

**ESTUDO DE ENSAIOS DE MICRODUREZA PARA  
AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL DE JUNTAS  
SOLDADAS POR DIFERENTES PROCESSOS DO  
AÇO INOXIDÁVEL SUPER DUPLEX UNS S32750**

**MICROHARDNESS TEST STUDY FOR  
MICROSTRUCTURAL ASSESSMENT OF JOINTS WELDED  
BY DIFFERENT PROCESSES OF STAINLESS STEEL  
SUPERDUPLEX UNS S32750**

**ESTUDIO DE PRUEBA DE MICRODURA PARA LA  
EVALUACIÓN MICROESTRUTURAL DE JUNTAS  
SOLDADAS POR DIFERENTES PROCESOS DE ACERO  
INOXIDABLE SUPER DUPLEX UNS S32750**

Gustavo M. Delfino<sup>1</sup>  
Bruno R. Porfirio<sup>2</sup>  
Arthur A. C. Leme<sup>3</sup>  
Bruno F. Gianelli<sup>5</sup>

1

**Resumo:** A presença dos aços inoxidáveis super duplex na indústria petroquímica atual é evidente, seja em tubulações ou mesmo para válvulas reguladoras de fluxo, com boas propriedades mecânicas e de resistência a corrosão. A produção desses elementos engloba principalmente processos de soldagem, que devem ter parâmetros rigorosos de forma a manter o equilíbrio de fase aceitável. O controle inadequado desses parâmetros levam a formação de fases secundárias indesejáveis, e a microdureza desempenha função importante na constatação dessas alterações. Esse artigo busca analisar estudos de microdureza realizados no aço inoxidável super duplex.

**Palavras-chave:** Microdureza, Fases deletérias, Soldagem, Aços inoxidáveis duplex

**Abstract:** The presence of super duplex stainless steels in the current petrochemical industry is evident, whether in pipelines or even for flow regulating valves, with good mechanical properties and resistance to corrosion. Its manufacture mainly includes welding processes, which must have strict parameters in order to maintain the acceptable phase balance. The low control of these parameters leads to the formation of undesirable secondary phases, and microhardness plays an important role in finding these changes. This article seeks to analyze the microhardness testing studies carried out on super duplex stainless steel.

**Keywords:** Microhardness, deleterious phases, welding, duplex stainless steels

**Resumen:** Es evidente la presencia de aceros inoxidables superdúplex en la industria petroquímica actual, ya sea en tuberías o incluso para válvulas reguladoras de caudal, con buenas propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión. Su fabricación incluye principalmente procesos de soldadura, que deben tener parámetros estrictos para mantener el equilibrio de fases aceptable. El bajo control de estos parámetros conduce a la formación de fases secundarias indeseables, y la microdureza juega un papel importante en la búsqueda de estos cambios. Este artículo analiza los estudios de ensayos de microdureza en acero inoxidable superdúplex.

**Palabras-clave:** Microdureza, fases deletéreas, soldadura, aceros inoxidables dúplex

Submetido 17/10/2020

Aceito 20/01/2021

Publicado 03/02/2021

## Introdução

Os aços inoxidáveis são aços de alta liga conhecidos por combinar excelentes propriedades mecânicas à elevada resistência a corrosão. Dependendo da fase predominante em sua microestrutura, os aços inoxidáveis podem ser classificados em: ferríticos, austeníticos, martensíticos e duplex. Os aços inoxidáveis duplex (AID) possuem microestrutura com proporções similares das fases ferrita ( $\alpha$ ) e austenita ( $\gamma$ ). O primeiro relato sobre a microestrutura do AID foi em 1927, pelos franceses Bain e Griffiths, embora sua comercialização iniciou-se a partir da década de 1930 (NILSSON, 1992; ZEMPULSKI, 2011).

No de sua comercialização, cientistas dedicaram esforços para o melhoramento de sua resistência a corrosão sob tensão, sendo um dos primeiros aços desenvolvidos o 3RE60. Com o início da Segunda Guerra Mundial, houve a intensificação do uso dos AID, principalmente do AISI 329, como material de construção para trocadores de calor do tipo casco-tubo cujo fluido empregado era o ácido nítrico. Além dos trocadores de calor, os aços inoxidáveis duplex passaram também a ser utilizados em uma série de outras aplicações industriais, com destaque a equipamentos de transporte de fluidos corrosivos (ZEMPULSKI, 2011).

A segunda geração dos AID surgiu para solucionar sua dificuldade de soldabilidade, marcada pelo desbalanceamento das fases na zona termicamente afetada (ZTA) da junta soldada, resultando na queda da dureza (propriedade característica da ferrita) e na redução de sua resistência a corrosão quando comparado ao material base (MB). Com o surgimento do processo de descarburização por sopro combinado de Argônio e Oxigênio e a capacidade de adição controlada de Nitrogênio como elemento de liga aos AID, boa parte dos problemas no cordão de solda, foram sanados. Além disso, a adição de Nitrogênio à composição do aço resultou na redução da taxa de formação de fases deletérias na região de solda, ampliando ainda mais a demanda deste aço em vários segmentos da indústria (ZEMPULSKI, 2011).

Dentre as categorias de aços inoxidáveis duplex desenvolvidos no contexto da segunda geração, há os aços inoxidáveis super duplex (AISD), cuja resistência a corrosão por pite (dada pelo índice PRE – *Pitting Resistance Equivalent*) se sobressai em relação às demais categorias, exceto para os aços inoxidáveis hiper duplex (ZEMPULSKI, 2011).

Os AID são encontrados em plataformas *offshore* de petróleo, pois sua grande resistência mecânica, além de permitir a redução da espessura de tubulações de transporte de

fluidos, quando combinada a sua resistência a corrosão, satisfaz uma grande variedade de aplicações no intervalo de temperaturas de -50 a 250 °C. Assim, embora com custo elevado, os AID representam um investimento valioso a longo prazo para a indústria marítima, principalmente a petroquímica (NILSSON, 1992; ZEMPULSKI, 2011; CANDEL, 2016).

A revisão avalia a eficiência de ensaios de microdureza Vickers na identificação de fases deletérias em juntas de aço inoxidável duplex UNS S32750 soldadas via diferentes processos.

### **Metodologia**

Como parâmetro de seleção de material bibliográfico para a elaboração desta revisão, realizou-se pesquisas sobre diferentes trabalhos nos quais o ensaio de microdureza Vickers é aplicado em juntas soldadas no material de escolha desse estudo, o UNS S32750, assim como aços inoxidáveis duplex diversos a fim de complementar com informações comuns aos AID.

Além disso, buscou-se diferentes materiais de apoio que tratavam das condições de formação de fases deletérias nesses aços e de características gerais dos AID. Por fim, de maneira geral, buscou-se artigos que contemplavam os últimos 20 anos de pesquisa nesse material.

A Tabela 1 a seguir, apresenta a separação dos principais materiais bibliográficos separados e os principais temas ao qual ele foi aplicado no artigo.

**Tabela 1** – Relação dos conteúdos para a revisão e os temas do artigo

Primeiro autor	Ano	Revista / Site	Tema
CANDEL, E. H. P.	2016	teses.usp.br	Aços inoxidáveis duplex
OLAYA LUENGAS, L.	2017	repositorio.ufsc.br	
ZEMPULSKI, P. R. S.	2011	pgmec.ufpr.br	
NILSSON, J.-O.	1992	Materials Science and Technology	Aços inoxidáveis duplex / Fases deltéricas
HOSSEINI, V. A. et al.	2016	Welding in the World	Fases deltéricas
VERMA, J.; TAIWADE, R. V.	2017	Journal of Manufacturing Processes	Fases deltéricas / Processos de soldagem
COLLIGAN, K. J.	2010	Friction Stir Welding	Soldagem e microdureza
DANDEKAR, T. R. et al.	2018	Materials Research Express	
GIORJÃO, R. A. R. et al.	2019	Journal of Materials Research and Technology	
NUNES, E. B. et al.	2011	Soldagem & Inspeção	
PESSOA, A. R. P.	2015	repositorio.ufc.br	
RAMKUMAR, K. D. et al.	2016	Journal of Materials Research and Technology	
SANTOS, T. F. A. et al.	2013	Revista Escola de Minas	
SANTOS, T. F. A. et al.	2011	onepetro.org	
SATO, Y. S. et al.	2005	Materials Science and Engineering	
SINGH, R.	2020	Applied Welding Engineering	

### Aços Inoxidáveis Duplex e Super Duplex

Os aços inoxidáveis duplex (AID) agregam excelentes propriedades mecânicas e de resistência a corrosão quando comparado à aços inoxidáveis austeníticos. Eles se apresentam como alternativa economicamente válida, devido às quantidades de Níquel (4 - 7%), sendo uma vantagem em relação aos principais aços inoxidáveis que atingiam quantidades até mesmo superiores à 11% de Níquel, metal de alto valor agregado (CANDEL, 2016).

A constituição dos AID, liga de Fe-Cr-Ni-Mo-N, assim como o balanceamento entre as fases austenita e ferrita (~ 50-50 %), determinam sua qualidade, pode-se dizer que a austenita é uma das responsáveis pelas qualidades de sua resistência a corrosão, e a ferrita constitui o caráter mecânico, tendo ligação com os elementos de liga dissolvidos em cada fase (OLAYA LUENGAS, 2017).

O que permite a coexistência das duas fases é a adição de elementos de ligas estratégicos a esses aços, assim como o controle de impurezas como Enxofre, Fósforo e até mesmo Carbono. Com o passar dos anos foram se tornando cada vez mais complexos e hoje em dia, apesar de apresentar quantidades menores de Níquel, acabaram encarecendo o aço dado a quantidade e variedade de elementos de liga adicionados. Por exemplo, a adição de Níquel e Nitrogênio ajuda

na estabilização da austenita, enquanto o Molibdênio e o Cromo se distribuem melhor na ferrita e por consequência acabam auxiliando na estabilização da ferrita (CANDEL, 2016).

Os principais elementos de liga nos aços inoxidáveis duplex, assim como suas principais influências nas propriedades mecânicas e de resistência a corrosão, estão descritos na Tabela 2.

**Tabela 2** – Principais efeitos elementos de liga em aços inoxidáveis duplex

Elemento de liga	Simbologia	Principais efeitos		% em peso
		Resistência mecânica	Resistência a corrosão	
Cromo	Cr	-	x	22,0 – 28,0
Níquel	Ni	-	x	2,0 – 8,0
Molibdênio	Mo	-	x	0,2 – 5,0
Nitrogênio	N	x	x	0,1 – 0,35
Cobre	Cu	x	x	4,0
Tungstênio	W	x	x	1,2
Manganês	Mn	x	x	0,5 – 5,0
Silício	Si	x	x	0,5 – 5,0

Fonte: Adaptado de (CHIAVERINI, 2008).

Como é possível verificar na Tabela 2, os principais constituintes dos aços inoxidáveis duplex é o Cromo e o Níquel, presentes normalmente em maiores quantidade. Quando se analisa a concentração de elementos de liga, os aços inoxidáveis duplex podem ser classificados como super duplex, normalmente mais ricos em elementos de liga. O fator utilizado para a diferenciação entre eles é o PRE – *Pitting Resistance Equivalent*, que consiste na avaliação da resistência a corrosão por pites da liga, onde se quantifica o conteúdo de Cr, N, Mo e W da liga com o auxílio de equações (CANDEL, 2016).

Neste âmbito, as ligas de aço inoxidáveis duplex apresentam PRE entre 32 e 40, enquanto as ligas de aço inoxidáveis super duplex apresentam PRE acima de 40 (CANDEL, 2016). Com isso apresentamos o material de estudo, o UNS S32750, um aço inoxidável duplex bastante empregado na indústria, principalmente no setor químico (RAMKUMAR et al., 2016), sendo sua composição e propriedades mecânicas são descritas na Tabela 3.

**Tabela 3** – Composição química e propriedades mecânicas do AISD UNS S32750

Composição química (% por peso)									
C	Cr	Fe	Ni	Mo	Mn	N	Si	P	S
0,027	24,86	Rem.	5,75	2,97	0,671	0,186	0,883	0,02	0,005
Propriedades mecânicas									
Limite de Escoamento		Limite de Resistência à Tração		Alongamento		Tenacidade		Dureza média	
429,3 MPa		891 MPa		38 %		82 J		298 HV	

Fonte: Adaptado de (RAMKUMAR et al., 2016).

### Fases Deletérias

Apesar dos efeitos positivos causados pelos elementos de liga, a quantidade desses presentes nos aços inoxidáveis super duplex tornam o material suscetível a formação de fases deletérias (ou secundárias) que afetam nas suas principais propriedades. Essas alterações microestruturais se manifestam em forma de intermetálicos ou mesmo nitretos, formados em situações de grandes variações térmicas em temperaturas críticas, que podem ser causadas por processos de soldagem, extremamente comuns para a produção de equipamentos de aços inoxidáveis super duplex, como é o caso de tubulações (HOSSEINI et al., 2016).

Além desses tipos mais comuns, os aços inoxidáveis super duplex (AISD) podem apresentar inúmeras fases secundárias, sendo que estas fases, sua fórmula química aproximada e sua faixa de temperatura, encontram-se representadas na Tabela 4 (VERMA; TAIWADE, 2017).

**Tabela 4** – Precipitados formados a partir do aço inoxidável super duplex

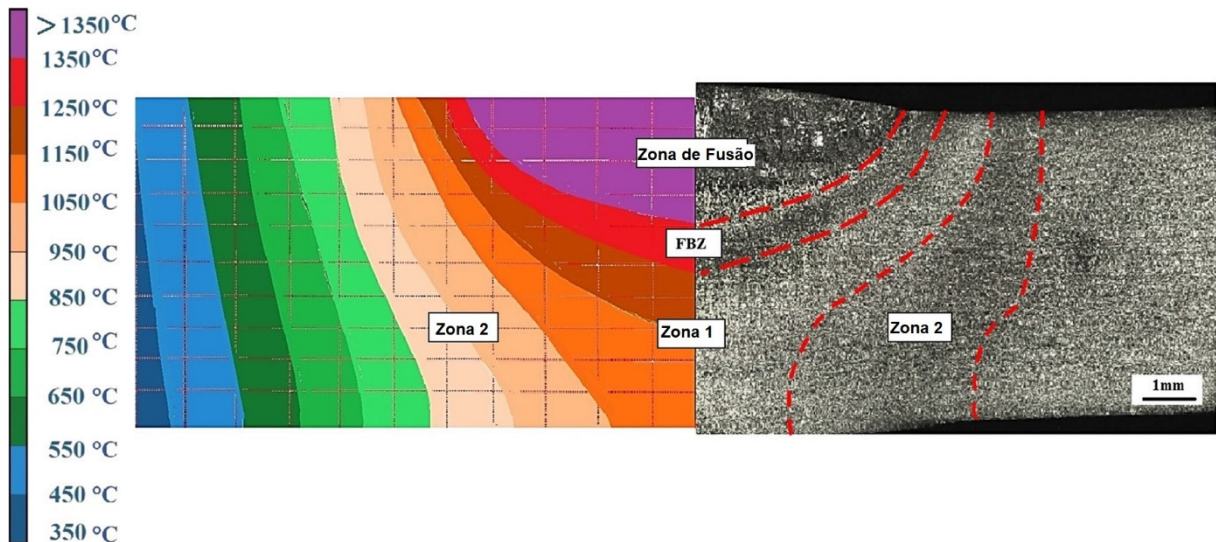
Fases nos Aços Inoxidáveis Duplex	Fórmula Química Aproximada	Faixa de Temperatura (°C)
Fase - $\sigma$	Fe–Cr–Mo	600 – 1000
Nitreto de Cromo (1)	CrN	900 – 1000
Nitreto de Cromo (2)	CrN <sub>2</sub>	700 – 900
Carboneto (1)	M <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	950 – 1050
Carboneto (2)	M <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	600 – 950
Chi ( $\chi$ )	Fe <sub>36</sub> Cr <sub>12</sub> Mo <sub>10</sub>	700 – 900
Fase - $\tau$	----	550 – 650
Fase - R	Fe–Cr–Mo	550 – 650
Fase - $\pi$	Fe <sub>7</sub> Mo <sub>13</sub> N <sub>4</sub>	550 – 600

Fonte: Adaptado de (VERMA; TAIWADE, 2017).

De todos os precipitados formados acima, o intermetálico Fase -  $\sigma$  (sigma) e os nitretos de cromo (1 e 2) estão entre os de maior ocorrência nos AISD. Estudos promovidos por Housseini et al. (2016) no aço inoxidável super duplex UNS S32750 submetido ao processo de soldagem em multipasses de TIG para diferentes aportes térmicos, mostraram que a área de preferência para a formação dos nitretos de cromo, tanto do tipo 1, como do tipo 2, ocorreram na borda de fusão (Zonas 1 e 2), enquanto que a Fase -  $\sigma$  (sigma) ocorreu entre 2 e 3 mm da poça de fusão (FBZ), conforme pode ser observado na Figura 1, no qual o autor organizou um mapa de temperatura, correlacionando-o às suas respectivas distâncias das zonas do cordão de solda.

Housseini et al. (2016), também apontou que os múltiplos ciclos térmicos impostos ao aço estabeleceram temperaturas críticas para a formação de ambas fases, conforme Tabela 4.

**Figura 1** – Correlação entre temperaturas críticas (esquerda) e fases secundárias (direita) em soldas de alto aporte térmico após quatro passes. Temperatura crítica de FBZ (*fusion boundary zone*): 1350 - 1250 °C; Zona 1: 1250 - 1050 °C; Zona 2: 1050 - 850 °C.



Fonte: Adaptado de (HOSSEINI et al., 2016).

8

A presença dessas fases ricas em nitretos de cromo, corrobora para o detrimento das propriedades do aço, dado à diferença de proporções de ferrita e austenita, além de possuírem características cristalinas distintas do aço, o que impacta na sua fragilização (NILSSON, 1992).

## Processos de Soldagem

### Soldagem a Arco Elétrico com Eletrodos Revestidos

O processo de soldagem com eletrodo revestido, ou *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) foi um dos primeiros processos de soldagem a arco elétrico. O processo é bem versátil, possibilitando a solda tanto de materiais ferrosos e não-ferrosos, sendo realizado pela fusão do material base através do calor gerado pelo arco elétrico mantido entre a ponta do eletrodo e a superfície do material a ser unido. O eletrodo utilizado no processo é consumível, de alma metálica e revestido por uma combinação de silicatos e outros materiais, como ligas metálicas, carbonetos, óxidos e celulose. O revestimento desempenha diversas funções no processo, tais como: promover estabilidade ao arco elétrico; proteger a poça de fusão através dos gases gerados na queima e da formação da escória; fornecer elementos de liga à poça de fusão; e purificar a solda pela difusão de agentes desoxidantes (SINGH, 2020).



### **Soldagem a Arco Elétrico com Arames Tubulares**

O processo de soldagem a arco elétrico com arames tubulares, também conhecido pela sua nomenclatura do inglês *Flux Cored Arc Welding* (FCAW), evolui a fusão das partes a serem unidas por meio do calor gerado pelo arco elétrico mantido entre o material de adição e a poça de fusão. A proteção da poça de fusão ocorre pela decomposição do fluxo contido no interior de um eletrodo tubular, podendo ou não ser suplementada por uma fonte de gás de proteção externa. O fluxo é uma combinação de diversos materiais em pó que, ao se decompor durante a soldagem, formam uma camada de escória que protege o cordão de solda de contaminações e garante o resfriamento da solda controlado (SINGH, 2020).

Em estudo conduzido por Pessoa (2015) sobre a metalurgia da junta soldada por FCAW de AISD UNS S32750 para energias de soldagem variando entre 0,7 kJ/mm e 2,0 kJ/mm, foi observado na zona de fusão (ZF), tanto para o preenchimento por deposição simples quanto por multipasses, uma microestrutura de matriz ferrítica e austenita nas formas alotriomórfica de contorno de grão, intragranular e Widmanstätten, bem como a existência de nitretos de cromo dispersos nos grãos de ferrita. Não foi constatada a presença da fase  $\sigma$  na zona termicamente afetada (ZTA), apenas no material base e em quantidades reduzidas, vinculada à condição do recebimento do material de estudo (PESSOA, 2015).

9

### **Soldagem a Arco Elétrico TIG**

O processo de soldagem a arco elétrico TIG (*Tungsten Inert Gas*), ou *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW), consiste na união de dois elementos a partir do calor gerado pelo arco elétrico entre a ponta de um eletrodo de Tungstênio não-consumível e a superfície da peça. Trata-se de um processo de soldagem por fusão, ou seja, ocorre a mudança de estado dos materiais a serem unidos. A poça de fusão é protegida por gases inertes (Argônio e Hélio, os mais utilizados), que além de proteger a poça de fusão, ajudam a estabilizar o arco elétrico, bem como interferem na profundidade de penetração da solda. Os parâmetros de soldagem variam conforme o material e a qualidade desejada da solda. A exemplo disso tem-se o uso de corrente alternada combinada ao Argônio, que auxilia na remoção de óxidos de materiais que formam filmes de passivação como o alumínio e os aços inoxidáveis (SINGH, 2020).

Em estudo conduzido por Hosseini et al. (2016) para avaliar o efeito dos ciclos térmicos na microestrutura de juntas soldadas por GTAW de AISD UNS S32750, com energia

de soldagem fixada em 0,37 kJ/mm e 0,87 kJ/mm, foi constatada a formação de uma microestrutura diferenciada em quatro regiões da ZTA: próximo a linha fusão observou-se a presença de nitretos de cromo; a região afastada cerca de 2 mm da borda de fusão apresentou-se livre de nitretos; entre 2-3 mm da linha de fusão, verificou-se a formação da fase  $\sigma$ ; e em regiões além dessas, não houve alteração do material base (HOSSEINI et al., 2016).

Ramkumar et al. (2016) utilizou três fluxos ativos distintos, sendo eles NiO, MoO<sub>3</sub> e SiO<sub>2</sub>, para estudar a soldabilidade do AISD UNS S32750 por GTAW. Foi observado que os fluxos não interferem na microestrutura resultante na zona termicamente afetada da junta soldada, a qual apresentou austenita nas formas alotriomórfica de contorno de grão, intragranular e Widmanstätten para todos os fluxos empregados (RAMKUMAR et al., 2016).

### **Soldagem por Fricção e Mistura Mecânica**

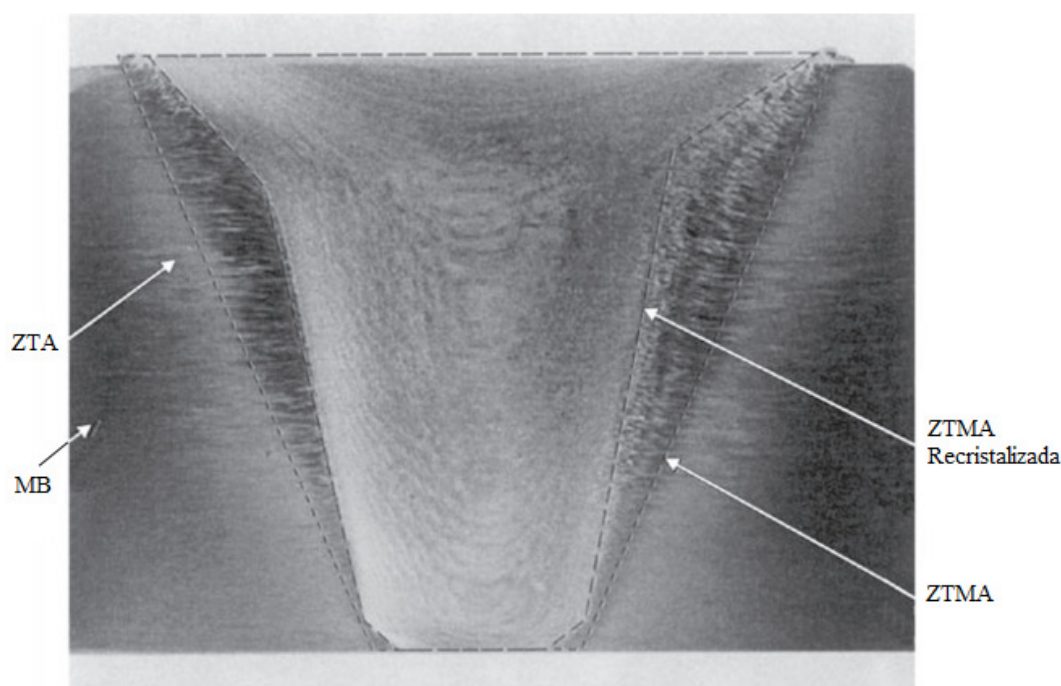
O processo de soldagem por fricção e mistura mecânica, *Friction Stir Welding* (FSW), consiste na união de dois elementos através de uma ferramenta não-consumível que promove a mistura das superfícies da junta por meio do movimento de rotação, assim produzindo calor por fricção e pela intensa deformação plástica, sem envolver mudança de estado das partes unidas. Em contraste aos processos de soldagem por fusão, as juntas obtidas por FSW diminuem a incidência de problemas decorrentes da solubilidade de gases e variação volumétrica, bem como minimiza as distorções e tensões residuais, proporcionando a tais uniões melhor desempenho quando sujeitas a esforços de fadiga, uso de novas técnicas na construção de equipamentos e união de chapas em uma ampla faixa de espessuras (COLLIGAN, 2010).

Em função da intensa força necessária para a mistura dos materiais, o processo FSW é todo mecanizado, elevando o custo do equipamento em relação aos processos convencionais de soldagem a arco elétrico e, portanto, diminuindo a interferência do operador na obtenção da junta soldada, assim como seu grau de habilidade (COLLIGAN, 2010).

A Fig. 2 representa a seção transversal de uma típica junta por FSW, no qual o material base cerca a solda por ambos os lados, sendo que no limite dessa região, o calor gerado durante o processo, não é suficiente para provocar alterações significativas nas propriedades do material base, ou seja, as propriedades do mesmo são idênticas as que possuía na condição do recebimento (COLLIGAN, 2010).

Mais adentro da junta está a zona termicamente afetada (ZTA), na qual a porção do material contida nessa zona, experimenta calor suficiente para promover mudanças em suas propriedades sem envolver a deformação de seus grãos. As propriedades tipicamente alteradas são de natureza mecânica: resistência, ductilidade e dureza. A ZTA também pode demonstrar propriedade corrosiva diferente do material base, pois em função dos parâmetros do processo, a energia térmica envolvida pode alcançar valores na ZTA capazes de promover a precipitação de fases indesejadas, como, fases deletérias em aços inoxidáveis duplex (COLLIGAN, 2010).

**Figura 2** – Seção transversal de junta por FSW - espessura 25,4 mm de Alumínio-Lítio 2195.



Fonte: Adaptado de (COLLIGAN, 2010).

A zona termomecanicamente afetada (ZTMA) compreende a porção de material que sofre tanto influência do aquecimento quanto da deformação plástica de seus grãos. A ZTMA pode ainda ser dividida em recristalizada e não-recristalizada, sendo que a primeira está sob maior efeito do calor e da deformação promovida pela ferramenta. No geral, o material na ZTMA recristalizada apresenta grãos mais refinados, e dependendo da solitação térmica, a ZTMA pode ser totalmente recristalizada ou totalmente não-recristalizada (COLLIGAN, 2010).

Giorjão et al. (2019), visando avaliar a microestrutura e as propriedades mecânicas de um tubo soldado por FSW, observou que a zona termicamente afetada (ZTMA) correspondente ao lado de avanço da ferramenta apresentou grãos intensamente deformados. Também verificou-se que o tamanho dos grãos de ferrita e austenita na zona de mistura eram menores do que do material base (MB), evidenciando a recristalização do material na região. No estudo, não foi observada nenhuma evidência de formação de fases deletérias, nem desbalanceamento de fases prejudiciais às propriedades do aço.

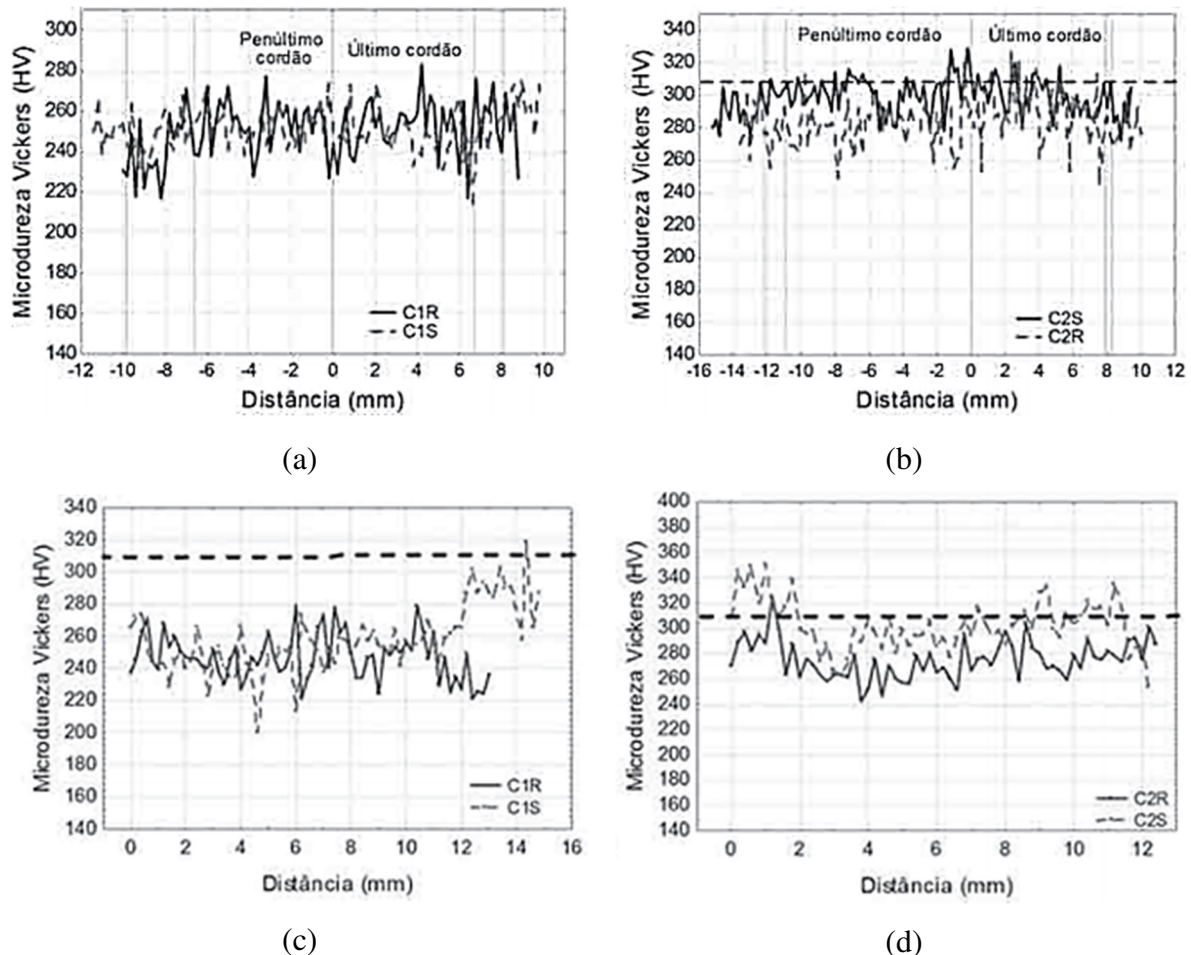
Sato et al. (2005), Santos et al. (2011) e Santos et al. (2013) conduziram estudos em juntas soldadas por fricção e mistura mecânica (FSW) para os mesmos aços inoxidáveis super duplex (AISD) e obtiveram conclusões sobre a microestrutura da junta semelhantes às de Giorjão et al. (SATO et al., 2005; SANTOS et al., 2011; SANTOS et al., 2013; GIORJÃO et al., 2019).

### **Ensaio de Microdureza e Fases Secundárias**

Considerando os limites apresentados na Tabela 3, a dureza esperada para o aço inoxidável super duplex UNS S32750 é de 298 HV, porém segundo os limites estabelecidos em normas a dureza esperada é de 330 HV, que é o limite aceitável para evitar problemas de corrosão sob tensão (PETROBRAS, 2006). Alterações microestruturais podem levar à variações dos valores de microdureza dado a formação de fases deletérias, conforme pode ser visto em estudos promovidos por Nunes et al. (2011) no aço inoxidável UNS S31803 para a soldagem de eletrodos revestidos AWS E2209-17 para dois níveis de energia distintos (condição C1 de 15 kJ/cm e condição C2 de 20 kJ/cm) com e sem restrição de soldagem para a formação de austenita Widmanstätten.

As juntas soldadas com esse tipo de austenita apresentaram níveis de microdureza menores e, em adição, o autor notou que durante o ensaio de microdureza do material mediu-se valores que excederam o limite aceitável de 310 HV conforme pode ser visto na Figura 3. Nunes et al, 2011 justificou como o principal motivo de tal discrepância, a formação de fases deletérias frágeis, apesar de não indicar quais seriam.

**Figura 3** – Perfil de microdureza (a) direção horizontal ao longo do passe de acabamento para a condição C1; (b) direção horizontal ao longo do passe de acabamento para condição C2; c) ao longo do metal de solda condição C1; e d) ao longo do metal de solda condição C2.



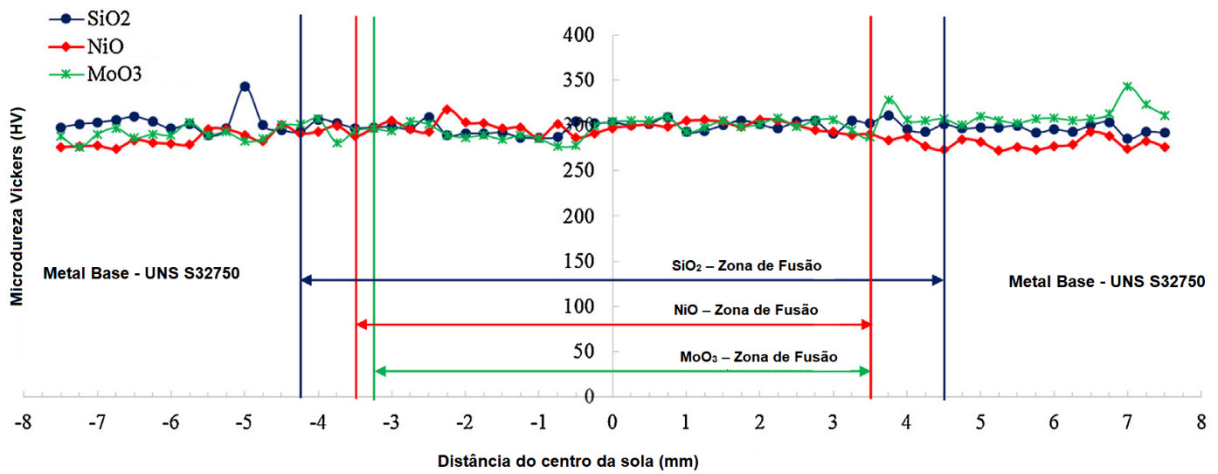
Fonte: Adaptado de (NUNES et al., 2011).

Estudos de Ramkumar et al. (2016) sobre o aço inoxidável super duplex UNS S32750 para soldagem A-TIG (*activated flux tungsten inert gas*), analisando a influência do uso de três diferentes fluxos, mostraram que o comportamento da microdureza do material se manteve praticamente constante, dado ao efeito promovido pela aplicação do fluxo junto a soldagem, como pode ser notado na Figura 4 (RAMKUMAR et al., 2016).

Trabalhos de Pessoa (2015) sobre o aço inoxidável superduplex UNS S32750 para a soldagem multipasses com arames tubulares, indicam que, quando aplicados os parâmetros necessários para soldagem, é possível evitar a formação de fases secundárias, o que se

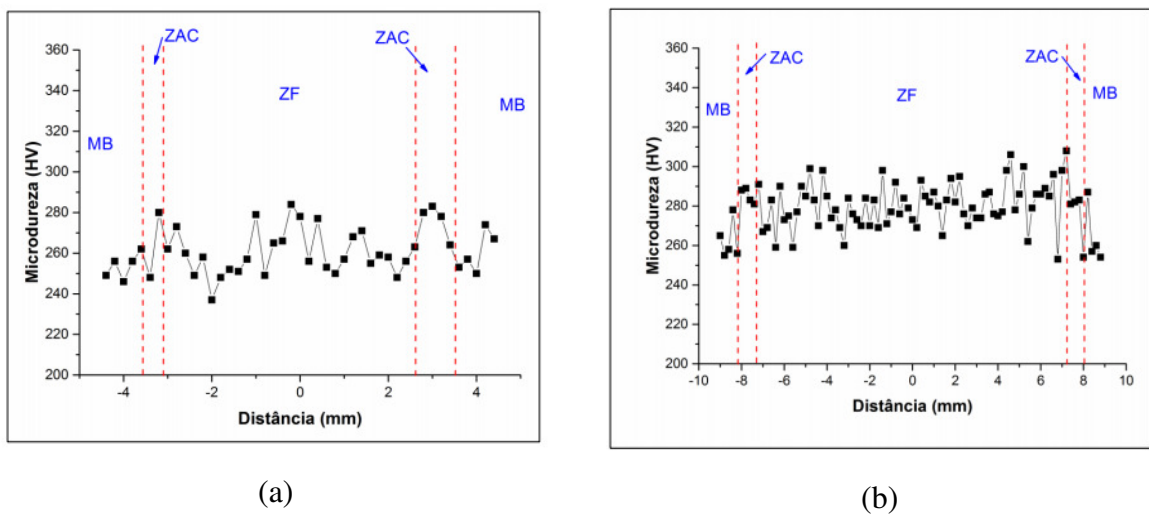
comprovou no perfil de microdureza obtido, no qual as variações não excederam o limite máximo aceitável, e que as variações mostrada na Figura 5, apontadas pelo autor como heterogêneas, se deram apenas devido a alternância de austenita e ferrita (Figura 6), dado às diferentes propriedades de ambos (PESSOA, 2015).

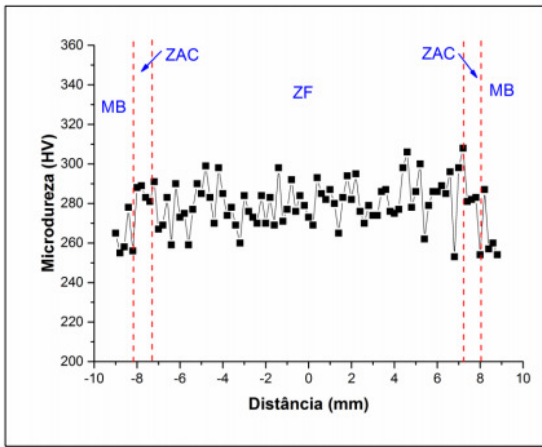
**Figura 4** – Perfil de dureza de soldagens do aço inoxidável super duplex UNS S32750



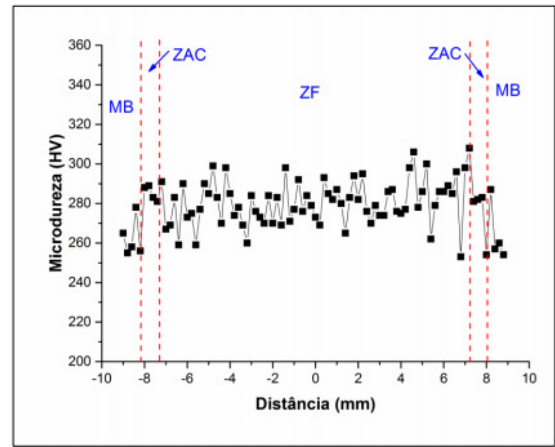
Fonte: Adaptado de (RAMKUMAR et al., 2016).

**Figura 5** – Perfil de microdureza (a) Raiz de ensaio; (b) Enchimento do ensaio; (c) Acabamento do ensaio; e (d) Linha vertical Raiz ao Acabamento do ensaio.





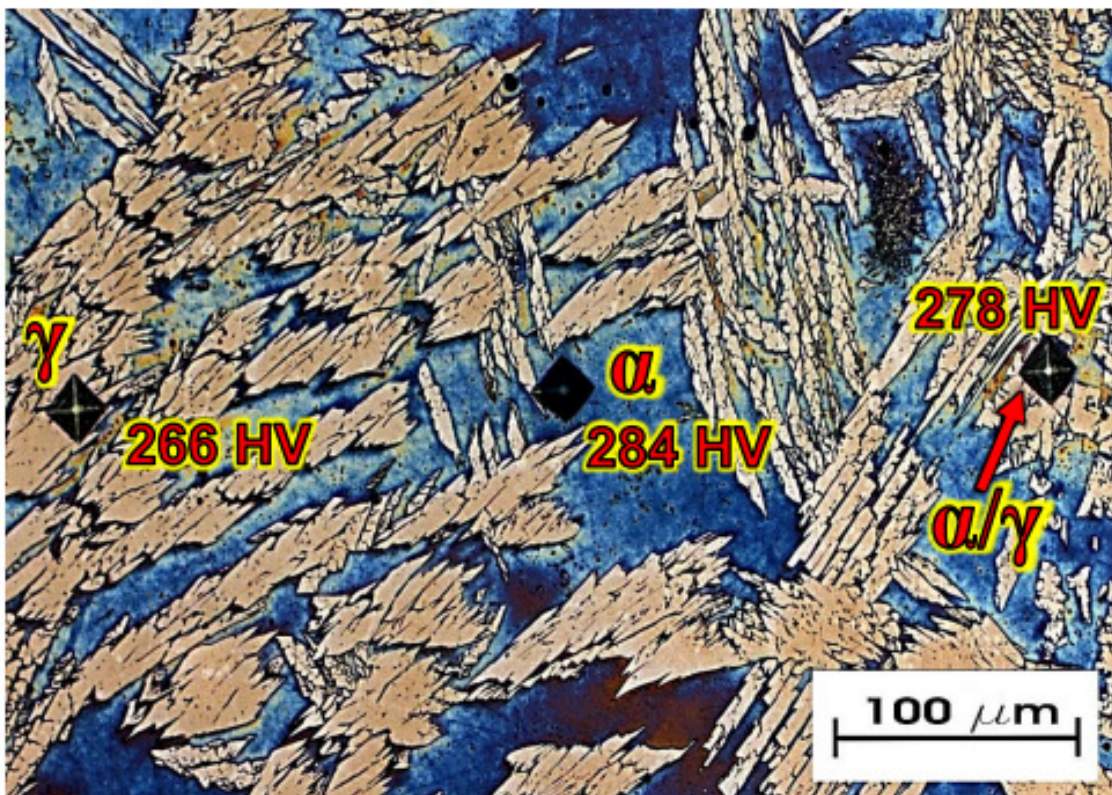
(c)



(d)

Fonte: Adaptado de (PESSOA, 2015).

Figura 6 - Micrografia exemplificando as três diferentes localizações das impressões de microdureza ao longo da linha H3 (Raiz do ensaio RJ1).



Fonte: Adaptado de (PESSOA, 2015).

## Conclusão

Diante das informações levantadas por meio de revisão de bibliográfica, pode-se concluir a respeito da aplicação de ensaio de microdureza Vickers na identificação de fases deletérias em juntas de AISD UNS S32750 soldadas pelos seguintes métodos:

- Soldagem com eletrodos revestidos: no preenchimento de juntas por multipasses, não houve formação de fases deletérias, apenas desbalanceamento de fases marcada pela distribuição de austenita na região do cordão de solda.
- Soldagem com arames tubulares: no preenchimento de juntas por deposição simples e multipasses, não houve a formação de fases deletérias. A variação da dureza ao longo da região do cordão de solda é justificada pelas alterações no balanceamento das fases, e pela formação de tipos diversos da fase austenita.
- Soldagem a arco elétrico TIG: no preenchimento de juntas soldadas por multipasses, houve a formação de nitreto de cromo próximo a linha de fusão e, mais próximo ao material base, de fase  $\sigma$ , sendo possível sua identificação através de pontos de maior dureza no perfil de microdureza. O uso de fluxo ativos no processo soldagem TIG evitou a formação de fases secundárias, porém foi contada a presença de austenita em diversas morfologias, sem grandes efeitos no perfil de dureza mostrado na Figura 7.
- Soldagem por fricção e mistura mecânica: na união de elementos por processo de soldagem sem a mudança de estado não houve formação de fases deletérias nem alterações o desbalanceamento de fases. O acréscimo da dureza na zona de mistura se deve a recristalização da porção de material sujeita a deformação intensa associada ao seu nível de solitação térmica, promovendo cordão de solda uma microestrutura balanceada de granulação refinada.

Resumindo, o ensaio de microdureza na identificação de fases deletérias foi eficaz para os processos de soldagem por fusão do material base, com exceção dos processos TIG combinado ao uso de fluxos ativos, de arame tubular e de eletrodo revestido, onde não há a formação dessas. Cabe ressaltar que os efeitos dos parâmetros de soldagem na qualidade do cordão de solda são significativos, podendo apresentar microestruturas distintas às mencionadas na revisão em função da alteração desses parâmetros.



## Referências

- CANDEL, E. H. P. **Soldagem dos aços inoxidáveis superduplex UNS S32750 e UNS S32760**. Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais—São Paulo: Universidade de São Paulo, 5 out. 2016.
- CHIAVERINI, V. Aços e ferros fundidos. 7 ed. **Editora Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais—ABM**, 2008. 599p.
- COLLIGAN, K. J. The friction stir welding process: an overview. In: **Friction Stir Welding**. [s.l.] Elsevier, 2010. p. 15–41.
- DANDEKAR, T. R. et al. Shielded metal arc welding of UNS S32750 steel: microstructure, mechanical properties and corrosion behaviour. **Materials Research Express**, v. 5, n. 10, p. 106506, 22 ago. 2018.
- GIORJÃO, R. A. R. et al. Microstructure and mechanical properties of friction stir welded 8 mm pipe SAF 2507 super duplex stainless steel. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, n. 1, p. 243–249, jan. 2019.
- HOSSEINI, V. A. et al. Influence of multiple thermal cycles on microstructure of heat-affected zone in TIG-welded super duplex stainless steel. **Welding in the World**, v. 60, n. 2, p. 233–245, mar. 2016.
- NILSSON, J. O. Super duplex stainless steels. **Materials Science and Technology**, v. 8, n. 8, p. 685–700, ago. 1992.
- NUNES, E. B. et al. Estudo dos efeitos da restrição na microestrutura, microdureza e tenacidade em juntas soldadas em aço inoxidável duplex. **Soldagem & Inspeção**, v. 16, n. 2, p. 156–164, jun. 2011.
- OLAYA LUENGAS, L. **Simulação física e caracterização microestrutural e mecânica da zona termicamente afetada (ZTA) em aços inoxidáveis duplex**. Doutor em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos—Rio de Janeiro, Brasil: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 29 set. 2017.
- PETROBRAS. Technical Specification: General Requirements in Using Duplex and Super Duplex Stainless Steel for Subsea Pipelines. CENPES - PETROBRAS. 2006.
- PESSOA, A. R. P. Soldagem em chapas de aços inoxidáveis superduplex uns s32750 utilizando o processo arame tubular. p. 271, 2015.
- RAMKUMAR, K. D. et al. Studies on the structure–property relationships and corrosion behaviour of the activated flux TIG welding of UNS S32750. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 23, p. 231–241, ago. 2016.
- SANTOS, T. F. A. et al. Microstructure evaluation of UNS S32205 duplex stainless steel friction stir welds. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 66, n. 2, p. 187–191, jun. 2013.
- SANTOS, T. F. A. et al. Correlating microstructure and performance of UNS S32750 and S32760 superduplex stainless steels friction stir welds. **The Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference**. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2011.

SANTOS, Tiago FA et al. Correlating microstructure and performance of UNS S32750 and S32760 superduplex stainless steels friction stir welds. In: **The Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers**, 2011.

SATO, Y. S. et al. Microstructure and mechanical properties of friction stir welded SAF 2507 super duplex stainless steel. **Materials Science and Engineering: A**, v. 397, n. 1–2, p. 376–384, abr. 2005.

SINGH, R. Welding and joining processes. In: **Applied Welding Engineering**. [s.l.] Elsevier, 2020. p. 157–186.

VERMA, J.; TAIWADE, R. V. Effect of welding processes and conditions on the microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of duplex stainless steel weldments—A review. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 25, p. 134–152, jan. 2017.

ZEMPULSKI, P. R. S. **Correlação de propriedades eletroquímicas da fase sigma com propriedades mecânicas e metalográficas em aços inoxidáveis duplex SAF2205**. Mestrado em Engenharia Mecânica – Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 26 ago. 2011.