
ANÁLISE TOPOGRÁFICA DE TRINCA DE CORROSÃO SOB TENSÃO EM AÇO AISI 304L: ESTUDO DE CASO

Jan Vataavuk*

Sônia Braunstein Faldini**

Resumo

O presente trabalho realiza uma discussão geral a respeito do fenômeno de corrosão sob tensão em aços inoxidáveis austeníticos com especial atenção no que se refere à trajetória da trinca e seus aspectos topográficos. A apresentação está baseada em um estudo de caso, no qual se desenvolveu uma cuidadosa técnica de análise topográfica em microscópio eletrônico de varredura, com o objetivo de averiguar a real topografia da trinca buscando-se imagens muito próximas das produzidas por fratura induzida propositalmente por ocasião da separação das faces de fratura. Realiza-se também uma comparação entre a superfície de fratura gerada por corrosão sob tensão na liga austenítica estudada com uma fratura por clivagem em aço inoxidável ferrítico, sempre mediante a técnica de microscopia eletrônica de varredura.

* Universidade Presbiteriana Mackenzie. Escola de Engenharia – Departamento de Engenharia de Materiais.

E-mail: janvatavuk@uol.com.br

** Universidade Presbiteriana Mackenzie. Escola de Engenharia – Departamento de Engenharia de Materiais.

E-mail: soniafal@uninet.com.br

Abstract

A general discussion about austenitic stainless steel stress corrosion cracking phenomena is carried out concerning some topographic aspects as well as crack trajectory pattern. The presentation was conducted through a carefully scanning electron microscope fracture analysis to obtain the real topography due to the stress corrosion cracking phenomena. The analysis was conducted in the borderline between the stress corrosion cracking fracture and that produced during fracture surface separation. The main similarities between stress corrosion cracking surface and cleavage in ferritic stainless steel are presented and discussed in terms of topographic characteristics.

1 INTRODUÇÃO

Existem condições ambientais nas quais aços inoxidáveis austeníticos, sujeitos a tensões residuais, aplicadas ou de ação combinada, mesmo inferiores ao limite de elasticidade, apresentam trincas geralmente seguidas pela fratura do componente. Esse fenômeno é conhecido como corrosão sob tensão ou corrosão sob tensão fraturante, caso ocorra fratura. O efeito sinérgico corrosão/tensões é evidente, uma vez que não se observa corrosão no material submetido a apenas um dos fatores (tensões ou meio ambiente). As tensões podem ser oriundas de solicitações em serviço, trabalhos a frio, soldagens e tratamentos térmicos, sendo mínima a perda de massa do material^{1, 3}.

Conforme Wolyne, a corrosão sob tensão ocorre nos metais de maneira frágil, mesmo em metais com comportamento dúctil. A fratura é caracterizada por duas zonas distintas. A primeira tem aspecto escuro por causa da corrosão e ocorre com o crescimento das trincas; a segunda é brilhante, pois não sofre ataque corrosivo⁶.

Os aços inoxidáveis austeníticos são propensos ao fenômeno de corrosão sob tensão, cuja ocorrência apresenta conseqüências sérias aos equipamentos, inviabilizando muitas vezes a realização de reparos. As trincas geradas por esse processo ramificam-se e crescem, dificultando a determinação de sua real extensão, bem como a localização de seu real final. Segundo Fontana, as trincas apresentam, de uma maneira geral, caráter macroscópico frágil e podem ser do tipo intergranular, transgranular, misto ou iniciar com um tipo e propagar com outro⁷.

A direção preferencial de propagação da trinca é perpendicular à direção das tensões. A corrosão sob tensão dos aços inoxidáveis austeníticos pode ser fortemente acelerada quando ocorre a precipitação de carbonetos ricos em cromo nos contornos de grão (sensitização), ocorrendo uma mudança de trajetória da trinca de transgranular para intergranular. A trajetória da trinca e sua mudança é também função da estrutura do metal e do ambiente no qual ocorre a corrosão sob tensão. Esses fatos são identificados principalmente em ligas de latão e Fe-Cr com alto teor de níquel. Nos aços inoxidáveis austeníticos não-sensitizados, a fratura é habitualmente de caráter transgranular, podendo ser de forma intergranular em aços sensitizados e nas ligas austeníticas em meios contendo hidróxido de sódio, mesmo quando não-sensitizados.

O exame da Figura 1 indica o caráter transgranular desse fenômeno, valendo observar a exacerbada ramificação da trinca, que constitui um aumento da dificuldade para encontrar seu final.



Figura 1 Trinca de corrosão sob tensão em aço 304, ataque oxálico eletrolítico (400x)

O mecanismo responsável pela corrosão sob tensão não é conhecido de forma completa, porém existem evidências de que essas trincas tenham início em concentradores de tensão, os quais podem ser de natureza geométrica ou metalúrgica. A literatura aponta como entalhe metalúrgico importante na nucleação da corrosão sob tensão o ataque químico localizado conhecido como “pite”, que pode agir como concentrador de tensões. É muito difícil definir com exatidão a tensão aplicada, por estar altamente localizada num defeito superficial ou interno e num pite de corrosão.

Alguns autores observaram trincas de corrosão sob tensão não associadas a pites. Inclusões, microtrincas ou outros defeitos no filme passivo ou mesmo no material ativo podem ser caminhos localizados preexistentes. Em materiais metálicos policristalinos, um dos principais caminhos de nucleação e formação da trinca é o contorno de grão^{1,5}.

A redução/eliminação das tensões residuais de tração advindas de processo de fabricação assume importância fundamental no sentido de se evitar a ocorrência da corrosão sob tensão, já que muitas vezes as tensões de tração de projeto são baixas em relação às causadas pelos processos de deformação impostos durante a fabricação de componentes e podem estar próximas do limite de escoamento, como ocorre em soldagens.

Outra possibilidade prática de minimizar a corrosão sob tensão é mediante a introdução de tensões residuais de compressão na superfície da peça, como, por exemplo, pelo processo de jateamento com granalhas de aço ou mesmo processos dessa natureza de menor energia mecânica⁸.

Sob o ponto de vista tradicional da engenharia, é normalmente aceito que a presença de íons cloreto, em ambientes aquosos e úmidos, é responsável pela corrosão sob tensão de aços inoxidáveis. A dependência da temperatura e da concentração dos íons cloreto é um fator controlador desse tipo de corrosão; em temperaturas a partir de 50°C e em solução contendo de 2,5 a 4mg/L de cloreto, o aço inoxidável austenítico (Fe -18 Cr – 10Ni) começa a trincar. Em temperaturas inferiores a 40°C, esse fenômeno ocorre em concentrações acima de 5mg/L⁴.

Zanetic² estudou o comportamento do aço inoxidável AISI 304L, em solução de cloreto de magnésio 40% a 155°C (de acordo com a ASTM G30), verificando maior resistência desse aço à corrosão sob tensão, quando comparado ao aço inoxidável AISI 304 nas mesmas condições – o tempo para surgir uma fratura no AISI 304 foi cerca de quatro horas, enquanto no AISI 304L só houve crescimento de trincas cerca de 86 horas depois.

Quanto aos aspectos topográficos da propagação dessas trincas, poucas são as evidências apresentadas pela literatura, pois mesmo as observações que fazem uso de tecnologias de caracterização mais sofisticadas, como a microscopia eletrônica de varredura, são prejudicadas pelos produtos de corrosão gerados durante o processo e depositados na superfície de fratura. A topografia real da face de fratura fica coberta pelos produtos gerados no processo corrosivo, dificultando o exame minucioso do mecanismo de propagação.

O presente trabalho baseia-se em estudo de caso prático de falha pelo mecanismo de corrosão sob tensão fraturante e tem como objetivo principal o desenvolvimento de uma metodologia pela qual se pretende descrever, de forma mais detalhada, o mecanismo e aspectos topográficos da propagação transgranular de trincas advindas desse processo em aço inoxidável austenítico. Para tanto, foi feita uma cuidadosa caracterização da topografia dessa trinca em superfícies de fratura separadas de componente que sofreu falha em campo, observando-se a variação topográfica da superfície no limiar entre a trinca desenvolvida em campo e a produzida propositalmente. A intensa investigação da topografia nesse limiar por meio da técnica de microscopia eletrônica de varredura permitiu, após um demorado período de observação, encontrar uma região com quantidade suficientemente pequena de produtos de corrosão na superfície de fratura, a ponto de se obter uma imagem representativa da real topografia gerada pelo processo de falha em estudo.

2 TÉCNICA EXPERIMENTAL

O material analisado corresponde a uma tubulação de água industrial, cujas condições de operação compreendem água de processo contendo 14 ppm de cloretos e temperatura de trabalho entre 100 e 110°C. O material com o qual foi confeccionado o tubo corresponde à liga AISI 304 L, cuja composição nominal pode ser vista na Tabela 1 a seguir.

TABELA 1

Composição química nominal da liga

C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S
0,03 max	2,00	1,00	18,00-20,00	8,00-10,50	0,045 max	0,030 max

A observação visual dos tubos indicou a presença de trincas superficiais advindas de um processo de corrosão sob tensão. Para a realização de observações do modo de propagação dessas trincas, procedeu-se à abertura mecânica destas, produzindo separação total das duas superfícies de fratura.

Vale lembrar que os aços inoxidáveis austeníticos apresentam, de forma freqüente, mecanismo de fratura dúctil quando submetidos a esforços não-cíclicos que resultem em rompimento do componente. Esse comportamento permite a percepção do limiar dos mecanismos de fratura (corrosão sob tensão/fratura dúctil por sobrecarga mecânica).

Após a separação total das faces de fratura, levou-se uma das superfícies de fratura ao microscópio eletrônico de varredura. As observações nele realizadas tiveram dois objetivos, a saber:

- descrever a face de fratura em região submetida ao meio por certo tempo, de tal modo que nela se pudesse realizar a análise por dispersão de energia com produtos de corrosão em espessura suficiente para se tornar sensível a essa técnica experimental;
- realizar extensa observação no limiar entre a superfície de fratura gerada mecanicamente e aquela produzida pelo mecanismo de corrosão sob tensão, objetivando encontrar regiões ainda não contaminadas com produtos de corrosão e que possam ser representativas da real topografia da face de fratura gerada pelo mecanismo.

A título de comparação, utilizou-se uma fotografia de face de fratura por clivagem, vista por microscópio eletrônico de varredura com a técnica de elétrons

secundários, de um aço inoxidável ferrítico solubilizado e envelhecido, para se estabelecer alguns pontos em comum com a imagem obtida na superfície da liga em estudo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, apresentam-se os resultados obtidos em observações realizadas através de microscopia eletrônica de varredura.

A Figura 2 mostra a superfície de fratura como um todo, contendo tanto a região gerada pelo mecanismo de corrosão sob tensão como a fratura ocasionada por sobrecarga mecânica.

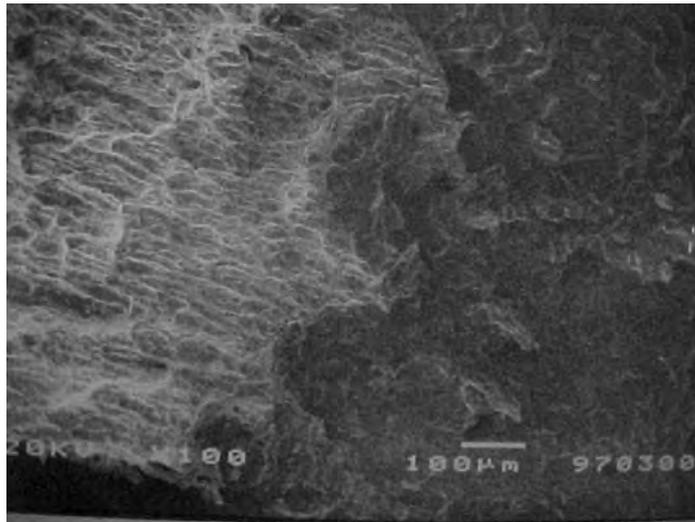


Figura 2 Imagem de elétrons secundários. A região escura corresponde à propagação pelo mecanismo de corrosão sob tensão. A área clara é para fratura por sobrecarga mecânica.

O exame da figura acima indica, de forma clara, a presença de dois mecanismos distintos de fratura, com fratura plástica (presença de alvéolos ou *dimples*) na região clara, e uma região mais escura, com apreciável ataque superficial pelos agentes corrosivos do meio no qual trabalhou o tubo.

A Figura 3 corresponde a observações na região do limiar dos mecanismos de fratura do lado da superfície ocasionada por sobrecarga mecânica.

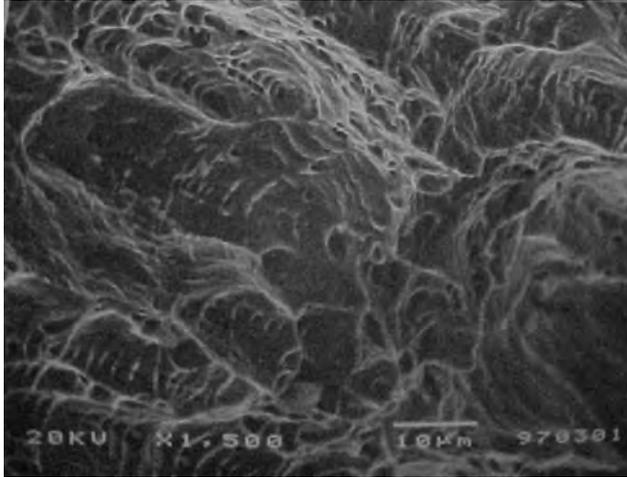


Figura 3 Imagem de elétrons secundários. Setas indicando *dimples* de rasgamento (tear dimples) gerados por sobrecarga mecânica.

A Figura 3 indica a presença de *dimples* de rasgamento, o que está em perfeita concordância com o mecanismo de fratura plástica na ponta de uma trinca, que nesse caso propagou-se da esquerda para a direita de cima para baixo.

O exame da face de fratura na região de corrosão sob tensão longe do limiar entre os dois mecanismos de fratura está apresentado na Figura 4.

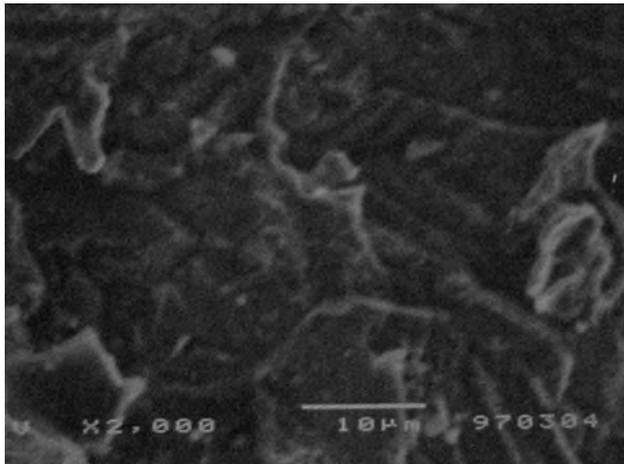


Figura 4 Imagem de elétrons secundários da face de fratura em região atacada pelo ambiente corrosivo

A região apresentada nessa figura corresponde à superfície sujeita à ação do meio ambiente corrosivo e encontra-se repleta de produtos de corrosão, cuja análise química obtida pelo sistema de dispersão de energia acoplado ao microscópio eletrônico de varredura pode ser vista no espectro apresentado na Figura 5.

Cursor: 0.000 keV = 0

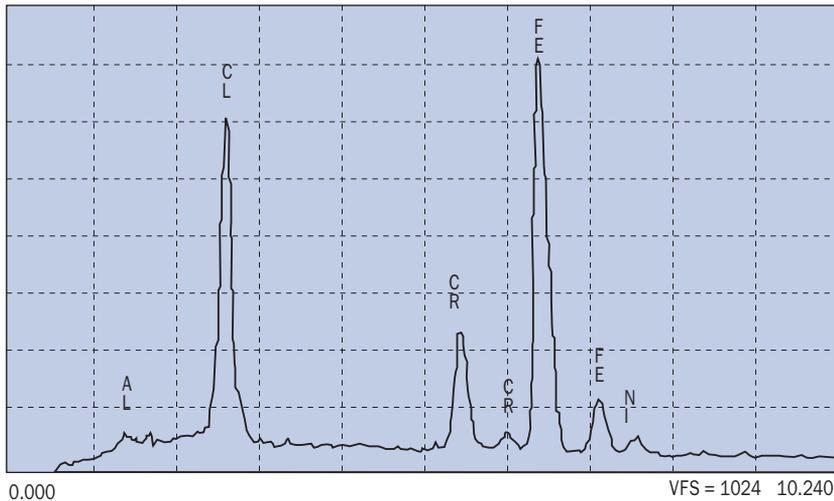


Figura 5 Espectro de dispersão de energia correspondente à superfície de fratura apresentada na Figura 4

O exame do espectro apresentado na Figura 5 indica a presença de cloro, elemento químico associado aos fenômenos de corrosão sob tensão dessas ligas e presente na água industrial utilizada neste sistema. O ferro e o cromo presentes nessa análise dizem respeito à composição química do aço estudado, pois o volume excitado pelo feixe eletrônico do microscópio eletrônico de varredura atinge profundidades superiores à espessura da camada de compostos de corrosão.

Após extensiva observação ao microscópio eletrônico de varredura na região de limiar entre a fratura provocada e a gerada pelo processo de corrosão sob tensão, conseguiu-se localizar uma região de superfície de fratura com baixíssimo nível de contaminação, do lado correspondente à seta 1 da Figura 2. Esta imagem de elétrons secundários pode ser vista na Figura 6.

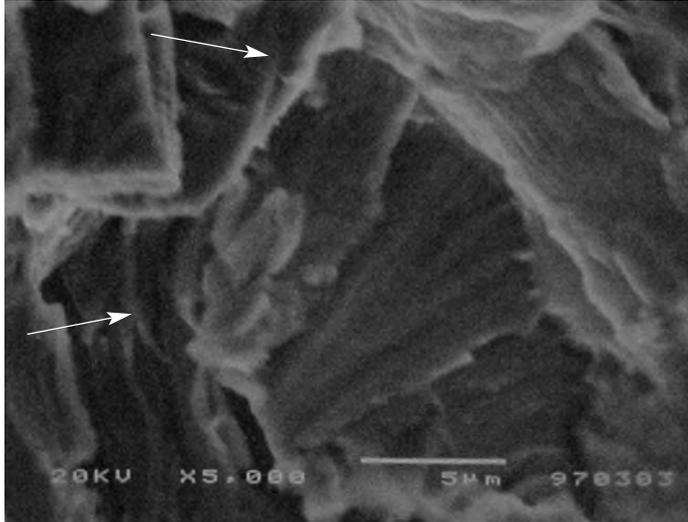


Figura 6 Imagem de elétrons secundários. “Facetas de clivagem” com “rios de clivagem”.

O exame da Figura 6 indica aspectos topográficos muito semelhantes aos da clivagem de aços ferríticos quando submetidos a condições que acarretem comportamento frágil, mostrando facetas e rios de clivagem que convergem no sentido de propagação da trinca nesse local. A título de comparação, a Figura 7 corresponde a uma imagem obtida também por microscopia eletrônica de varredura, por meio de elétrons secundários, em uma superfície de fratura de um aço inoxidável ferrítico Fe – 17 Cr – 2 Ni-0,8 Nb solubilizado a 1100°C e envelhecido por duas horas, a 600°C, que rompeu pelo mecanismo de fratura por clivagem após deformação da ordem de 2 % em ensaio de tração.

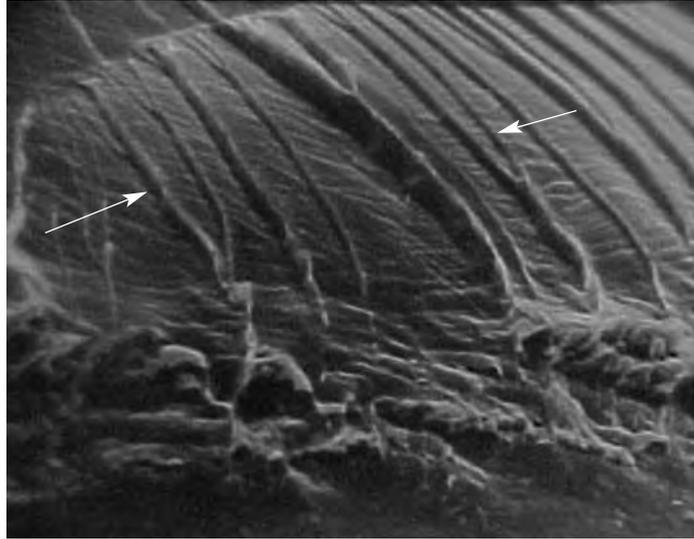


Figura 7 Imagem de elétrons secundários. Superfície de fratura por clivagem de um aço inoxidável ferrítico Fe – 17 Cr – 2 Ni – 0,8 Nb. Observa-se a presença de rios de clivagem. (Aprox. 1500x).

O exame das Figuras 6 e 7 permite estabelecer uma comparação direta entre as topografias geradas pelo processo de clivagem em aço inoxidável ferrítico (Figura 7) com os aspectos superficiais da trinca gerados pelo fenômeno de corrosão sob tensão da liga austenítica. Note-se a presença de facetas associadas aos grãos e, principalmente, algumas nuances, como os rios de clivagem bastante evidentes na liga ferrítica, e menos para a superfície de fratura gerada na liga austenítica. Vale salientar que, apesar da semelhança topográfica, existem algumas diferenças de caráter fundamental entre as trincas acima observadas, como, por exemplo, a velocidade de propagação, que pode ser pelo menos nove ordens de grandeza superior no processo de clivagem da ferrita em relação à corrosão sob tensão nos inoxidáveis austeníticos. Outro fator que deve também ser considerado diz respeito à ramificação das trincas, muito mais acentuada na corrosão sob tensão. A Figura 1 apresentada no início deste texto ilustra a acentuada ramificação das trincas de corrosão sob tensão.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A técnica de microscopia eletrônica permitiu determinar a composição química dos produtos de corrosão da face de fratura, indicando o cloro como principal elemento.

Com a separação das faces de fratura, observaram-se duas regiões distintas, uma com fratura plástica (presença de alvéolos ou *dimples*) e uma região mais lisa com apreciável ataque superficial pelos agentes corrosivos do meio no qual trabalhou o elemento.

As observações no limiar entre os dois mecanismos de fratura permitiram verificar a real topografia da superfície de fratura gerada pelo processo de corrosão sob tensão.

Por comparação com um aço inoxidável ferrítico, Fe – 17 Cr – 2 Ni-0,8 Nb, solubilizado a 1100°C e envelhecido por duas horas, a 600°C, que rompeu pelo mecanismo de fratura por clivagem após deformação da ordem de 2 % em ensaio de tração, verificou-se que a superfície de fratura gerada pelo processo de corrosão sob tensão no aço austenítico AISI 304L é similar à produzida pelo processo de clivagem.

REFERÊNCIAS

1. *METALS HANDBOOK*. Ninth Edition. – *Corrosion*. ASM International, 1998, v. 13, p. 145-149.
2. ZANETIC, S. 1997. Estudo da susceptibilidade, à corrosão, sob tensão fraturante dos aços inoxidáveis austeníticos, ABNT 304 e 304L em solução de cloreto de magnésio pelo método do Corpo de Prova Dobrado em U. Dissertação (Mestrado) – Universidade Presbiteriana Mackenzie, Pós-graduação em Engenharia de Materiais. São Paulo, 1997, p. 52-54.
3. GENTIL, V. *Corrosão*. 4. ed. LTC, 2003. p. 149-150.
4. GEMELLI E. *Corrosão de materiais metálicos e sua caracterização*. LTC, 2001. p. 69.
5. FONTANA, M. G. *Corrosion engineering*. Third Edition. New York: McGraw-Hill, 1987. p. 109-142.
6. WOLYNEC, S. *Corrosão e proteção contra a corrosão de metais*. São Paulo: Publicação IPT, 1990. p. 218-222.

7. FONTANA, M. G. *Corrosion engineering*. Third Edition. New York: McGraw-Hill, 1987. p. 369.
8. STAINLESS STEELS. ASM Specialty Handbook. The materials information society, 1994.
9. JAN VATAVUK. *Estudo sobre efeito do nióbio na resposta ao tratamento térmico de ligas Fe-17Cr, Fe-17Cr-Ni e do níquel e cromo na solubilidade do nióbio na ferrita*. 1986. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1986.
10. BÔRRO JUNIOR, Adayr. *Efeito da deformação plástica a frio nas propriedades mecânicas da solda e aço ABNT 409 estabilizado com Ti e N*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Mackenzie, 1996.

INSTITUTO PRESBITERIANO MACKENZIE

Entidade Mantenedora

CONSELHO DELIBERATIVO

Presidente Adilson Vieira

ADMINISTRAÇÃO GERAL

Diretor-Presidente Custódio Pereira

Diretor Administrativo Gilson Alberto Novaes

Diretor Educacional Nilson de Oliveira

Diretor Financeiro Antonio Bonato

Diretor de Recursos Humanos Jared Ferreira Toledo Silva

EDITORA MACKENZIE

Coordenação Editorial e Gráfica Silvana Schultze

————— COMISSÃO EDITORIAL DO INSTITUTO PRESBITERIANO MACKENZIE —————

Fernando Santos Kerr – Editora Mackenzie

Rev. Milton Ribeiro – Vice-Reitoria

Nilson de Oliveira – Diretoria Educacional

Ricardo Quadros Gouvêa – Faculdade de Teologia