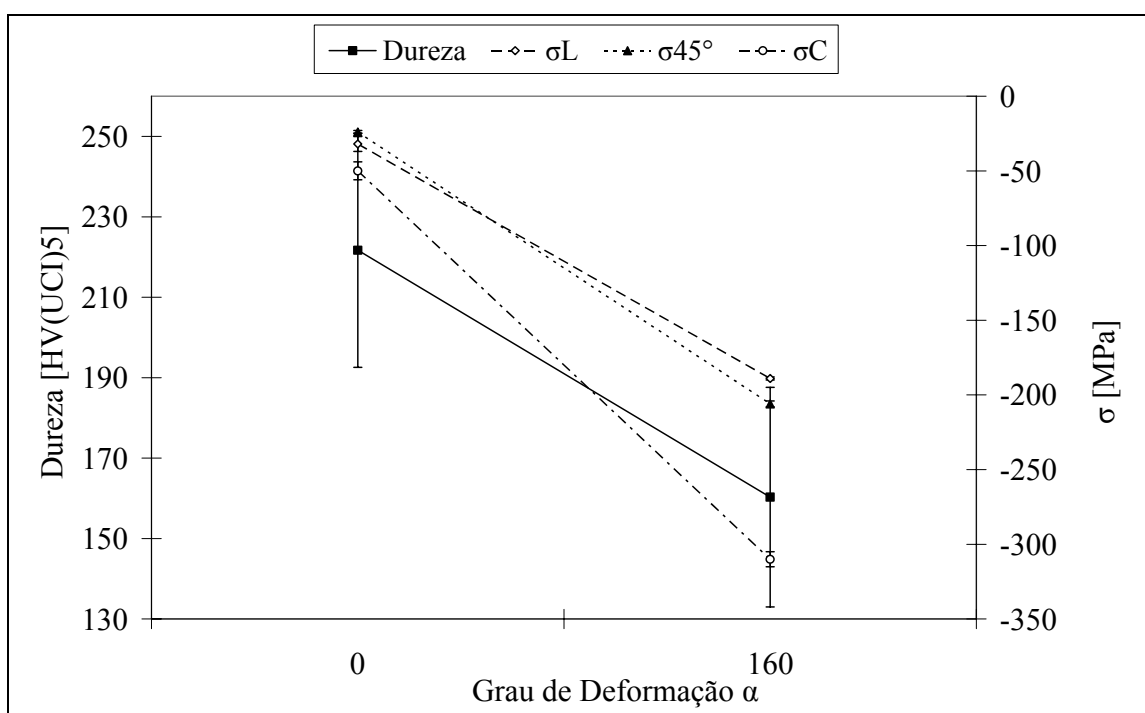


Figura 4.34 – TR e dureza superficial - Corpo de prova 14.

Analisando os resultados apresentados, observa-se que existem três diferentes patamares de tensões residuais nos corpos de prova em  $\alpha = 160^\circ$ , ou seja, TR longitudinal < TR a  $45^\circ$  < TR circunferencial. A magnitude média da TR na direção longitudinal é -45,5MPa em  $\alpha = 0^\circ$  e -191MPa em  $\alpha = 160^\circ$  (variação de 30% do SMYS do material), na direção a  $45^\circ$  é -31,5MPa em  $\alpha = 0^\circ$  e -210MPa em  $\alpha = 160^\circ$  (37% do SMYS do material) e na direção circunferencial é -53,5MPa em  $\alpha = 0^\circ$  e -320MPa em  $\alpha = 160^\circ$  (55% do SMYS do material). Houve ainda redução significativa da média da dureza entre os níveis de deformação, de 210HV(UCI)5 em  $\alpha = 0^\circ$  para 142,6HV(UCI)5 em  $\alpha = 160^\circ$ , correspondente a 32% de redução.

Com relação aos patamares observados em todos os graus de deformação plástica analisados, é possível perceber que a relação de magnitudes das tensões “TR longitudinal < TR a  $45^\circ$  < TR circunferencial” foi um comportamento recorrente em todos eles. A provável explicação deve-se ao fato do histórico de deformação presente nas regiões avaliadas dos corpos de prova, que foram retirados longitudinalmente de tubos fabricados pelo processo U-O-E, onde as tensões na direção circunferencial já haviam sido modificadas pelo efeito *Bauschinger* durante a fabricação do tubo, e, conseqüentemente, são mais elevadas do que nas outras direções analisadas. Este comportamento está perfeitamente de acordo com o observado por GAU & KINZEL (2001).

Observando as Figuras 4.25 a 4.34, nos ensaios de dobramento de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ ,  $90^\circ$  a  $135^\circ$  e  $135^\circ$  a  $160^\circ$ , nota-se uma relação entre a dureza e a TR. Quando a deformação plástica foi imposta no material depreende-se uma redução no patamar da dureza (amolecimento) e um aumento da TR em compressão. Pequenas variações foram

observadas na média da dureza nos corpos de prova na condição de 90°, 135° e 160°, que possivelmente tem relação com um patamar de saturação de amolecimento do material.

Observa-se que a dureza superficial sofreu pequenas variações após os ensaios de grau de deformação I, II e III e apresentou-se de forma estável. Possivelmente este comportamento não aconteceria se a dureza fosse avaliada através da espessura do material.

#### **4.2 - Ensaios de avaliação das tensões subsuperficiais**

Uma análise do comportamento das tensões residuais, (longitudinais, a 45° e circunferenciais) ao longo da espessura, foi realizada em quatro condições de corpos de prova: sem deformação plástica e após severos dobramentos,  $\alpha = 90^\circ$ ,  $\alpha = 135^\circ$  e  $\alpha = 160^\circ$ , respectivamente, pela técnica da remoção de camadas, através de polimento eletrolítico e medição das TR por difração de raios-X. Os polimentos foram realizados até um pouco além da profundidade de inversão da natureza das tensões (compressiva para trativa).

No corpo de prova 15, sem deformação plástica, foi possível observar as tensões residuais oriundas do histórico de deformação do processo de fabricação do tubo. Os perfis de variação das tensões residuais ao longo da espessura também foram avaliados no corpo de prova 10, com grau I de deformação plástica ( $\alpha = 90^\circ$ ), no corpo de prova 12, com grau II de deformação plástica ( $\alpha = 135^\circ$ ) e no corpo de prova 14, com grau III de deformação plástica ( $\alpha = 160^\circ$ ), nos quais foi possível observar a interação das tensões residuais

provenientes da fabricação do tubo com as tensões geradas pelos severos ensaios de dobramento.

Em todos os ensaios para análise do perfil de TR através da espessura dos corpos de prova, foi observada, nas regiões estiradas plasticamente, a presença do efeito *Bauschinger*, caracterizado pelas tensões residuais compressivas, desde a superfície até uma determinada extensão da espessura. Este comportamento é fundamentado por ABEL & MUIR (1972), KOSTRYZHEV *et al.* (2007) e KOSTRYZHEV (2009), onde é apresentado o surgimento de tensões reversas (*back stresses*), no sentido oposto ao carregamento externo do componente que está sendo deformado plasticamente a frio, devido à movimentação das discordâncias, que interagem com outros defeitos da estrutura cristalina do material (outras discordâncias, contornos de grão e precipitados).

#### **4.2.1 - Ensaios de perfis de profundidade da TR em corpos de prova antes do dobramento ( $\alpha = 0^\circ$ )**

A Figura 4.35 apresenta os perfis das tensões residuais obtidos no corpo de prova 15, sem deformação plástica ( $\alpha = 0^\circ$ ). O polimento eletrolítico gradativo foi executado até a profundidade de 1,6mm.

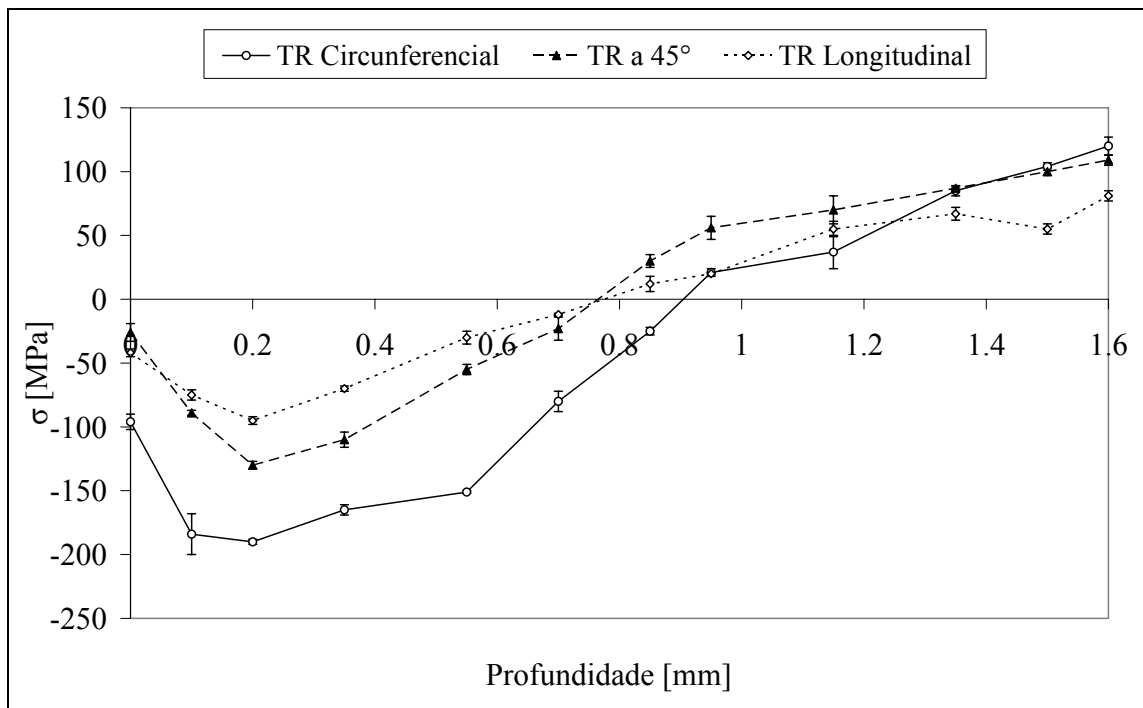


Figura 4.35 – Perfil de profundidade das tensões residuais,  $\alpha = 0^\circ$ .

Observando o perfil das tensões residuais na direção longitudinal, na Figura 4.35, são de magnitude moderada, variando de 2 a 20% do SMYS do material, com valor máximo trativo de 81MPa e compressivo de -95MPa. As tensões residuais da superfície até 0,75mm da espessura apresentaram-se compressivas, com média igual a -60MPa, e a partir de 0,75mm até 1,6mm trativas, com média igual a 48MPa.

As tensões residuais na direção a  $45^\circ$ , cujo perfil está mostrado na Figura 4.35, apresentam valores de magnitude moderada, variando de 5 a 29% do SMYS do material, com valor máximo trativo de 109MPa e compressivo de -130MPa. As tensões residuais a partir da superfície até a profundidade de 0,75mm ao longo da espessura apresentaram-se compressivas, com média igual a -72MPa e a partir de 0,75mm até 1,6mm trativas, com média igual a 75MPa.

O perfil das tensões residuais na direção circunferencial, mostrado Figura 4.35, apresentam valores de magnitude moderada, variando de 4 a 39% do SMYS do material, com valor máximo trativo de 120MPa e compressivo de -190MPa. As tensões residuais da superfície até 0,9mm da espessura apresentaram-se compressivas, com média igual a -127MPa, e a partir de 0,9mm até 1,6mm trativas, com média igual a 73MPa.

Da análise do nível de alcance e das magnitudes das TR compressivas ao longo da espessura a  $\alpha = 0^\circ$  depreende-se que na direção longitudinal e a  $45^\circ$  elas apresentam um perfil bastante semelhante onde a inversão do estado compressivo para o trativo ocorreu a 0,75mm, enquanto que na direção circunferencial a extensão do campo compressivo ao longo da espessura é de maior magnitude e comprimento (0,9mm), esta diferença pode ser atribuída a uma maior magnitude do Efeito *Bauschinger* nesta direção, já que estas tensões estão sobre a influência das tensões residuais geradas processo de fabricação U-O-E do tubo.

#### **4.2.2 - Ensaios de perfis de profundidade de TR em corpos de prova com grau de deformação I ( $\alpha = 90^\circ$ )**

A Figura 4.36 apresenta os perfis das tensões residuais obtidos no corpo de prova 10, com grau I de deformação plástica ( $\alpha = 90^\circ$ ). Para avaliação das tensões residuais através da espessura foi executado polimento eletrolítico gradativo até 4,0mm da espessura.

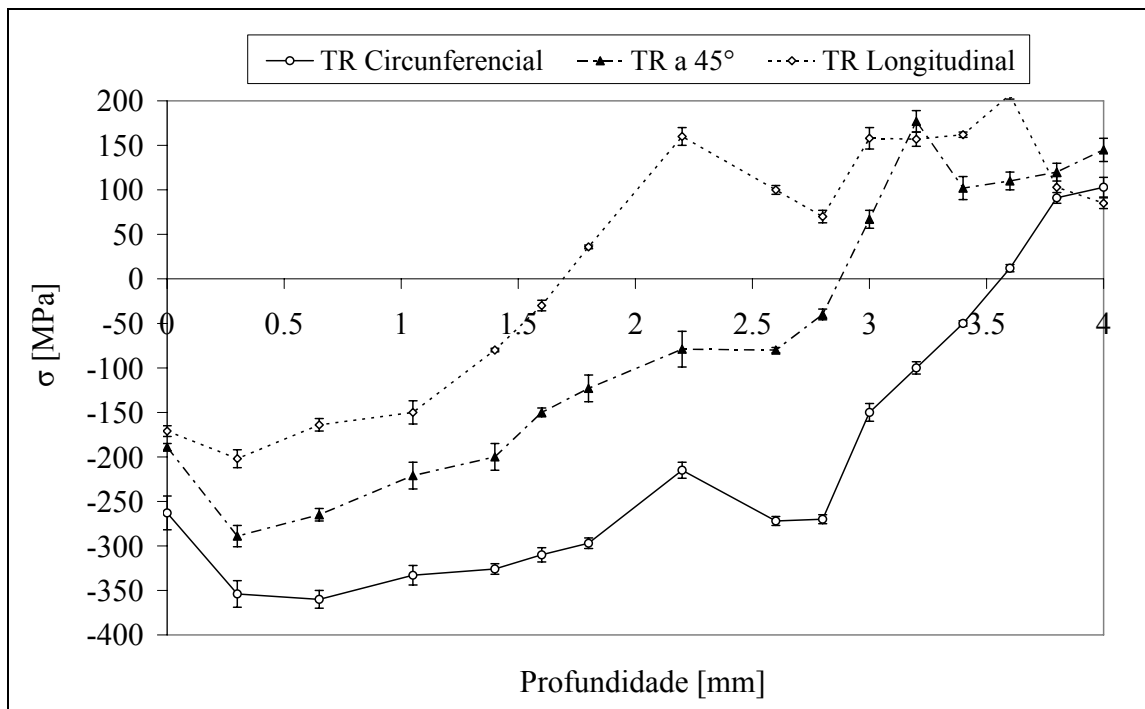


Figura 4.36 – Perfil de profundidade das tensões residuais,  $\alpha = 90^\circ$ .

O perfil das tensões residuais na direção longitudinal, mostrado Figura 4.36, apresenta valores de magnitude significativa, variando de 6 a 43% do SMYS do material, com valor máximo trativo de 207MPa e compressivo de -202MPa. As tensões residuais da superfície até 1,7mm da espessura apresentaram-se compressivas, com média igual a -133MPa, e a partir de 1,7mm até 4,0mm trativas, com média igual a 124MPa.

A Figura 4.36 apresenta o perfil das tensões residuais na direção a  $45^\circ$ , com valores de magnitude significativa, variando de 8 a 60% do SMYS do material, com valor máximo trativo de 177MPa e compressivo de -289MPa. As tensões residuais permaneceram compressivas desde a superfície até a profundidade de 2,85mm, com média igual a

-164MPa, e a partir de 2,85mm foram de natureza trativa até a profundidade de 4,0mm, com média igual a 120MPa.

O perfil das tensões residuais na direção circunferencial, mostrado na Figura 4.36, apresenta valores de magnitude significativa, variando de 2 a 75% do SMYS do material, com valor máximo trativo de 103MPa e compressivo de -360MPa. As tensões residuais da superfície até 3,60mm da espessura apresentaram-se compressivas, com média igual a -254MPa, e a partir de 3,60mm até 4,0mm trativas, com média igual a 69MPa.

Analisando os perfis em profundidade obtidos na condição de deformação plástica equivalente a  $\alpha = 90^\circ$  percebe-se claramente a diferença entre estes perfis e aqueles oriundos de tratamento superficial de *shot peening* (Figuras 2.2, 2.3 e 2.4), pois apesar dos perfis apresentarem tensões mais elevadas nas camadas subsuperficiais, semelhantes aos típicos perfis de *shot peening*, porém o alcance da extensão das tensões residuais compressivas é superior a aqueles apresentados por KANDIL *et al.* (2001) e KRITZLER & WÜBBENHORST (2008). O comportamento das tensões residuais compressivas ao longo da profundidade analisada mostrou-se diferenciado nas três direções, passando para natureza trativa a partir de 1,7mm (na direção longitudinal), 2,9mm (direção a  $45^\circ$ ) e 3,6mm na direção circunferencial. Este comportamento coincide com os três distintos patamares de tensões residuais experimentalmente neste trabalho (Longitudinais < a  $45^\circ$  < Circunferenciais) sendo possível depreender ainda, que os perfis obtidos experimentalmente são aderentes aos apresentados por WANG & GONG (2008), onde componentes estirados plasticamente em tração apresentam tensões residuais superficiais compressivas de magnitude compatível com o limite elástico do material e evoluem para

um estado trativo de tensão nas camadas subsuperficiais ao longo da espessura. Estes diferentes patamares de TR e de alcance das TR compressivas ao longo da espessura, possivelmente podem estar relacionados com o nível de perda das propriedades mecânicas do material, devido ao efeito *Bauschinger*. Tais alterações nas propriedades mecânicas em aços ARBL de dutos foram comprovadas por TOYODA *et al.* (2000), HIROYUKI *et al.* (2003), FAKUDA *et al.* (2003), JIA *et al.* (2004) e WILLIAMS (2007).

#### 4.2.3 - Ensaios de perfis de profundidade de TR em corpos de prova com grau de deformação II ( $\alpha = 135^\circ$ )

A Figura 4.37 apresenta os perfis das tensões residuais obtidas no corpo de prova 12, com grau II de deformação plástica ( $\alpha = 135^\circ$ ). O polimento eletrolítico gradativo foi executado até a profundidade de 3,65mm ao longo da espessura.

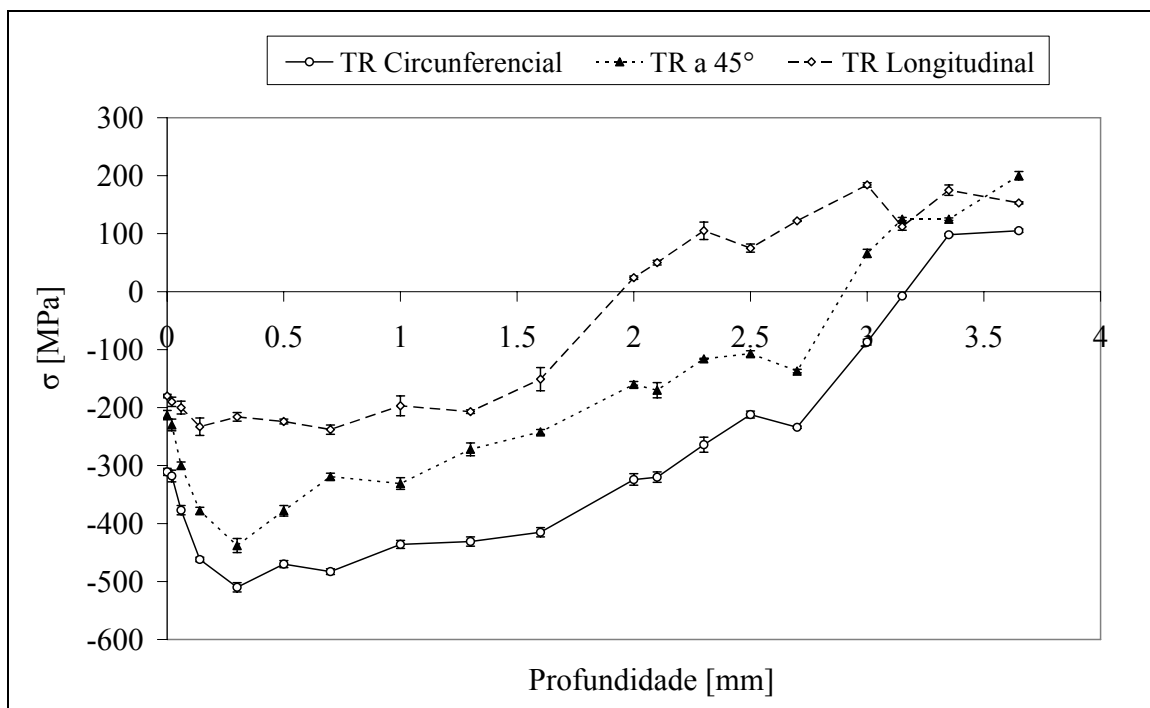


Figura 4.37 – Perfil de profundidade das tensões residuais,  $\alpha = 135^\circ$ .

O perfil das tensões residuais na direção longitudinal, mostrado Figura 4.37, apresenta valores de magnitude significativa, variando de 5 a 49% do SMYS do material, com valor máximo trativo de 184MPa e compressivo de -238MPa. As tensões residuais avaliadas da superfície até a profundidade de 1,9mm ao longo da espessura apresentaram-se compressivas, com média igual a -204MPa, e a partir de 1,9mm até 3,65mm trativas, com média igual a 111MPa.

As tensões residuais na direção a 45°, cujo perfil está ilustrado na Figura 4.37, apresentam valores de magnitude significativa, variando de 14 a 91% do SMYS do material, com valor máximo trativo de 200MPa e compressivo de -438MPa. As tensões residuais a partir da superfície até 2,9mm de profundidade ao longo da espessura apresentaram-se compressivas, com média igual a -253MPa, e a partir de 2,9mm até 3,65mm trativas, com média igual a 129MPa.

O perfil das tensões residuais na direção circunferencial, mostrado Figura 4.37, apresenta valores de magnitude significativa, variando de 2 a 106% do SMYS do material, com valor máximo trativo de 105MPa e compressivo -510MPa. As tensões residuais da superfície até 3,15mm da espessura apresentaram-se compressivas, com média igual a -333MPa e a partir de 3,15mm até 3,65mm de profundidade foram trativas, com média igual a 102MPa.

Os perfis em profundidade das TR nas direções a 45° e circunferenciais são semelhantes entre si e apresentam semelhante comportamento em relação à extensão das

camadas em compressão. Outra coincidência pode ser observada na grandeza das tensões compressivas analisadas nestas duas direções. Na direção a 45° foram encontradas TR da ordem de -213MPa até -438MPa e na direção circunferencial as TR variaram de -311 até -510MPa. O que caracteriza a provável presença do efeito *Bauschinger* associado às elevadas deformações plásticas nestas camadas. Entretanto, em comparação com o perfil das TR longitudinais, este apresentou menor extensão das camadas compressivas e menores magnitudes de tensão (de -180MPa a -238MPa), o que era previsto, devido ao menor histórico de deformação sofrido. Provavelmente houve uma maior redução das propriedades mecânicas do material oriundas da presença do efeito *Bauschinger* na direção circunferencial e a 45° do que na direção longitudinal.

#### **4.2.4 - Ensaios de perfis de profundidade de TR em corpos de prova com grau de deformação II ( $\alpha = 160^\circ$ )**

O corpo de prova 14 foi submetido ao grau III de deformação plástica ( $\alpha = 160^\circ$ ), sendo a mais severa das condições de deformação. A Figura 4.38 apresenta os perfis das tensões residuais obtidos através da espessura (3,8mm de profundidade) por polimento eletrolítico gradativo e subsequente medição das TR por difração de raios-X.

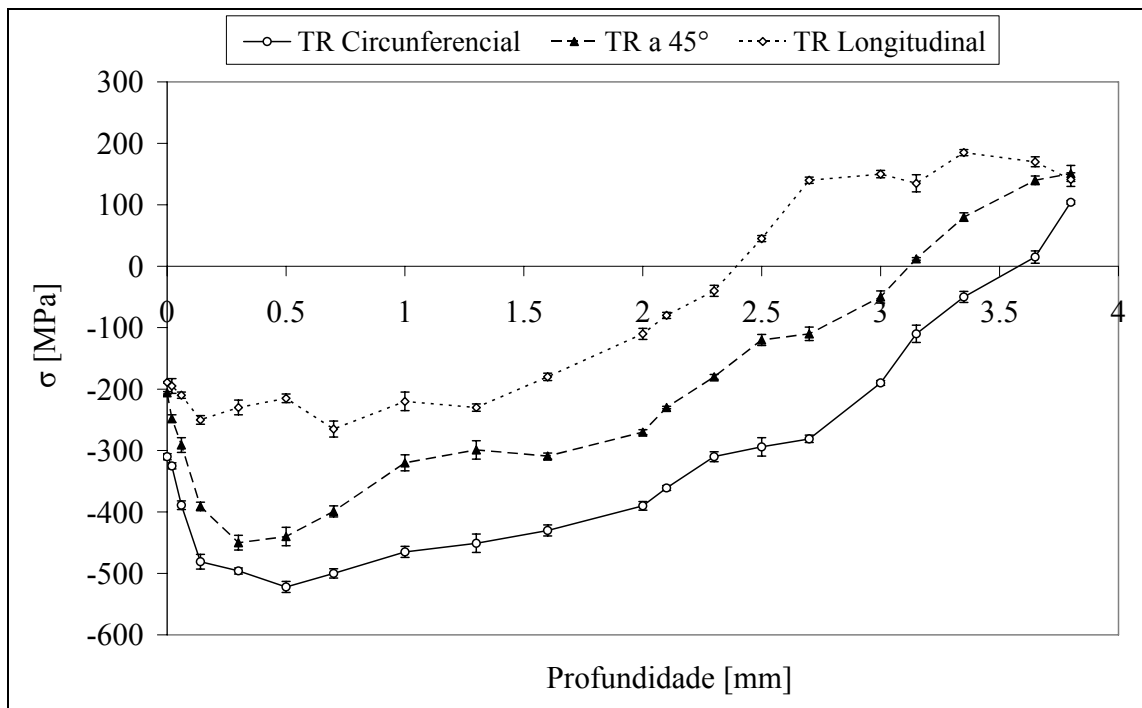


Figura 4.38 – Perfil de profundidade da TR longitudinal ( $\sigma_L$ ),  $\alpha = 160^\circ$ .

O perfil das tensões residuais na direção longitudinal, mostrado Figura 4.38, apresenta valores de magnitude significativa, variando de 8 a 55% do SMYS do material, com valor máximo trativo de 185MPa e compressivo de -265MPa. As tensões residuais da superfície até a profundidade de 2,4mm através da espessura apresentaram-se compressivas, com média igual a -186 MPa, e a partir de 2,4mm até 3,8mm trativas, com média igual a 138MPa.

As tensões residuais na direção a  $45^\circ$ , cujo perfil está apresentado na Figura 4.38, possuem valores de magnitude significativa, variando de 2 a 93% do SMYS do material, com valor máximo trativo de 151MPa e compressivo de -450MPa. As tensões residuais compressivas, a partir da superfície até a profundidade de 3,1mm, tiveram média igual a -270MPa, e a partir de 3,1mm até 3,8mm foram trativas, com média igual a 96MPa.

Na Figura 4.38 está apresentado o perfil das tensões residuais na direção circunferencial, variando de 3 a 108% do SMYS do material, com valor máximo trativo de 104MPa e compressivo de -522MPa. Neste corpo de prova a profundidade das camadas subsuperficiais compressivas atingiu a maior extensão e magnitude entre todos os corpos de analisados. As tensões compressivas permaneceram muito elevadas (280MPa) até a profundidade de 2,7mm.

Analisando os perfis obtidos com grau de deformação plástica III,  $\alpha = 160^\circ$ , é possível perceber que com o aumento do grau de severidade do ensaio, as tensões residuais geradas pelo efeito *Bauschinger* associado às deformações prévias do histórico de fabricação do tubo ultrapassam o limite de escoamento do material e chegam a atingir mais de 50% da espessura do tubo em profundidade, possivelmente a magnitude das tensões residuais compressivas geradas e a extensão ao longo da espessura estão diretamente relacionadas com a redução das propriedades mecânicas dos materiais apresentadas por TOYODA *et al.* (2000), HIROYUKI *et al.* (2003), FAKUDA *et al.* (2003), JIA *et al.* (2004) e WILLIAMS (2007).

A dureza média dos corpos de prova com grau de deformação plástica equivalente a  $\alpha = 160^\circ$  é 147HV(UCI)5, o que comprova o amolecimento permanente causado pelo Efeito *Bauschinger*, de acordo com AMEND & CLARK (2009) é a dureza de um duto com limite de escoamento de 276MPa. Segundo ABEL & MUIR (1972), KOSTRYZHEV *et al.* (2007) e KOSTRYZHEV (2009) outra característica do Efeito *Bauschinger* são as tensões reversas (*back stresses*) que surgem no material no sentido oposto ao carregamento externo no componente estirado plasticamente. Este fenômeno é claramente observado em todos os perfis de profundidade obtidos nos ensaios de laboratório, que no caso dos ensaios

com  $\alpha = 160^\circ$ , na direção longitudinal atingiu 38% da espessura e na direção circunferencial atingiu 57% da espessura. Arbitrando que a redução na dureza é constante na região dominada pelo efeito *Bauschinger*, é possível estimar a redução do limite de escoamento remanescente no material. A Figura 4.39 apresenta esquematicamente as considerações para esta estimativa, feita para os limites de escoamento na direção longitudinal e circunferencial dos corpos de prova com deformação plástica equivalente a  $\alpha = 160^\circ$ , onde  $t$  é a espessura (6,35mm),  $x$  é a extensão de alcance das tensões compressivas em mm, “A” é a região dominada pelo efeito *Bauschinger* e “B” região preservada do componente.

Considerando a dureza de 147HV(UCI)5 na região dominada pelo Efeito *Bauschinger*, que equivale a 276MPa de limite de escoamento segundo AMEND & CLARK (2009), a extensão de alcance do efeito *Bauschinger* na direção longitudinal é 2,4mm e na direção circunferencial é 3,6mm e havendo proporcionalidade do limite de escoamento do material nas regiões “A” (276MPa) e “B” (483MPa), a redução do limite de escoamento na direção longitudinal corresponde a 16% (405MPa) e na direção circunferencial a 24% (366MPa).

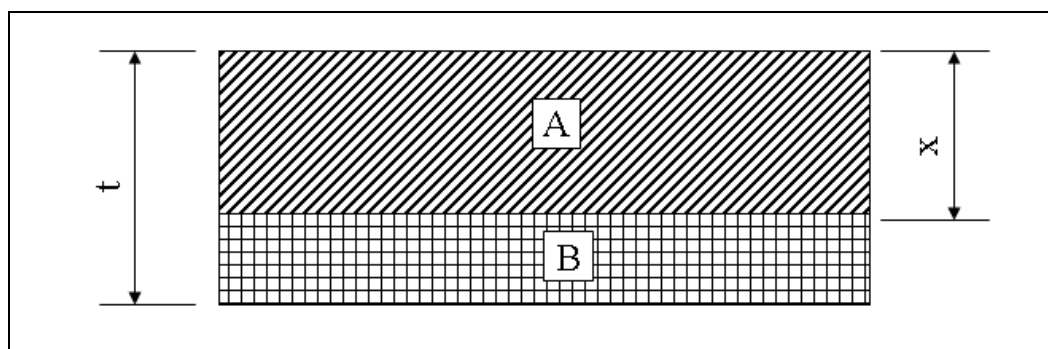


Figura 4.39 – Representação da região afetada pelo efeito *Bauschinger*. (A) região dominada, (B) região preservada, (t) espessura e (x) alcance.

Estes percentuais de redução do limite de escoamento estimados, apresentam pouca variação em relação aos percentuais de redução de limite de escoamento, atribuídos ao efeito *Bauschinger*, obtidos por FUKUDA *et al.* (2003), que após ensaios de curvamento a frio em tubos pressurizados, encontrou uma redução de 6% para o tubo de aço API 5L X60 e 27% para o tubo de aço API 5L X80 e o percentual de redução de 5,2% obtido por HIROYUKI *et al.* (2003), que estudou o comportamento do aço API 5L X80 em condições de sobrecarga por movimentação do solo em tubos pressurizados.

Um fator importante não considerado nesta estimativa é que provavelmente a magnitude da TR em compressão, ao longo da espessura, em componentes estirados plasticamente tem uma relação direta com a redução das propriedades mecânicas do material.

#### **4.3 - Avaliação das tensões subsuperficiais em gasoduto em operação**

A medição das tensões subsuperficiais foi executada em um trecho do Gasoduto Bolívia-Brasil de 20 polegadas de diâmetro e 0,281 polegadas de espessura, que sofreu deslocamento permanente pela ação do solo, em uma extensão de 150m e uma flecha máxima de 3,50m. O local de análises de tensões para inspeção foi determinada de acordo com a metodologia proposta por PURVIS & HÜWENER (2009). Baseado nos registros das inspeções por pig instrumentado (IMU) de 2007 e 2009, o local de maior deslocamento abrange a junta soldada onde foram realizadas as medições (Figura 4.40) e a região de maior deformação corresponde à geratriz superior do gasoduto (TBG, 2010).



Figura 4.40 – Região analisada por tensometria de difração de raios-X. (FONTE: TBG, 2010).

A Figura 4.41 apresenta o croqui dos pontos onde foram realizados os ensaios, os pontos 1, 2, 3 e 4 mostrados na figura correspondem à região de maior deformação e a Tabela 4.14 mostra os resultados das medições das tensões na direção longitudinal e circunferencial em cada ponto analisado. A região ensaiada por tensometria foi preparada através de polimento eletrolítico, com solução à base de amônia por 4 minutos e as tensões subsuperficiais foram analisadas na profundidade de  $500\mu\text{m}$  da espessura, a fim de desprezar o efeito de retirada do revestimento (TBG, 2010).

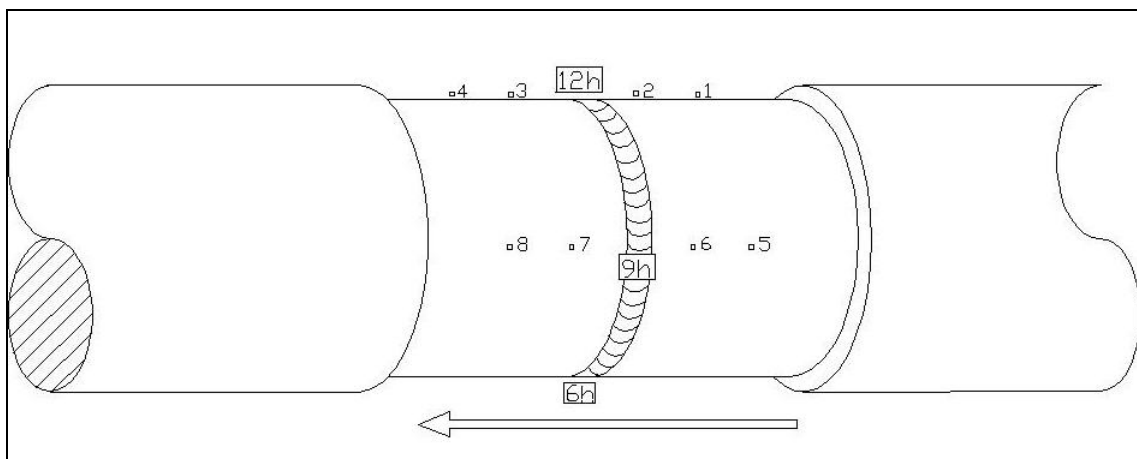


Figura 4.41 – Croqui de identificação dos pontos de ensaio (FONTE: TBG, 2010).

Tabela 4.14 – TR subsuperficiais (FONTE: TBG, 2010).

| <b>Ponto</b> | <b>Posição horária</b> | <b><math>\sigma_L</math> [MPa]</b> | <b><math>\sigma_C</math> [MPa]</b> |
|--------------|------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| <b>1</b>     | 12:00                  | -389                               | -415                               |
| <b>2</b>     | 12:00                  | -380                               | -399                               |
| <b>3</b>     | 12:00                  | -395                               | -400                               |
| <b>4</b>     | 12:00                  | -390                               | -413                               |
| <b>5</b>     | 09:00                  | -270                               | -313                               |
| <b>6</b>     | 09:00                  | -275                               | -330                               |
| <b>7</b>     | 09:00                  | -225                               | -352                               |
| <b>8</b>     | 09:00                  | -232                               | -325                               |
| <b>9</b>     | 03:00                  | -300                               | -340                               |
| <b>10</b>    | 03:00                  | -290                               | -360                               |
| <b>11</b>    | 03:00                  | -295                               | -338                               |
| <b>12</b>    | 03:00                  | -302                               | -351                               |

A Figura 4.42, Figura 4.43 e a Figura 4.44, mostram de forma integrada os resultados obtidos dos ensaios de tensões subsuperficiais.

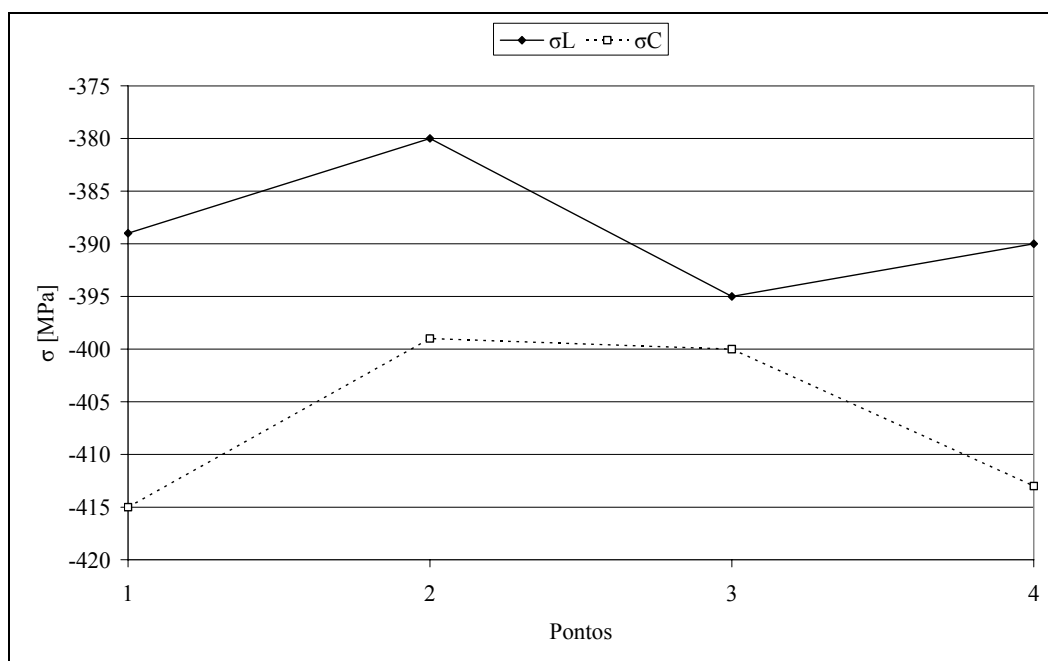


Figura 4.42 – Representação das tensões na geratriz as 12:00 do gasoduto.

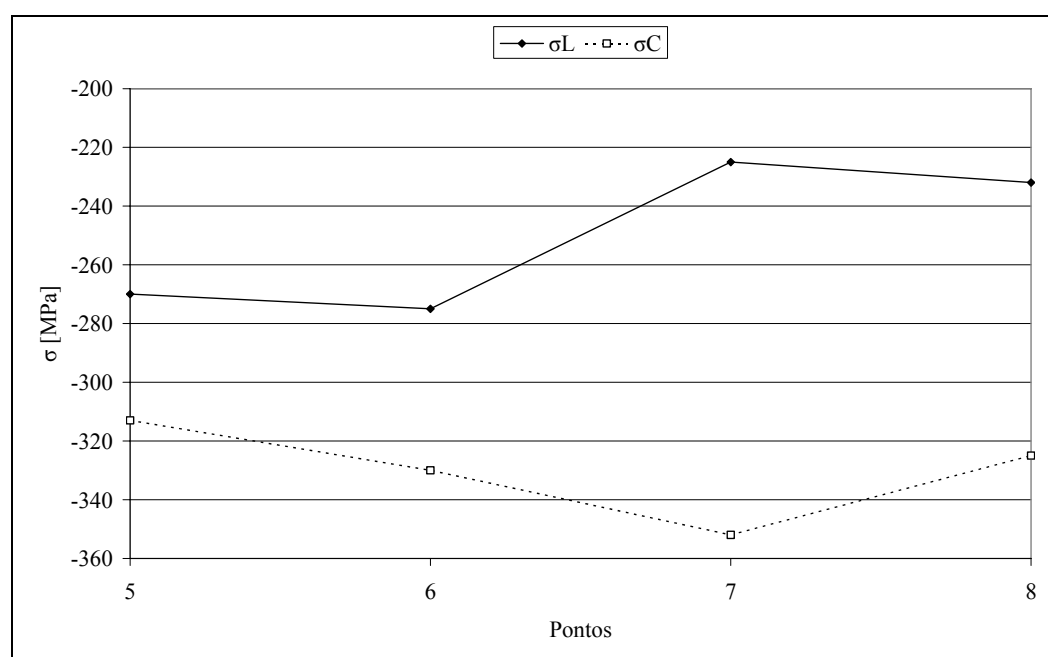


Figura 4.43 – Representação das tensões na geratriz as 09:00 do gasoduto.

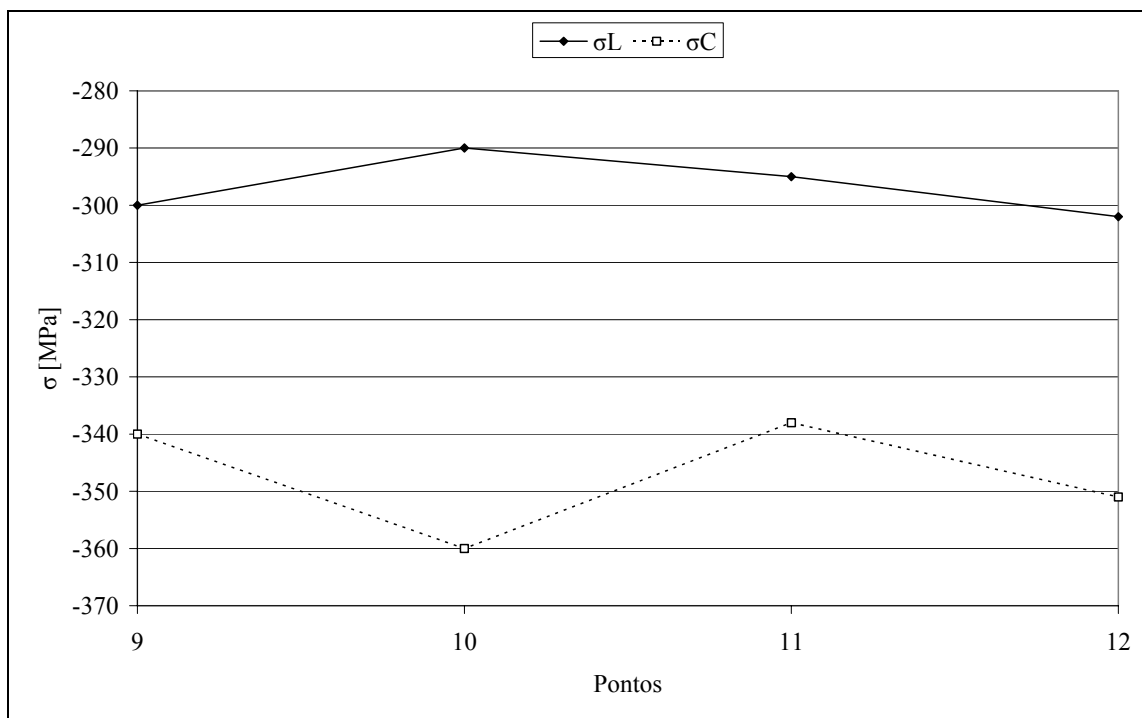


Figura 4.44 – Representação das tensões na geratriz as 03:00 do gasoduto.

Analisando os dados apresentados na Tabela 4.14, observa-se que a média das tensões na direção longitudinal dos pontos da região as 12:00 corresponde a 80% do SMYS igual a -389MPa, as 09:00 corresponde a 52% do SMYS igual a -251MPa e as 03:00 corresponde a 61% do SMYS igual a -297MPa. A média das tensões na direção circunferencial dos pontos da região as 12:00 corresponde a 84% do SMYS igual a -407MPa, as 09:00 corresponde a 68% do SMYS igual a -330MPa e as 03:00 corresponde a 68% do SMYS igual a -347MPa.

Avaliando separadamente as regiões ensaiadas depreende-se que pequenas variações de tensões foram registradas, a média da variação das tensões circunferenciais e

longitudinais na região as 12:00 equivale a 3% do SMYS, as 09:00 a 9% do SMYS e as 03:00 a 4% do SMYS.

Observa-se ainda a distinção entre os diferentes patamares das tensões, em todas as posições horárias analisadas a média das tensões circunferenciais ( $\sigma_C$ ) são maiores que as tensões longitudinais ( $\sigma_L$ ). Na região da geratriz as 12:00,  $\sigma_L$  varia de -380MPa até -395MPa e  $\sigma_C$  varia de -399MPa até -415MPa, na geratriz as 09:00,  $\sigma_L$  varia de -225MPa até -275MPa e  $\sigma_C$  varia de -313MPa até -352MPa e na geratriz as 03:00,  $\sigma_L$  varia de -290MPa até -302MPa e  $\sigma_C$  varia de -338MPa até -360MPa.

As tensões subsuperficiais (500  $\mu$ m), medidas no gasoduto em operação, na região de maior nível de deformação, às 12h, com média de -389MPa na direção longitudinal e de -407MPa na direção circunferencial, apresentam magnitudes compatíveis com as tensões subsuperficiais obtidas em laboratório para os corpos de prova deformados plasticamente a frio. A tensão na direção circunferencial apresentou um valor entre os níveis de deformação  $\alpha = 90^\circ$  e  $\alpha = 135^\circ$ , e a tensão na direção longitudinal acima do grau de deformação  $\alpha = 160^\circ$ , onde provavelmente estas regiões podem estar dominadas pelo efeito *Bauschinger* (ABEL & MUIR, 1972), e podendo apresentar redução de propriedades mecânicas, conforme apresentado por SAGE (1983), TOYODA *et al.* (2000), FAKUDA *et al.* (2003), KOSTRYZHEV *et al.* (2007) e KOSTRYZHEV (2009).

O estado de tensão subsuperficial em compressão apresentado está coerente com histórico de deformação imposto pelo solo e pelas condições de fabricação do tubo que

contempla conformação a frio (U-O-E), estes resultados estão aderentes com o perfil de tensões mostrado por WANG & GONG (2008).

#### 4.4 - Microscopia ótica

A Figura 4.45 e Figura 4.46 mostram os resultados dos ensaios de microscopia ótica, que foram realizados no corpo de prova 15 ( $\alpha = 0^\circ$ ). O aço estudado apresenta uma fina microestrutura constituída de grãos equi-axiais de ferrita-perlita, característica desta classe de aço API 5L X70.

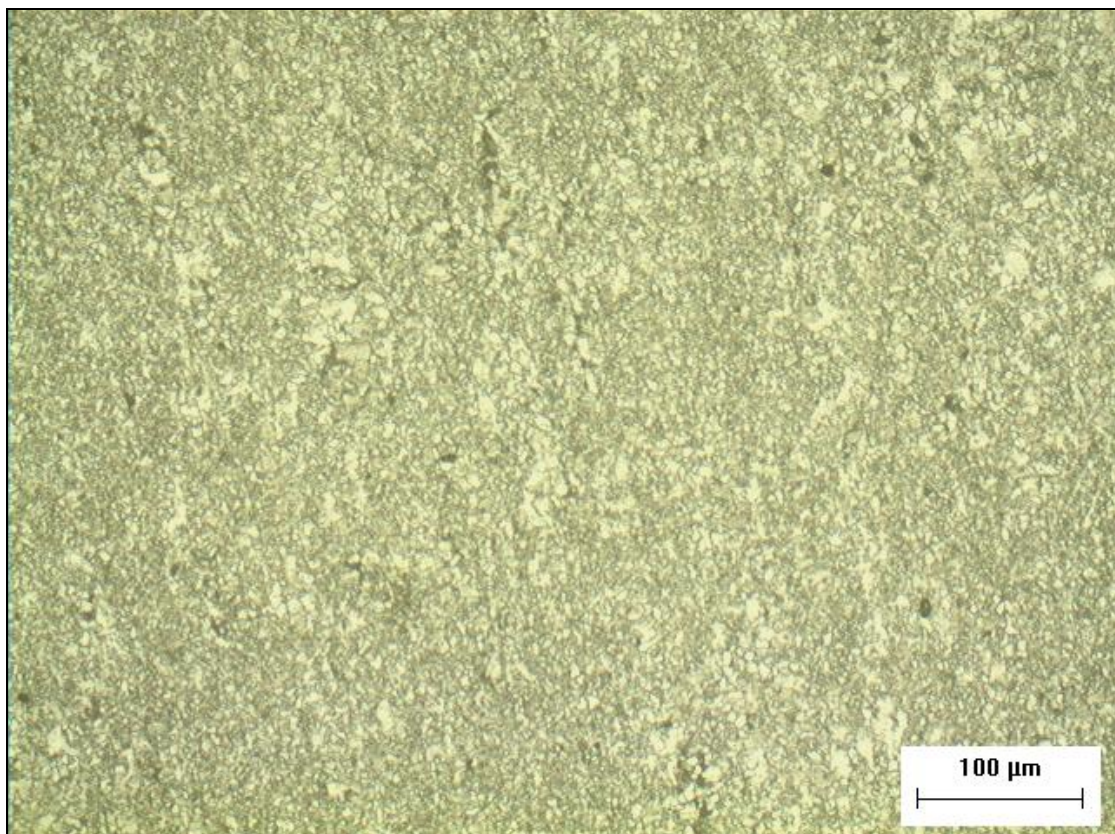


Figura 4.45 – Microscopia ótica 200X.

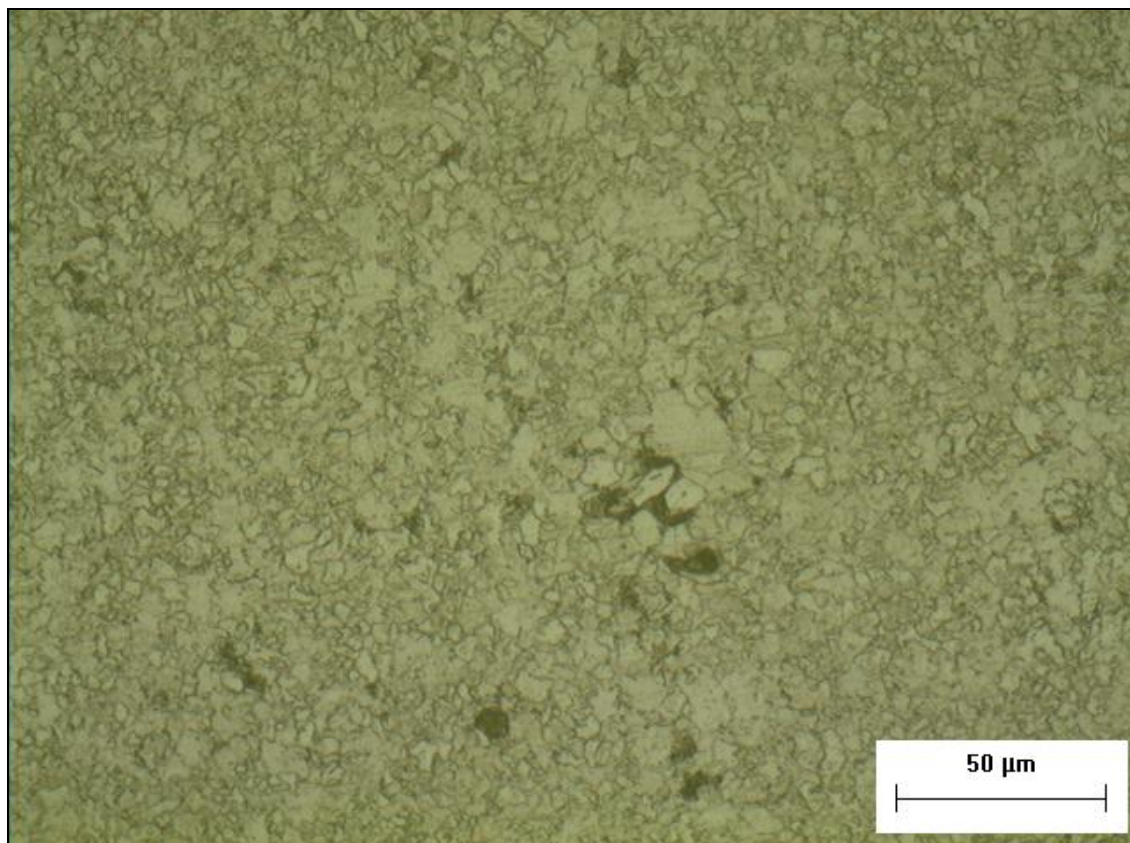


Figura 4.46 – Microscopia ótica 500X.

#### **4.5 - Ensaios para avaliação das durezas obtidas pela metodologia da impedância ultrassônica de contato (UCI) em comparação com a dureza convencional (HV)**

A fim de comparar os resultados dos dois métodos de medição de dureza foi usada uma amostra extraída do corpo de prova 15, que está ilustrada na Figura 4.47.

A Tabela 4.15 os resultados dos ensaios realizados no corpo de prova utilizando o durômetro convencional e a Tabela 4.16 apresenta os resultados de dureza obtidos com

durômetro de impedância ultrassônica de contato (UCI), detalhando as dimensões das diagonais obtidas nos ensaios.



Figura 4.47 – Amostra para validação dos ensaios de dureza pelo método UCI.

Tabela 4.15 – Dureza através do método da impedância ultrassônica de contato (UCI).

| <b>Ensaio</b> | <b>Dureza<br/>[HV<br/>(UCI) 5]</b> | <b>Ensaio</b> | <b>Dureza<br/>[HV<br/>(UCI) 5]</b> | <b>Ensaio</b> | <b>Dureza<br/>[HV<br/>(UCI) 5]</b> | <b>Ensaio</b> | <b>Dureza<br/>[HV<br/>(UCI) 5]</b> |
|---------------|------------------------------------|---------------|------------------------------------|---------------|------------------------------------|---------------|------------------------------------|
| 1             | <b>215</b>                         | 2             | <b>218</b>                         | 3             | <b>207</b>                         | 4             | <b>208</b>                         |
| 5             | <b>216</b>                         | 6             | <b>209</b>                         | 7             | <b>208</b>                         | 8             | <b>211</b>                         |
| 9             | <b>209</b>                         | 10            | <b>213</b>                         | 11            | <b>211</b>                         | 12            | <b>214</b>                         |
| 13            | <b>210</b>                         | 14            | <b>215</b>                         | 15            | <b>214</b>                         | 16            | <b>214</b>                         |
| 17            | <b>209</b>                         | 18            | <b>209</b>                         | 19            | <b>217</b>                         | 20            | <b>218</b>                         |

Os ensaios de dureza pelo método UCI, com 95% de confiança, de acordo com o teste de normalidade *Anderson-Darling* ( $p\text{-value} = 0,121$ ), segue uma distribuição normal com média de 212,3HV(UCI)5 e DV igual a 4, cuja função de densidade de probabilidade está ilustrada na Figura 4.48.

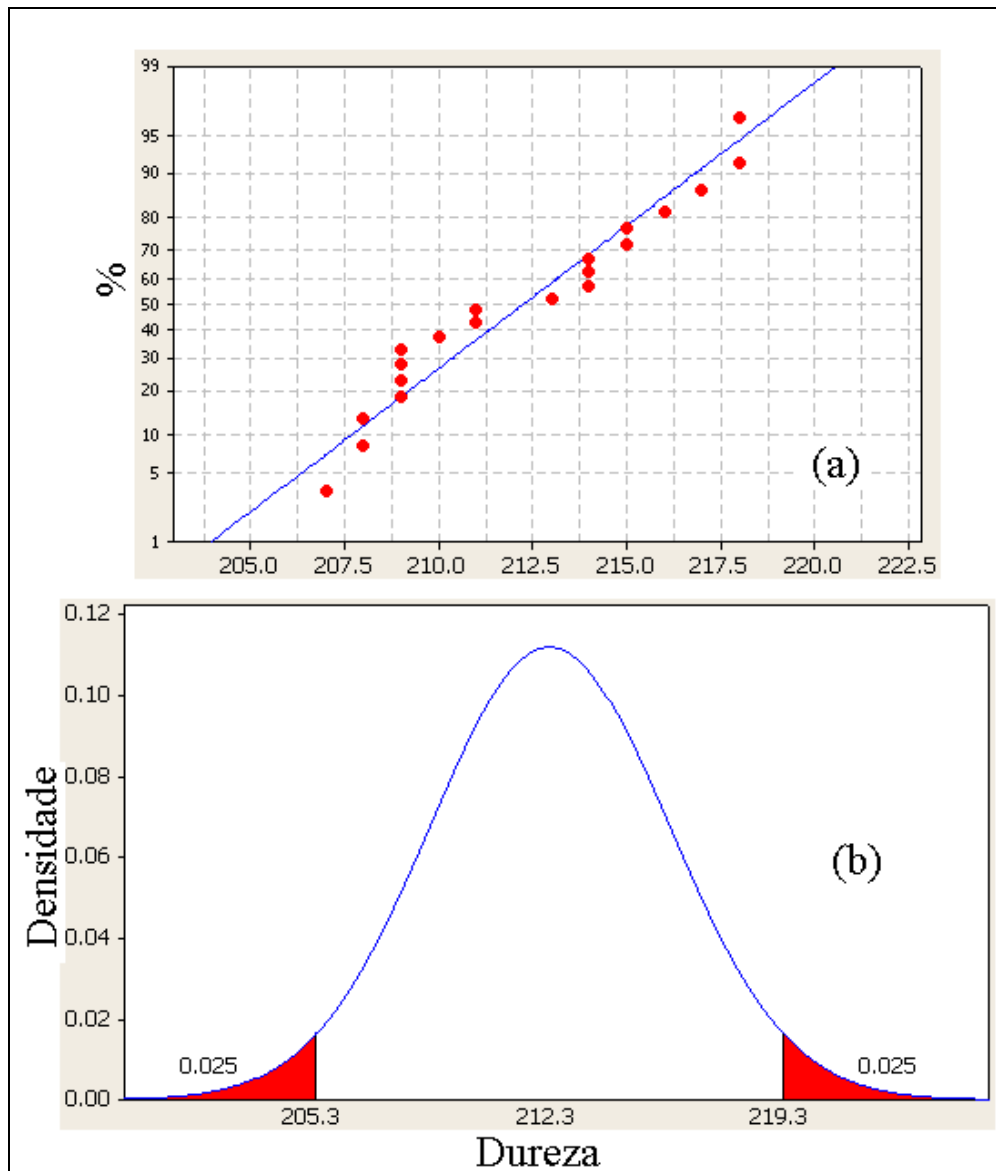


Figura 4.48 – (a) Teste de normalidade *Anderson-Darling* –  $p\text{-value} = 0,121$ ; (b) Função densidade de probabilidade  $\alpha = 0,05$  – Ensaaios com durômetro UCI.

Tabela 4.16 – Dureza obtida com durômetro convencional (HV).

| <b>Ensaio</b> | <b>d1[mm]</b> | <b>d2[mm]</b> | <b>d<sub>médio</sub>[mm]</b> | <b>Dureza [HV]</b> |
|---------------|---------------|---------------|------------------------------|--------------------|
| 1             | 0,511         | 0,512         | 0,5115                       | <b>213</b>         |
| 2             | 0,514         | 0,513         | 0,5135                       | <b>211</b>         |
| 3             | 0,512         | 0,513         | 0,5125                       | <b>212</b>         |
| 4             | 0,515         | 0,514         | 0,5145                       | <b>210</b>         |
| 5             | 0,509         | 0,51          | 0,5095                       | <b>214</b>         |
| 6             | 0,508         | 0,509         | 0,5085                       | <b>215</b>         |
| 7             | 0,515         | 0,514         | 0,5145                       | <b>210</b>         |
| 8             | 0,509         | 0,51          | 0,5095                       | <b>214</b>         |
| 9             | 0,511         | 0,512         | 0,5115                       | <b>213</b>         |
| 10            | 0,506         | 0,507         | 0,5065                       | <b>217</b>         |
| 11            | 0,509         | 0,51          | 0,5095                       | <b>214</b>         |
| 12            | 0,515         | 0,514         | 0,5145                       | <b>210</b>         |
| 13            | 0,512         | 0,513         | 0,5125                       | <b>212</b>         |
| 14            | 0,514         | 0,513         | 0,5135                       | <b>211</b>         |
| 15            | 0,508         | 0,509         | 0,5085                       | <b>215</b>         |
| 16            | 0,515         | 0,516         | 0,5155                       | <b>209</b>         |
| 17            | 0,512         | 0,513         | 0,5125                       | <b>212</b>         |
| 18            | 0,506         | 0,507         | 0,5065                       | <b>217</b>         |
| 19            | 0,512         | 0,513         | 0,5125                       | <b>212</b>         |
| 20            | 0,509         | 0,51          | 0,5095                       | <b>214</b>         |

A Figura 4.49 apresenta os resultados do teste de normalidade *Anderson-Darling* ( $p\text{-value} = 0,195$ ) e a função de densidade de probabilidade, onde com 95% de confiança, concluiu-se que os ensaios de dureza pelo método convencional (HV) seguem uma distribuição normal, com média de 212,7HV(UCI)5 e DV igual a 2.

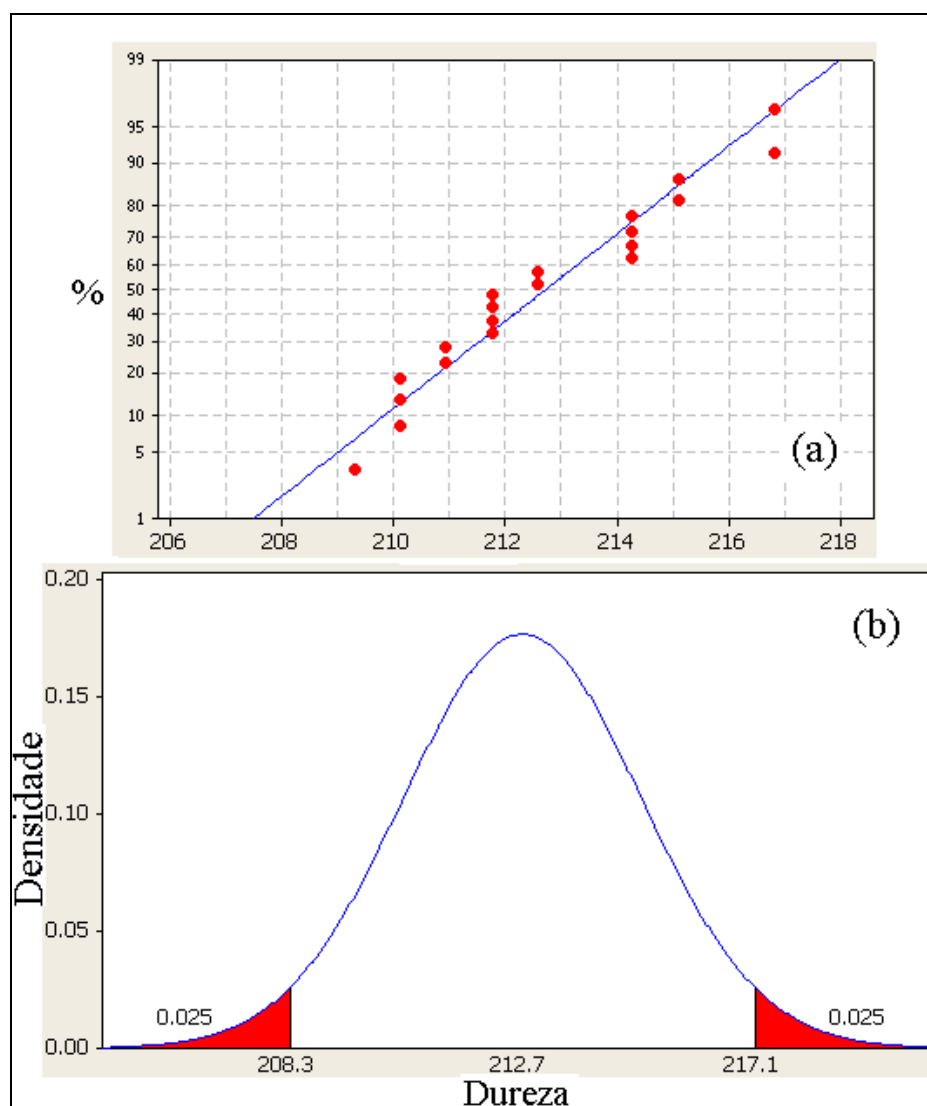


Figura 4.49 – (a) Teste de normalidade *Anderson-Darling* –  $p\text{-value} = 0,195$ ; (b) Função densidade de probabilidade  $\alpha = 0,05$  – Ensaios com durômetro convencional (HV).

A Figura 4.50 ilustra o resumo dos ensaios realizados com o durômetro convencional HV e o durômetro UCI.

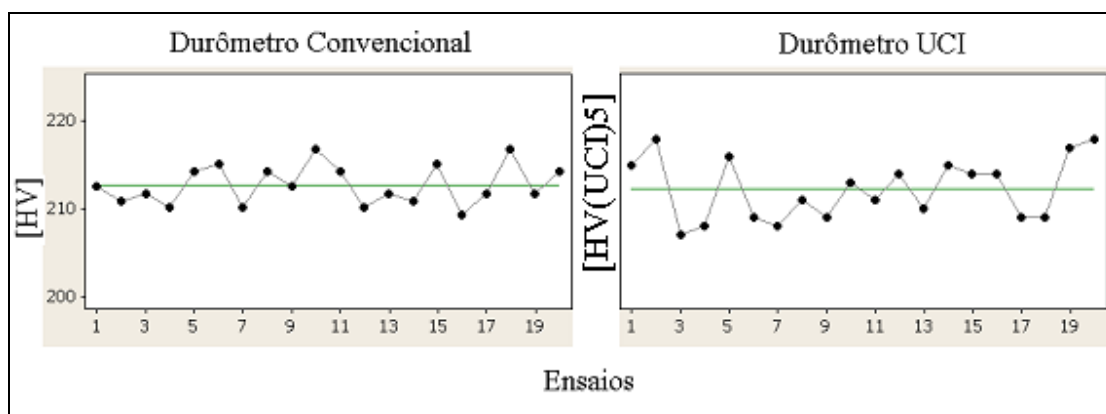


Figura 4.50 – Resumo comparativo dos ensaios de dureza.

É possível inferir estatisticamente, considerando as duas médias como populações independentes, através da aplicação do teste de hipóteses bilateral,  $H_0: \mu(\text{Durômetro Convencional}) = \mu(\text{UCI})$  e  $H_1: \mu(\text{Durômetro Convencional}) \neq \mu(\text{UCI})$ , com 95% de confiança que a hipótese nula ( $H_0$ ) não pode ser rejeitada, ou seja, é possível concluir que a média dos ensaios de dureza obtida com o durômetro convencional HV não é diferente à obtida com o durômetro UCI.

Observando a média da dureza superficial com o durômetro UCI de 212,3HV(UCI)5 e da média com o durômetro convencional de 212,7HV, obtidas no corpo de prova 15, na ausência de revestimentos, impurezas superficiais e com a superfície de mesmo nível de acabamento, é possível perceber que o resultado é coerente com aquele encontrado por HASHEMI (2011), que em amostras de aço API 5L X65 encontrou a dureza de 221HV, e ainda com o resultado apresentado por AMEND & CLARK (2009)

que para o aço API 5L X70, que com 95% de confiança, encontrou a dureza média de 216HV.

A Tabela 4.17 apresenta de forma integrada, para o aço API 5L X70, os resultados de dureza obtidos experimentalmente, nos diferentes graus de deformação dos ensaios de dobramento.

Tabela 4.17 – Dureza superficial vs. grau de deformação.

| <b>Níveis de Deformação</b>        | <b><math>\alpha = 0^\circ</math></b> | <b><math>\alpha = 90^\circ</math><br/>Grau I</b> | <b><math>\alpha = 135^\circ</math><br/>Grau II</b> | <b><math>\alpha = 160^\circ</math><br/>Grau III</b> |
|------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| <b>Dureza média<br/>[HV(UCI)5]</b> | 214                                  | 145                                              | 149                                                | 147                                                 |
| <b>DV</b>                          | 11                                   | 14                                               | 13                                                 | 20                                                  |

## Capítulo 5 - CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo a avaliação do comportamento e dos fenômenos relacionados com as tensões residuais, tensões estruturais aplicadas e a dureza superficial em dutos de aço ARBL, API 5L X70, em regiões com nível de deformação, acima do limite de escoamento do material, através da execução de ensaios de tensometria por difração de raios-X e de ensaios de dureza, pelo método UCI. Para avaliação do comportamento dessas propriedades em diferentes níveis de deformação, foram analisados os resultados dos ensaios realizados em corpos de prova de dobramento e de medições obtidas em um gasoduto em operação (TBG, 2010), que permitem as seguintes conclusões:

1. As tensões residuais superficiais oriundas do processo de fabricação (UOE) do tubo, presentes em corpos de prova deste tubo, antes do dobramento ( $\alpha = 0^\circ$ ) são compressivas, heterogêneas entre si, de baixa magnitude e apresentaram diferentes valores para cada direção avaliada, sendo que os maiores valores foram verificados na direção circunferencial (média de -70MPa). Elas apresentaram valor máximo correspondente a 22% do SMYS do material. Os resultados de dureza superficial foram homogêneos, com média de 214,5HV(UCI)5.
2. No material deformado plasticamente com grau I ( $\alpha = 90^\circ$ ), as tensões residuais superficiais são compressivas, de magnitude significativa, apresentaram diferentes valores para cada direção avaliada e são heterogêneas entre si, os maiores valores foram verificados na direção

circunferencial (média de -283MPa). O valor máximo de tensão registrado correspondente a 61% do SMYS do material. Os resultados de dureza superficial foram homogêneos, com média de 145,7HV(UCI)5.

3. As tensões residuais superficiais apresentaram diferentes valores para cada direção avaliada, no material deformado plasticamente com grau II ( $\alpha = 135^\circ$ ), são de natureza compressiva, de magnitudes significativas e heterogêneas entre si, apresentaram valor máximo correspondente a 70% do SMYS do material e uma média de -305MPa na direção circunferencial. Os resultados de dureza superficial, com média de 148,7HV(UCI)5, foram homogêneos.
4. No material deformado plasticamente com grau III ( $\alpha = 160^\circ$ ), os resultados de dureza superficial foram homogêneos, com média de 147HV(UCI)5. As tensões residuais superficiais são de magnitude significativa, de natureza compressiva, heterogêneas entre si e apresentaram diferentes valores para cada direção avaliada, com valor máximo equivalente a 74% do SMYS do material e média de -326MPa na direção circunferencial.
5. A média da dureza superficial sofre uma redução significativa (em torno de 30%) após o grau I de deformação plástica, em consequência do amolecimento permanente proveniente do Efeito *Bauschinger*.
6. É possível afirmar que o grau de deformação plástica influencia sobremaneira na magnitude das tensões residuais superficiais, o que foi comprovado pelos resultados obtidos, chegando a atingir uma variação média no SMYS do material de 55% a  $160^\circ$ .

7. O nível e o alcance do campo das tensões compressivas presentes nas camadas subsuperficiais do material, indicativo de domínio do efeito *Bauschinger*, é diretamente proporcional ao grau de deformação plástica sofrido, podendo atingir até 108% do SMYS do material (-522MPa) e alcance de 3,6mm (57% da espessura do tubo).
8. As tensões residuais obtidas nos corpos de prova sem deformação comprovaram a presença do efeito *Bauschinger* provenientes da fabricação U-O-E do tubo, a tensão na direção circunferencial é em média 43% maior que a tensão na direção a 45° e 24% maior que na direção longitudinal, que é coerente com o histórico de deformação do processo.
9. As tensões subsuperficiais no gasoduto em operação na posição 12h, de natureza compressiva, tem magnitude compatível com o indicativo de domínio do efeito *Bauschinger* na região, que foi comprovado através da comparação dos resultados obtidos em campo com os perfis obtidos no laboratório.
10. É possível afirmar que quando o material é curvado e estirado plasticamente a frio, existe uma relação entre a dureza e a TR na região deformada, ou seja, quando o material é deformado plasticamente em tração, depreende-se uma redução no patamar da dureza (amolecimento) e um aumento da TR em compressão. Sendo que ambos os fenômenos estão relacionados com o domínio do efeito *Bauschinger* na região.

## Capítulo 6 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Fazer ensaios de tração das amostras deformadas após diferentes graus de deformação a fim de obter uma correlação do perfil de tensões residuais com a redução das propriedades mecânicas oriundas do efeito *Bauschinger*.
2. Mapear com técnica de ruído Barkhausen regiões de dutos e de tubulações avariadas para verificar os locais de maiores deformações, para posterior medição das TR por difração de raios-X e dureza.
3. Fazer ensaios de TR por difração de raios-X em tubos pressurizados, visando obter o perfil de tensões residuais relativos às pressões internas equivalentes às classes de locação de gasodutos (classe 1 (divisão 2) - 72% do SMYS, classe 2 - 60% do SMYS, classe 3 - 50% SMYS e classe 4 - 40% SMYS).
4. Fazer ensaios de corrosão sob tensão de materiais diferentemente deformados para verificação da resistência à corrosão.
5. Modelar através de elementos finitos o comportamento do efeito *Bauschinger* em dutos submetidos a danos provenientes da ação do solo.
6. Fazer ensaios de conformação a frio, com monitoramento do nível de deformação, ensaios de obtenção de perfil de TR, ensaios de tração (direção longitudinal e circunferencial) antes e após a conformação, em tubos pressurizados a 40% do SMYS, 50% do SMYS, 60% do SMYS e 72% do SMYS.
7. Executar ensaios de dobramento, em diversos graus de deformação plástica para avaliar o comportamento da dureza através da espessura do material.

8. Avaliar o comportamento do efeito *Bauschinger* em juntas circunferenciais soldadas em condições de deformação plástica severa.
9. Fazer *shot peening* normalizado conforme padrão *Almen*, em chapas de aço API 5L X70 para posterior análise do perfil das tensões residuais através da espessura e comparação com as tensões residuais remanescentes de um processo de fabricação de tubo U-O-E.
10. Fazer ensaios de dobramento entre 0° e 90° para avaliar o comportamento da dureza e da TR neste intervalo.
11. Analisar o comportamento do Efeito *Bauschinger* em aços API 5L com diferentes microestrutura e composição química.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEL A., MUIR H.; “The Bauschinger Effect and Discontinuous Yielding”. Philosophical Magazine, v. 26, pp. 489-504, Fev. 1972.

ALIAS – Anomaly Library for Inspection Assurance Standards, Defects Database.  
Disponível em: <<http://www.pipelinealias.com>>. Acesso em: 03 set. 2010, 06:50:00.

AMEND, W.E., CLARK, E.B., 2009, Applications Guide for Determining the Yield Strength of In-Service Pipe by Hardness Evaluation, Final Report, American Society of Mechanical Engineers, New York, N.Y.

API - AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. “Specification for Line Pipe” API 5L, USA, 2004.

ARGENT, C., 2005, MACAW’S Pipeline Defects. First Edition, Hampshire, United Kingdom, Pennwell Corp.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. “Standard Practice for Portable Hardness Testing by the Ultrasonic Contact Impedance Method” ASTM A1038, USA, 2010.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. “Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility” ASTM E 290, USA, 2009.

BAUSCHINGER, J., 1881, Civiling. N.F., 27, 289.

BHADESHIA, H.K.D.H.; “Material factors”. Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. 3rd Printing, ASM International, pp. 3-10, Ohio, 2008.

BROWN L.M.; “Orowan’s Explanation of the Bauschinger Effect”. Scripta Metallurgica v. 11, pp. 127-131, 1977.

CINDRA FONSECA, M.P, 2000, Evolução do estado de tensões residuais em juntas soldadas de tubulação durante ciclos de fadiga. Dissertação de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

CZYZ J.A., WAINSELBOIN S.E.; “Monitoring Pipeline Movement and Its Effect on Pipe Integrity Using Inertial/Caliper In-Line Inspection”. In: Proceedings of Rio Pipeline Conference & Exposition Paper 575, Rio de Janeiro, 2003.

DIETER, G. E., 1986, Metalurgia Mecânica. 2ª Edição, Rio de Janeiro, Editora Guanabara Dois.

FITZPATRICK, M. E.; LODINI, A., 2003, Analysis of Residual Stress by Diffraction using Neutron and Synchrotron Radiation, 1<sup>st</sup> Edition, Taylor & Francis.

FRANK, S, 2006, Mobile Hardness Testing Application Guide for Hardness Testers, GE Inspection Technologies, USA.

FRANK, S, 2011, TIV (Through-Indenter Viewing) - New Possibilities of Mobile Hardness Testing, Agfa NDT GmbH. Disponível em: <<http://www.AgfaNDT.com>>. Acesso em: 03 jan. 2011, 09:55:00.

FBTS, 2007, Apostila de Curvamento de Tubos. Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem, Rio de Janeiro, RJ.

FUKUDA N., YATABE H., KAWAGUCHI S., *et al.*; “Experimental and Analytical Study of Cold Bending Process for Pipelines”. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering v. 125, pp. 153-157, 2003.

GAU J., KINZEL G.L.; “A new model for springback prediction in which the Bauschinger effect is considered”. International Journal of Mechanical Science v.43, pp. 1813-1832, 2001.

GE, Integrity Solutions – Maintaining Pipeline Integrity. Disponível em: <[http://www.ge-energy.com/businesses/ge\\_oilandgas/en/prod\\_serv/serv/pipeline/en/newsletter/dec\\_2006\\_ap/strain.html](http://www.ge-energy.com/businesses/ge_oilandgas/en/prod_serv/serv/pipeline/en/newsletter/dec_2006_ap/strain.html)>. Acesso em: 11 jan. 2011, 23:35:00.

HASHEMI, S.H.; “Strength-hardness statistical correlation in API X65 steel”. Materials Science and Engineering v. A528, pp. 1648-1655, 2011.

HAUK, V., 1997, Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods. 1<sup>st</sup> Edition, Amsterdam, The Netherlands, Elsevier Science B.V.

HIROYUKI M., NAOKI F., HIROSHI Y., *et al.*, “Appropriate design for X80 pipeline subjected to large ground deformation” 22<sup>nd</sup> World Gas Conference, Tokyo, Japan, 1-5 Jun. 2003.

HUTCHINGS, M. T., WITHERS, P. J., HOLDEN, T. M., *et al.*, 2005, Introduction to the Characterization of Residual Stress by Neutron Diffraction, 1<sup>st</sup> Edition, CRC Press.

JIA P.R., LI N., ZHU W.D.; “Study of Bauschinger Effect in X80 Steel and Bending Strength”. Key Engineering Materials v. 274-276, pp. 1071-1076, 2004.

KANDIL F.A., LORD J.D., FRY A.T. *et al.*, 2001, “A Review of Residual Stress measurement Methods - A Guide to Technique Selection”, NPL Materials Centre, Middlesex, UK.

KISHAWY H.A., GABBAR H.A., “Review of Pipeline Integrity Management Practices” International Journal of Pressure Vessels and Piping v.87, pp. 373-380, 2010.

KOSTRYZHEV A.G., 2009, Bauschinger Effect in Nb and V Microalloyed Line Pipe Steels. Ph.D. dissertation, The University of Birmingham, Birmingham, UK.

KOSTRYZHEV A.G., STRANGWOOD M., DAVIS C.L., “Influence of microalloying precipitates on Bauschinger effect during UOE forming of line pipe steels” Materials Technology v. 22, pp. 166-172, 2007.

KRITZLER J., W. WÜBBENHORST; “Inducing Compressive Stresses through Controlled Shot Peening”. Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel, 3rd Printing, ASM International, pp. 345-358, Ohio, 2008.

LAW M., PRASK, H., LUZIN, V., *et al.*; “Residual stress measurements in coil, linepipe and girth welded pipe” Materials Science and Engineering v. A 437, pp.60-63, 2006.

LETA F.R.; MENDES V.B.; MELLO J.C.S, “Medição de Identificações de Dureza com Algoritmos de Visão Computacional e Técnicas de Decisão com Incertezas”. ENGEVISTA, v.6, n.2, pp. 15-35, ago. 2004.

LIU P.F., ZHENG J.Y., ZHANG B.J., *et al.*; “Failure analysis of natural gas buried X65 steel pipeline under deflection load using finite element method”. Journal of Material and Design v. 31, pp. 1384-1391, sep. 2009.

LÖHE D., VÖHRINGER O., “Stability of Residual Stresses”. Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel, 3rd Printing, ASM International, pp. 54-69, Ohio, 2008.

LORD J.D., 2009, “Incremental Centre Hole Drilling” Edited by Evans J.E., Dulieu-Barton J.M., Burguete R.L., A state of the art guide to measurement techniques - Modern Stress and Strain Analysis, British Society for Strain Measurement, UK, pp. 20-21.

LU, J., 1996, Handbook of Measurement of Residual Stresses, SEM, Inc.

MACHERAUCH, E., KLOOS, K. H., 1987, Origin, Measurements and Evaluation of Residual Stress in Science and Technology. Ed. by Macherauch, E., Hauk, V., DGM VERLAG.

MCALLISTER E.W., 2009, Pipeline Rules of Thumb Handbook, 7th Edition, USA, Elsevier.

MIKI C., KOBAYASHI T., OGUCHI N., *et al.*; “Deformation and Fracture Properties of Steel Pipe Bend with Internal Pressure Subjected to In-Plane Bending”. In: Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Paper 1814, Auckland, New Zealand, 2000.

MUSMAN, J. V. R, SOARES, J.P.; “Estabilização e Monitoramento de Encosta em Solo Coluvionar na Serra do Mar” In: 8º Congresso Nacional de Geotecnia, pp. 1631-1641, Lisboa, Mar. 2002.

PHMSA-DOT – Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration – Department of Transportation - Estatísticas de acidentes em dutos no Estados Unidos da América.

Disponível em: <<http://www.phmsa.dot.gov>>. Acesso em: 15 fev. 2010, 12:15:00.

PREVÉY P. S., 1996, “Developments in Materials Characterization Technologies”, Edited by G. Vander Voort & J. Friel, ASM International, Materials Park, OHIO, pp. 103-110.

PREVÉY, P.S.; “X-ray Diffraction Residual Stress Techniques” Metals Handbook v.10, Metals Park: American Society for Metals, pp. 380-392, 1986.

PURVIS B., HÜWENER T., “Pipeline Mapping and Strain Assessment Using ILI Tools” In: Proceedings of Rio Pipeline Conference & Exposition, Rio de Janeiro, Brazil, 22-24 Sep. 2009.

ROHDE, R.A., 2010, “Metalografia preparação de amostras - Uma abordagem pratica”. Procedimento do LEMM - Laboratório de Ensaios Mecânicos e Materiais URI. Disponível em: <<http://www.urisan.tcche.br>>. Acesso em: 10 set. 2010, 13:18:00.

RUUD C., “Measurement of Residual Stresses”. Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel, 3rd Printing, ASM International, pp. 99-117, Ohio, 2008.

SAGE, A. M.; “Physical Metallurgy of High-Strength, Low-Alloy Line-Pipe and Pipe-Fitting Steels”. The Metals Society, v. 10, p. 224-233, London, Jun 1983.

SEMIATIN S.L., 1993, ASM Metals Handbook – Volume 14: Forming and Forging. 9th Edition, EUA, ASM International.

SOCOTHERM BRASIL, “Alta Tecnologia em Revestimento e Isolamento Térmico de Tubos de Aço” Disponível em: <<http://www.socothermbrasil.com.br>>. Acesso em: 15 jan. 2011, 20:23:00.

STEGLICH D., PIRONDI A., BONORA N., *et al.*; “Micromechanical modelling of cyclic plasticity incorporating damage”. International Journal of Solids and Structures v. 42, pp. 337-351, 2005.

TBG, Relatório de Medição de Tensões. RL-4160-970-FEC-001, FEC, Rio de Janeiro, RJ, 2010.

TENARIS CONFAB, “Catálogo de Produtos e Serviços” Disponível em: <<http://www.tenaris.com>>. Acesso em: 14 jun. 2010, 13:21:00.

TOYODA M., OHATA M., AYUKAWA N., *et al.*; “Ductile fracture initiation behavior of pipe under a large scale of cyclic bending”. In: Proceedings of the Third International Pipeline Technology Conference, pp. 87–102, Brugge-Belgium, Fev. 2000.

WANG Z., GONG B.; “Residual Stress in the Forming of Materials”. Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel” 3<sup>rd</sup> Printing, ASM International, pp. 141-149, Ohio, 2008.

WILLIAMS J.G.; “Advances in Steels for High Strength ERW Line Pipe Application in Australia”. Materials Forum v. 31, pp. 1-10, 2007.

WITHERS P.J., BHADSHIA H.K.D.H.; “Residual Stress Part 1- Measurement techniques”, Materials Science Technology v.17, pp. 355-365, 2001.