



PROCEDIMENTOS PARA DETERMINAR A CURVA REAL DE TENSÃO-DEFORMAÇÃO DO AÇO CARBONO USANDO A TÉCNICA A.C.P.D.

Mathews Lima dos Santos ¹
Heleno da Costa Neto ²
João Vitor de Queiroz Marques ³

RESUMO

Os ensaios mecânicos são de extrema importância para um projeto de engenharia a partir do momento em que por meio destes é garantida a resistência do material aos esforços e condições aos quais o mesmo será solicitado. No contexto dos aços o ensaio de tração é o mais comum. No entanto, os atuais métodos de obtenção e leitura destas informações não expressam a realidade da resposta do material, induzindo aos projetistas o uso de valores convencionais. Aliando-se à busca cada vez crescente pela maior precisão das informações obtidas, utilizando-se de uma técnica aparentemente ainda não direcionada para tal fim, o presente trabalho objetiva plotar uma curva tensão-deformação real em ensaio de tração através do uso da técnica de queda de potencial em corrente alternada (ACPD), bem como averiguar a eficiência da mesma por meio da comparação entre o perfil desta com o da curva convencional e o da curva real obtida pelo método matemático. O estudo mostrou-se bastante promissor, pois os experimentos revelaram uma boa estimativa da curva tensão-deformação real.

Palavras-chave: ACPD, Ensaio de Tração, Curva Tensão-Deformação Real.

INTRODUÇÃO

Os aços, que são essencialmente ligas ferro-carbono [1], por possuir propriedades mecânicas de interesse para a engenharia, custo relativamente baixo e suscetibilidade a processos de transformação da matéria em produto acabado; além de serem propícios a uma variada gama de operações a fim de ajustar as propriedades dos materiais, constituem a maior parte das peças metálicas – como eixos, parafusos, engrenagens e ferramentas; bem como os materiais estruturais mais aplicados – a exemplo de vergalhões para concreto armado.

Devido ao seu custo-benefício, o aço ao carbono SAE 1020 é um dos mais utilizados comercialmente. Suas principais aplicações são na fabricação de chapas e tubos, além das indústrias automobilística, ferroviária e naval.

¹ Mestrando do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, mathewslimads@gmail.com;

² Mestrando do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, netohelleno@gmail.com;

³ Professor orientador: Mestre, Instituto Federal da Paraíba - IFPB, joao.marques@ifpb.edu.br



É imprescindível ao engenheiro possuir ciência dos princípios gerais que governam as propriedades dos materiais [2], haja vista a necessidade de garantir a aplicabilidade de um material em determinada situação. No intuito de determinar as propriedades mecânicas de um material, são realizados, com o auxílio de equipamentos, ensaios mecânicos, os quais, em sua maior parte, possuem resultados expressos numericamente, permitindo a comparação com valores estabelecidos em normas.

O mais comum dos ensaios mecânicos é o ensaio de tração. Entretanto, quando da execução do mesmo, devido à dificuldade de avaliar e quantificar a redução instantânea da área da seção transversal do corpo de prova, é comum obter-se a denominada curva tensão x deformação convencional, ou seja, um gráfico aproximado da realidade, mas que apresenta valores sujeitos a erros.

Nesse contexto, o ensaio de tração real foi desenvolvido para obter maior precisão, visto que este se baseia nos valores instantâneos da seção transversal do elemento ensaiado e da base de medida para o alongamento [3]. Para tal, diferentes técnicas são desenvolvidas para determinar com maior precisão a curva tensão x deformação real. Todavia, os métodos atualmente conhecidos possuem severas limitações.

Dentre as formas mais comuns, a primeira é a medição da área inicial e, de tempos em tempos, as áreas mínimas intermediárias, enquanto há o aumento gradual da carga. O presente método apresenta como principais limitações a baixa velocidade do ensaio, a necessidade de ensaiar o material à temperatura ambiente e a possibilidade de erro humano quando da identificação da área mínima e na obtenção dos valores.

O segundo método, por sua vez, é utilizando expressões que correlacionam as tensões e deformações reais – ou modelo matemático. A terceira forma mais comum é a medição de diversos diâmetros em diferentes regiões de um corpo de prova usinado especificamente para tal fim. Neste caso, anota-se a carga máxima e a carga de ruptura e determina-se as tensões e deformações máximas até a carga máxima e até a ruptura. A maior das limitações desse método é a difícil usinabilidade do corpo de prova, podendo conduzir a erros relativamente altos nos resultados obtidos.

Uma técnica bastante difundida no âmbito dos ensaios mecânicos é o uso da queda de potencial em corrente alternada para avaliar defeitos, descontinuidades, propagação de trincas, meios isotrópicos, anisotropia magnética [4,5] entre outros. No entanto, não foi encontrado na bibliografia corrente um estudo sobre a aplicabilidade desta técnica para analisar o processo de estrição de um corpo de prova submetido ao ensaio de tração.



Ensaio de Tração

Por ser um procedimento que fornece uma série de informações, abrangente, simples e de realização rápida, o ensaio mecânico de tração é o mais utilizado na análise das propriedades e comportamento dos materiais. Este teste consiste em puxar de forma lenta e gradual uma amostra – denominada corpo de prova – de material com uma carga axial até que ela se quebre [6].

O ensaio de tração oferece, além do gráfico tensão-deformação, informações como módulo de elasticidade, tensão limite de escoamento, tensão limite de resistência e tensão de ruptura [3]. Durante o ensaio, a tensão é dada pela força aplicada sobre a área da seção transversal do corpo de prova, área esta que é considerada constante devido à dificuldade em precisar os valores instantâneos - haja vista que, quando atingida a carga máxima, há uma crescente redução percentual da área da seção transversal no local onde a ruptura ocorrerá [7]. Por outro lado, para avaliar a variação do comprimento do corpo de prova, são medidos o comprimento inicial e o comprimento instantâneo – alongamento – dividido pelo comprimento inicial, obtendo-se um percentual denominado deformação relativa [8].

Em síntese, a descrição feita acima permite estabelecer a tensão e a deformação de engenharia, ou convencional, as quais são definidas como:

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

$$\varepsilon_c = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

em que: σ_c - Tensão convencional (Pa); P – Carga aplicada (N); S_0 - Seção transversal original (m^2); ε_c - deformação convencional (adimensional); L_0 – Comprimento inicial de referência (carga zero) (m); L – Comprimento para cada carga P aplicada (m); ΔL – Alongamento (m)

Contudo, reconhece-se que as informações oriundas do ensaio de tração convencional em materiais dúcteis não oferecem uma indicação tão precisa quanto por vezes é desejável acerca da deformação do metal, por estarem baseadas na seção inicial do corpo de prova, medida antes do início da realização do teste.

Em decorrência da tensão uniaxial aplicada, as dimensões do corpo de prova, principalmente na zona plástica, mudam a cada instante ao longo do ensaio, fazendo com que, visando obter, a curva tensão-deformação real, seja necessário levar em conta a área instantânea do elemento ensaiado. Para tal, utilizando-se a técnica matemática, a tensão real e a deformação real são dadas a seguir [9]:

$$\bar{\sigma} = \sigma_c (\varepsilon_c + 1) \quad (3)$$



$$\bar{\varepsilon} = \ln(\varepsilon_c + 1) \quad (4)$$

A técnica ACPD

A.C.P.D. é uma sigla, em inglês, para *Alternating Current Potential Drop* – Queda de Potencial em Corrente Alternada, em português. As técnicas de queda de potencial – sejam elas em corrente contínua (DCPD) ou alternada (ACPD) – são baseadas no princípio básico de que uma amostra condutora, quando carregada eletricamente, irá apresentar uma queda de voltagem em sua superfície. Percebe-se, então, que se trata de uma técnica não-destrutiva.

Estudos mostram que quando uma corrente alternada atravessa um condutor, ela é limitada a uma área bastante reduzida do material – denominada “*skin*”. Como a resistência das amostras pode ser alterada pela presença de um defeito, como a estrição oriunda do ensaio de tração, o fluxo espacialmente limitado de correntes alternadas pode ser explorado para detectar e medir falhas.

Apesar de ser um método mais complexo do que aquele realizado com corrente contínua, a técnica A.C.P.D. possui algumas vantagens, podendo-se destacar a não alteração eletroquímica do material e o não aquecimento da amostra durante o processo. Como desvantagens, pode-se destacar as inúmeras variáveis capazes de alterar de maneira drástica o resultado obtido, falhando no quesito reprodutibilidade [10].

Para a execução do ensaio, é necessário que se tenha à disposição um equipamento de monitoramento específico para tal fim, o qual deve ser conectado a um computador. Devido à escassez de bibliografia corrente acerca da utilização dessa técnica em ensaios de tração, é apresentada a Figura 1, a fim de demonstrar o experimento que visa a medição de crescimento de trinca, mas ainda assim é capaz de elucidar de maneira básica a preparação do ensaio para realizar o objetivo deste trabalho.

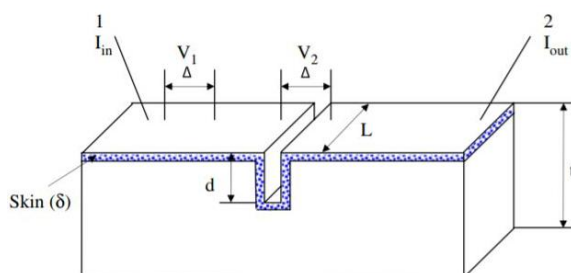


Figura 1 - Esquema da técnica ACPD. Fonte: [11].

O ponto 1 é local por onde uma corrente alternada é injetada. Tal corrente percorre a superfície do metal e sai pela outra extremidade, indicada em 2. A espessura pela qual a corrente



passa – indicada por δ – é constante. Eletrodos, representados por V_2 , são colocados nas extremidades da falha com o intuito de medir a queda de potencial na região. Outros eletrodos, indicados por V_1 , são colocados em um local longe da falha e são responsáveis por medir a voltagem de referência. Os dados obtidos são lidos pelo equipamento de monitoramento e visualizados pela tela de um computador, mediante uso de software específico para o equipamento.

Dessa forma, o objetivo do presente trabalho é obter uma curva tensão-deformação real em ensaio de tração através do uso da técnica de queda de potencial em corrente alternada (ACPD) para avaliar a variação de área de forma instantânea e avaliar a eficiência da mesma por meio da comparação entre o perfil desta com o da curva tensão-deformação convencional e o da curva real obtida pelo método matemático.

METODOLOGIA

Neste trabalho, foram utilizadas barras chatas de aço SAE 1020, com espessura de 4,7625 mm (3/16 polegadas), obtidas no comércio local. O referido metal possui os seguintes limites de variação de porcentagem em massa de seus elementos químicos:

Elemento	C	Mn	Si	P	S
Tolerância (%)	0,17 – 0,23	0,30 – 0,60	0,35	0,040	0,050

Tabela 1 - Limites de variação dos elementos químicos de um aço SAE 1020. Fonte: [12].

O material foi usinado por eletroerosão, obtendo-se corpos de prova com a geometria de perfil retangular, conforme ASTM E8/E8M [13] Após usinadas, as peças foram aquecidas e resfriadas lentamente – recozimento –, com tempo e temperatura estabelecidos pela ATSM A255 [14], haja vista a melhor visualização da curva nessa condição, uma vez eliminados os defeitos de corte e laminação.

O ensaio de tração foi realizado na Máquina Universal de Ensaio – MTS, com velocidade de 1 mm/min, equipada com extensômetro de comprimento nominal igual a 25 mm e célula de carga de 100 KN. Todo o ensaio foi parametrizado e monitorado pelos softwares Station Manager e Multipurpose Elite, permitindo a obtenção da curva convencional do ensaio de tração uniaxial, além da exportação dos dados para posterior tratamento.



Concomitantemente ao ensaio de tração, como pode ser visualizado na Figura 2, utilizando-se o equipamento de monitoramento Matelect CGM-7, foi empregada também a técnica A.C.P.D., com o intuito de avaliar o decaimento de potencial da peça tracionada, bem como analisar a possibilidade de obtenção da curva real de um aço através da correlação da queda de potencial com a variação instantânea de área. Para tal, foram usadas garras tipo jacaré em todas as necessidades: entrada e saída de corrente; aferição da voltagem de referência; aferição da voltagem no local de estrição.



Figura 2 - Ensaio de tração e utilização da técnica A.C.P.D. Fonte: autoria própria.

Para correlacionar a queda de potencial no corpo de prova com a variação de área da seção transversal, a partir da Lei de Ohm, foram utilizadas as seguintes relações:

$$V = R \cdot I \quad (5)$$

onde: $R = \rho \cdot L / A$ (6)

Substituindo (2) em (1), tem-se: $V = (\rho \cdot L) / (A \cdot I)$ (7)

Isolando A, em (3), obtém-se a seguinte expressão: $A = (\rho \cdot I \cdot L) / V$ (8)

onde: V = Tensão Elétrica; R = Resistência Elétrica; I = Corrente Elétrica; ρ = Resistividade do Material; L = Comprimento do Corpo de Prova; A = Área da Seção Transversal do Corpo de Prova.



Como a resistividade é uma propriedade característica do material e no ensaio de tração em conjunto ao uso da técnica A.C.P.D. não há variação de temperatura, nem de corrente, considera-se ρ e I constantes.

Dessa forma, a variação de área é função das variações de L e V . Considerando-se que não há escorregamento entre CP e garra, pode-se atribuir o ganho de comprimento como sendo o deslocamento do atuador do ensaio. Aliado a isso, a utilização da variação de potencial fornecida pelo equipamento de monitoramento da técnica A.C.P.D. em cada instante, permite obter a variação de área no tempo, conforme eq. (8).

Por fim, utilizando a Força indicada pelo equipamento e dividindo esta pela área estimada, é possível a plotagem do gráfico Tensão x Deformação real.

Devido à grande sensibilidade do processo, vale ressaltar a necessidade de elaboração de suportes para garantir a mínima interferência externa nos elementos responsáveis pela aquisição de dados. Os parâmetros utilizados foram: Corrente: 1 A (um ampère); b) Filtro: 1 kHz (um quilohertz); c) Frequência: 2 kHz (dois quilohertz); d) Tempo entre aquisições: 0,5 s (meio segundo); e) Distância entre eletrodos de referência: 10 mm (dez milímetros); f) Distância entre eletrodos principais: 50 mm (cinquenta milímetros).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após realizados os ensaios, obteve-se, por meio do tratamento dos dados fornecidos pelo software supracitado, a curva tensão-deformação de engenharia. Utilizando a correlação apresentada na eq. 8 entre a variação da intensidade de corrente e variação de área, plotou-se, em um mesmo plano, a curva tensão-deformação real. Por fim, a título de comparação, foi esboçada a curva real obtida pelo método matemático, considerando as tensões e deformações instantâneas, segundo formulas acima expressas. O resultado está exposto na Figura 3.

Nota-se, pela Figura 3, que o perfil das curvas convencional e real (modelo matemático) apresentam perfis bem semelhantes no regime elástico, apresentando uma leve variação no regime plástico, conforme esperado. A curva real (técnica ACPD), no entanto, apresentou um comportamento um pouco mais díspar em relação às anteriores, atingindo uma tensão limite de resistência bem maior. Tal fato demonstra que os diferentes métodos apresentam perfis semelhantes, entretanto fornecem valores do regime plástico bastante distintos, conforme observado na Tabela 2. Um fato interessante notado no ensaio de tração é a ótima visualização



da região do escoamento para corpos de prova resfriado lentamente, acontecimento não visto em corpos de prova brutos de usinagem.

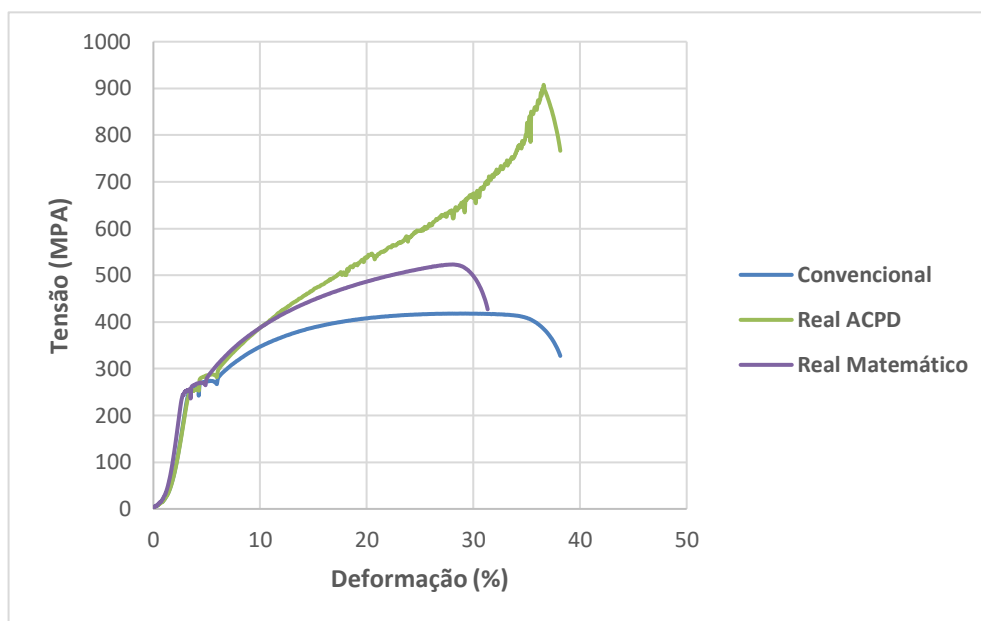


Figura 3 – curvas Tensão-Deformação obtidas pelos métodos convencional (azul), matemático (lilás) e técnica ACPD (verde). Fonte: autoria própria.

Propriedade	Convencional	Modelo matemático	Técnica ACPD
Módulo de Elasticidade	211,801 GPa	-	207,775 GPa
Tensão Limite de Escoamento	260,697 MPa	-	254,341 MPa
Tensão Limite de Resistência	418,193 MPa	523,12 MPa	907,711 MPa
Tensão de Ruptura	327,474 MPa	427,13 MPa	766,539 MPa

Tabela 2 - Valores das propriedades mecânicas do aço recozido obtidos por diferentes métodos. Fonte: autoria própria.

Ganharul et al. [15] utilizaram diferentes métodos já conhecidos pela literatura para estimar a curva de tensão-deformação real de um aço SAE 1020 e evidenciaram as divergências entre os valores obtidos pelos diferentes métodos. Os autores verificaram que as tensões limite de resistência reais poderiam alcançar valores próximos a 740 MPa para o material estudado. O valor encontrado no presente trabalho supera em torno de 20% aqueles encontrados pelos



mesmos, ainda que analisado em condições que já incorporam uma superestimativa devido aos efeitos de triaxialidade. Todavia, embora o resultado aqui encontrado extrapole o valor de 740 MPa, é válido salientar que o valor de tensão limite de resistência convencional verificado para o material do presente trabalho supera em cerca de 10% aquele observado para o aço 1020 estudado pelos autores supracitados.

No que concerne às variações vistas na região plástica da curva real (técnica ACPD), algumas hipóteses podem ser levantadas. A primeira delas é que tais oscilações demonstram a formação de microcavidades (ruptura por *dimples*) no material, as quais surgem de maneira sucessiva até o rompimento do corpo de prova, caracterizando um modo de fratura dúctil por formação e coalescimento de microcavidades [16] – típico do aço SAE 1020. Outra hipótese, por sua vez, é que são oriundas da alta sensibilidade do método, em conjunto com a ação de elementos externos ao ensaio, ocasionando ruídos elétricos; por fim, acredita-se que as variações podem ter ocorrido devido à condição da superfície do material, haja vista o corpo de prova ter sido usinado por eletroerosão.

É válido salientar que foi verificada, para este caso específico, a não necessidade do uso de eletrodos para obtenção da tensão de referência. Os resultados se mostraram satisfatórios analisando-se apenas a aferição na região da estrição e tomando-se como tensão de referência aquela medida no início do ensaio. Dispensar o uso da medição de referência permite, ao executante do ensaio, posicionar os elementos responsáveis pela aquisição de dados nas extremidades do comprimento útil, reduzindo interferência em corpos de prova pequenos.

Devido à anisotropia, bem como à falta de simetria dos CPs, a estrição provavelmente irá ocorrer em local que não o centro do comprimento útil. Dessa forma, eletrodos localizados nas extremidades evita também o insucesso de alguns ensaios, como aquele representado Figura 4.



Figura 4 - Erros na aquisição de dados utilizando técnica A.C.P.D. Fonte: autoria própria.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho mostrou-se bastante inovador ao utilizar a técnica A.C.P.D. para um fim ainda não visto na bibliografia corrente. A correlação entre o o decaimento de potencial com a variação de área do material, possibilitou uma boa estimativa da curva tensão-deformação de um aço em um ensaio de tração – ainda que superestime propriedades obtidas pelos métodos convencionais e modelos matemáticos –, bem como propor novos valores para as propriedades mecânicas do material estudado.

No desenvolvimento do uso da técnica ACPD para o levantamento da curva tensão-deformação real, sugere-se a eliminação total dos problemas de mau contato entre os elementos responsáveis pela aquisição de dados e a peça estudada, bem como o estudo da influência das mais diversas variáveis sobre os dados obtidos.

Além disso, é de grande importância o estudo da possibilidade de avaliar variação de área e variação de tensão de forma simultânea, evitando o uso de dois equipamentos, dirimindo os erros humanos no que se refere à sincronia na aquisição das informações desejadas.

REFERÊNCIAS

- [1] CHIAVERINI, Vicente. Aços e Ferros Fundidos. São Paulo: **ABM**, 1988.
- [2] VLACK, Lawrence H. Van. Princípios de Ciência dos Materiais. São Paulo: **Editora Edgard Blucher Ltda.**, 2000
- [3] SOUZA, Sérgio Augusto de. Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos: Fundamentos Teóricos e Práticos. 5ª ed. São Paulo: **Edgard Blucher**, 1982.
- [4] LUGG, M.C. Data interpretation in ACPD crack inspection. **NDT Int.**, vol. 22, nº 3, p. 149–154, 1989.
- [5] CHEN K.; BRENNAN F.P.; DOVER, W.D. Thin-skin AC field in anisotropic rectangular bar and ACPD stress measurement, **NDT E Int.**, vol. 33, nº 5, p. 317–323, 2000.
- [6] DOWLING, Norman E. Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue. Third Edition. New Jersey: **Pearson Education, Inc.**, 2007.
- [7] FREDEL, Márcio C.; ORTEGA, Patrícia; BASTOS, Edson. Apostila Propriedades Mecânicas: Ensaio Fundamentais – Vol. 1. **Desenvolvimento de material didático ou instrucional pela Universidade Federal de Santa Catarina**, 2014.



- [8] GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. Ensaaios dos Materiais. 2ª ed. Rio de Janeiro: **LTC**, 2012.
- [9] DIETER, Geroge E. Metalurgia Mecânica. 2ª ed. Rio de Janeiro: **Guanabara Dois**, 1981.
- [10] MATELECT. **Practical Aspects of the ACPD technique: for use with Matelect ACPD products.**
- [11] SAGUY, H.; RITTEL D. Flaw Detection in metals by ACPD technique: Theory and experiments. Haifa: **NDT&E International**, 2007.
- [12] COMERCIAL GERDAU. **Aços Planos e Suas Aplicações.** São Paulo.
- [13] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E8/E8M: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.** Philadelphia, 2016.
- [14] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS: **ASTM A255: Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel.** Philadelphia, 2014.
- [15] GANHARUL, Grace Kelly Q.; DE BRANGANÇA AZEVEDO, Nick; DONATO, Gustavo Henrique B. Methods for the Experimental Evaluation of True Stress-Strain Curves After Necking of Conventional Tensile Specimens: Exploratory Investigation and Proposals. In: **Pressure Vessels and Piping Conference.** American Society of Mechanical Engineers, 2012. p. 163-172.
- [16] GARRISON JR, W. M.; MOODY, N. R. Ductile fracture. **Journal of Physics and Chemistry of Solids**, v. 48, n. 11, p. 1035-1074, 1987.