

## **Influência do tratamento térmico no comportamento mecânico não-linear elástico da liga Ti-13Nb-13Zr**

Schneider, S.<sup>I</sup>, Schneider, S.G.<sup>II</sup>, da Silva, H.M.<sup>III</sup>

<sup>I</sup>Escola de Engenharia de Lorena – EEL/ DEMAR  
Polo Urbo Industrial, Gleba AI-6, Mondesir, C.P.116, 12600-970 Lorena – SP  
e-mail: [sergiosch@demar.eel.usp.br](mailto:sergiosch@demar.eel.usp.br)

<sup>II</sup>Faculdade de Engenharia Química – FAENQUIL/ DEMAR  
Polo Urbo Industrial, Gleba AI-6, Mondesir, C.P.116, 12600-970 Lorena – SP  
e-mail: [sandra@demar.eel.usp.br](mailto:sandra@demar.eel.usp.br)

<sup>III</sup>Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, PEMM/COPPE/UFRJ, Caixa Postal 68505, CEP 21941-972, Rio de Janeiro – RJ  
e-mail: [helena@metalmat.ufrj.br](mailto:helena@metalmat.ufrj.br)

---

### **RESUMO**

A liga Ti-13Nb-13Zr foi produzida por fusão a arco, solubilizada a 1000°C/1h resfriada em água, forjada a frio, e recozida nas seguintes condições: 1000°C/1h e 900°C/30min resfriada em água. As propriedades mecânicas da liga recozida foram avaliadas pelo ensaio de tração em temperatura ambiente. A região elástica foi analisada de acordo com a equação modificada de Ramberg-Osgood, cujo grau de não-linearidade está associado ao parâmetro n. Verificou-se que um tratamento posterior de envelhecimento a 400°C/3h diminui as diferenças existentes em algumas propriedades mecânicas e melhora a linearidade na região elástica.

**Palavras-chave:** Propriedades mecânicas, Ti-13Nb-13Zr, elasticidade não-linear, módulo tangente.

---

### **Influence of heat treatment on non-elastic mechanical behavior of Ti-13Nb-13Zr alloy**

#### **ABSTRACT**

Ti-13Nb-13Zr alloy was produced by arc melting, solution treated at 1000°C/1h followed by water quenching, cold forged and annealed at 1000°C/1h or 900°C/30min followed by water quenching. Mechanical properties of this alloy were evaluated by tension tests at room temperature. The elastic region of the stress-strain curve was analysed according to the modified equation of Ramberg-Osgood, which degree of non-linearity is associated to parameter n. It was observed that aging treatment at 400°C/3h, after the annealing, decreases the differences between mechanical properties; moreover, the linearity of elastic region improves.

**Key-words:** Mechanical Properties, Ti-13Nb-13Zr alloy, non-linear elasticity, tangent modulus.

---

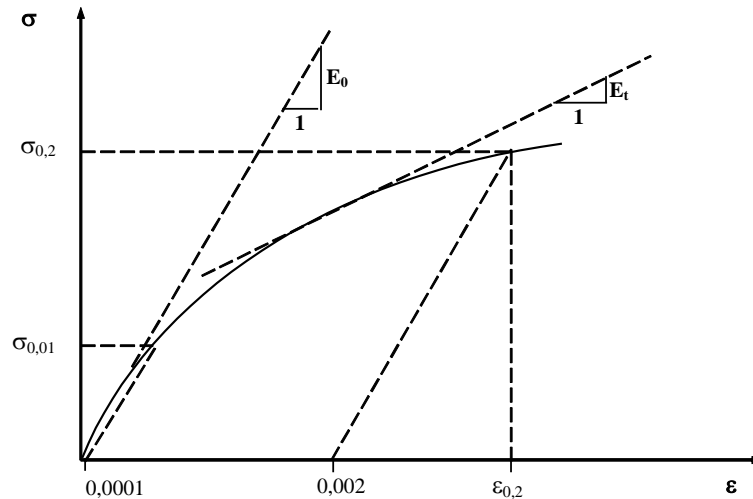
## **1 INTRODUÇÃO**

O titânio comercialmente puro (CP) e a liga Ti-6Al-4V ( $\alpha+\beta$ ) têm sido usados extensivamente como implantes biomédicos nas últimas décadas [3]. A liga Ti-6Al-4V foi desenvolvida visando aplicações nas indústrias aeronáutica e naval, devido à elevada resistência específica, capacidade de conformação plástica, estabilidade estrutural e resistência à corrosão. Apesar dessas vantagens, considerável controvérsia foi levantada sobre seu desempenho em dispositivos médicos que envolvem longo tempo de utilização [4].

Novas ligas de Ti para aplicações biomédicas contendo elementos não tóxicos, tais como Nb, Ta e Zr, têm sido estudadas ultimamente objetivando uma melhor compatibilidade química e mecânica. Considerando estes fatos, as ligas do sistema Ti-Nb-Zr, ricas em  $\beta$ , são consideradas como melhores substitutas dos materiais convencionais, tais como os aços inoxidáveis, as ligas à base de cobalto e a liga Ti-6Al-4V [5].

A presença da fase  $\beta$  na microestrutura de ligas de Ti aumenta a sua capacidade de endurecer sob subsequente envelhecimento. O Nb, além de ser estabilizador da fase  $\beta$  em ligas de Ti, reduz o seu módulo de elasticidade [5]. O módulo de elasticidade pode ser considerado como sendo um parâmetro de rigidez. Sendo assim, quanto maior o seu valor, mais rígido será o material ou menor será a deformação elástica que resultará da aplicação de uma determinada tensão. Entretanto, há alguns materiais para os quais a região elástica da curva tensão ( $\sigma$ ) *versus* deformação ( $\varepsilon$ ) é predominantemente não-linear, limitando o cálculo do módulo de elasticidade empregando-se a lei Hooke a uma estreita região de proporcionalidade. Para estes casos, torna-se mais apropriado descrever a rigidez do material em termos do módulo tangencial e/ou do módulo secante [2].

A Figura 1 representa uma curva  $\sigma$  x  $\varepsilon$  de um material com comportamento não-linear na região elástica, e os parâmetros usados na Equação (1) [1, 7].



**Figura 1:** Digrama esquemático da curva tensão ( $\sigma$ ) *versus* deformação ( $\varepsilon$ ) típica de um material com comportamento elástico não-linear.

A Equação (1) é a mais usada para representar o comportamento não-linear de materiais [6].

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + 0,002 \left( \frac{\sigma}{\sigma_{0,2}} \right)^n \quad (1)$$

em que,  $\varepsilon$  é a deformação,  $\sigma$  é a tensão,  $\sigma_{0,2}$  o limite de escoamento (offset 0,2%),  $E_0$  é o módulo elástico inicial e  $n$  é o expoente de encruamento (parâmetro  $n$ ).

O primeiro termo desta equação representa o comportamento linear e o segundo, o comportamento não-linear. O valor da componente não-linear da deformação em  $\sigma_{0,001}$  é 0,0001 (0,01%) e diminui com a redução da tensão. Desta forma, para baixos valores de tensão, a componente não-linear, quando comparada à componente linear, não é significativa. Além disso, a influência do componente não-linear na deformação será menor quanto maior for o valor de  $n$ .

A equação modificada de Ramberg-Osgood, uma equação de três parâmetros, é usada para modelar a relação tensão/deformação até o limite de escoamento. O parâmetro  $n$  obtido usando-se os valores de tensão entre 0,01% e 0,2% de deformação, resulta na seguinte equação [7]:

$$n = \frac{\ln(20)}{\ln(\sigma_{0,2}/\sigma_{0,01})} \quad (2)$$

em que,  $\sigma_{0,01}$  é o limite de proporcionalidade definido a 0,01% e  $\sigma_{0,2}$  é o limite de escoamento.

Teoricamente, o parâmetro de Ramberg-Osgood pode variar entre 1 (material elástico ideal) e  $\infty$  (elasto-plástico ideal). Valores de  $n$  entre 2 e 40 são comumente encontrados para materiais estruturais e entre 3 e  $\infty$  para ligas de Al e aços inoxidáveis [7].

O módulo tangente ( $E_t$ ), Equação (3), é definido como a inclinação da curva tensão-deformação para cada valor de tensão e obtido a partir da Equação (1) como sendo o inverso da primeira derivada em relação à tensão [1]:

$$E_t = \frac{E_0 \sigma_{0,2}}{\sigma_{0,2} + 0,002nE_0 \left( \frac{\sigma}{\sigma_{0,2}} \right)^{n-1}} \quad (3)$$

Principalmente no caso de aplicações biomédicas, é importante conhecer o comportamento elástico do material, já que o módulo de elasticidade deve ser o mais próximo possível ao do osso. Materiais com altos módulos transferem carga insuficiente para o material implantado, podendo causar reabsorção do osso levando a perda do dispositivo. O presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência do tratamento térmico no comportamento mecânico não-linear elástico da liga Ti-13Nb-13Zr.

## 2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A liga Ti-13Nb-13Zr (% em peso) foi obtida utilizando-se forno a arco, em cadinho de cobre refrigerado a água, com capacidade de aproximadamente 140 g, sob atmosfera de argônio. Foram utilizados metais de pureza comercial na forma de chapas dos elementos Ti, Nb e Zr. Inicialmente as chapas foram cortadas e decapadas (HF e HNO<sub>3</sub>) e posteriormente pesadas nas proporções desejadas. A fusão ocorreu em três etapas, com oito passes cada, e após cada uma o lingote foi virado com o objetivo de se obter ligas de composição homogêneas.

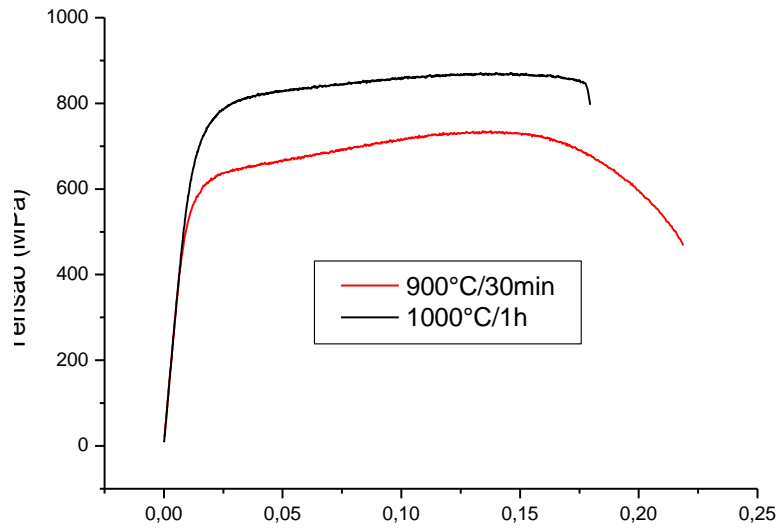
Após a fusão, os lingotes ( $\phi \approx 18,0$  mm e comprimento de 140,0 mm) foram decapados e encapsulados a vácuo em tubo de quartzo. A seguir, foram submetidos a tratamento térmico de solubilização a 1000°C/1h e resfriados em água, para posterior forjamento rotativo a frio até o diâmetro final de 6,0 mm (redução em área de 89%) [8, 9].

As barras forjadas foram encapsuladas e submetidas a tratamentos térmicos de recozimento a 900°C/30 min e 1000°C/1h, seguidos de resfriamento em água. Após cada condição de recozimento a liga foi envelhecida a 400°C por 3 horas.

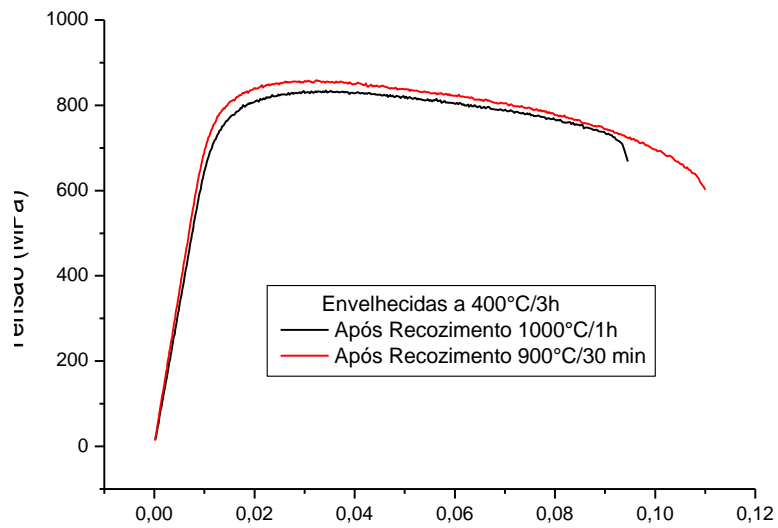
A caracterização mecânica da liga nas duas condições de recozimento e após envelhecida, foi realizada em um sistema servo-hidráulico com atuador axial da MTS, modelo 810.23M, com capacidade de 250kN. Os corpos-de-prova de tração foram produzidos seguindo a norma ASTM E8M.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para determinação das propriedades mecânicas foram realizados três ensaios de tração uniaxial, em cada condição de processamento termomecânico. A Figura 2 mostra comportamento em tração da liga Ti-13Nb-13Zr recozida e resfriada em água (WQ) representativa das duas condições estudadas. A Figura 3 mostra, de maneira representativa, o comportamento em tração da liga Ti-13Nb-13Zr após tratamento térmico de envelhecimento (400°C/3h) para cada condição de recozimento.



**Figura 2:** Curvas tensão-deformação da liga Ti-13Nb-13Zr recozida: a 900°C/30 min WQ e a 1000°C/1h WQ.



**Figura 3:** Curvas tensão-deformação da liga Ti-13Nb-13Zr envelhecida a 400°C/3h após os tratamentos de recozimento a 900°C/30 min WQ e a 1000°C/1h WQ.

Com base nas curvas tensão-deformação, foram determinadas propriedades mecânicas e os parâmetros usados nas formulações e tratamento de dados de interesse no presente trabalho, cujos valores são mostrados na Tabela 1.

**Tabela 1:** Propriedades mecânicas da liga Ti-13Nb-13Zr para diferentes condições de processamento termomecânico.

PROPRIEDADES	RECOZIMENTO			
	900°C/30 min		1000°C/1h	
	Resfriada em água (WQ)	Envelhecida (400°C/3h)	Resfriada em água (WQ)	Envelhecida (400°C/3h)
E (GPa)	62,4	71,7	62,4	65,9
$\sigma_{0,01}$ (MPa)	364	628	416	617
$\sigma_{0,2}$ (MPa)	531	775	644	743
$\sigma_u$ (MPa)	734	859	869	834
Alongamento (%)	21	10	17	8,3
n	7,93	14,24	6,85	16,12

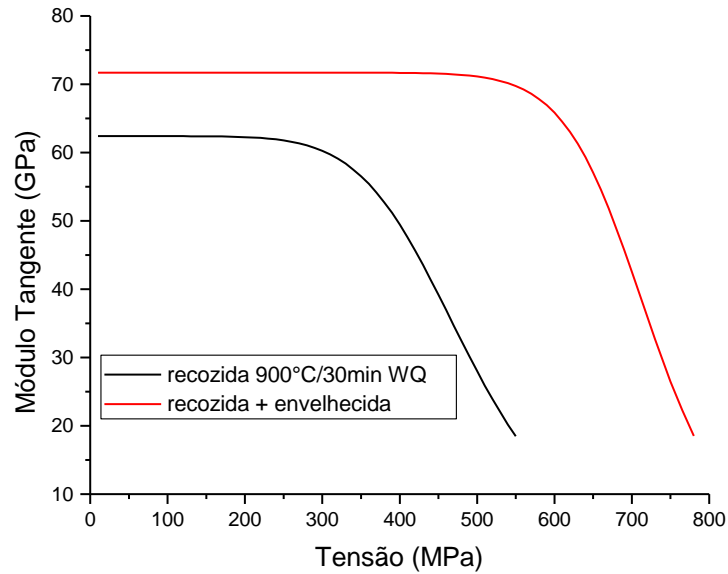
As curvas tensão-deformação, mostradas na Fig. 2, mostram um comportamento distinto para as condições de recozimento avaliadas. Na liga recozida a 1000°C/1h WQ as características associadas a uma maior resistência tornam-se evidentes de acordo com os valores de limite de escoamento ( $\sigma_{0,2}$ ) e limite de resistência ( $\sigma_u$ ) mostrados na Tabela 1. Os valores dos módulos de elasticidade (E) mostrados na Tabela 1 não variam em função da condição de recozimento mas apresentam-se distintos após o envelhecimento sendo de maior efeito para a liga recozida a 900°C/30min WQ.

Os valores obtidos de alongamento percentual, das ligas resfriadas em água, são típicos de materiais que apresentam um comportamento dúctil. Após o envelhecimento, houve redução da ductilidade para ambas as condições de recozimento.

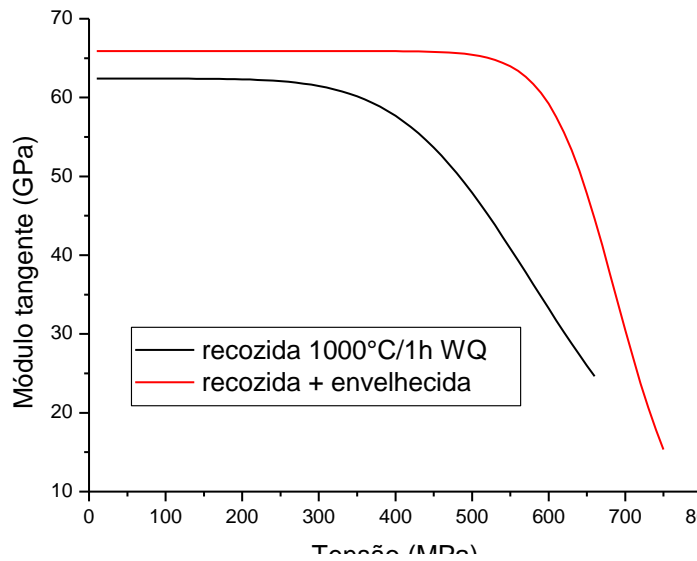
Na Figura 3, observa-se uma semelhança no comportamento em tração dos materiais na condição envelhecida, independente da condição de recozimento da liga. Percebe-se que a zona plástica ficou evidenciada por uma queda lenta e gradual da tensão com a deformação na região de instabilidade após atingir o limite de resistência em torno de 850 MPa. Comparando-se as propriedades mecânicas da condição recozida àquelas após o envelhecimento, observa-se um pequeno aumento da rigidez tendo-se como base o módulo de elasticidade, e uma diminuição significativa do alongamento. No entanto, as mudanças nas propriedades mecânicas foram mais susceptíveis ao envelhecimento para a condição recozida a 900°C/30 min.

As características associadas a um comportamento não-linear na zona elástica foram estudadas com base no parâmetro n (Equação 2) cujos valores foram definidos pelo ajuste dos pontos experimentais com base na equação de Ramberg-Osgood modificada (Equação 1). O parâmetro n que define o grau de não-linearidade do material mostrou-se dependente do tratamento térmico. Após o envelhecimento, o valor de n aumentou significativamente para ambas as condições de recozimento, o que significa que houve uma melhora na linearização dos pontos experimentais. Esse efeito foi mais acentuado na liga recozida a 1000°C/1h WQ cujo valor de n passou de 6,85 para 16,12 após o envelhecimento.

Uma melhor visualização do efeito da não-linearidade é obtida com base na avaliação do módulo tangente em função de uma tensão aplicada até as proximidades do limite de escoamento, de acordo com a Equação (3). A Figura 4 mostra como variou o módulo tangente para a liga recozida a 900°C/30 min WQ, antes e após o envelhecimento. O módulo tangente da liga envelhecida permanece constante para um intervalo maior de tensão na zona elástica e uma transição para a zona plástica mais abrupta, caracterizando uma melhor linearidade. O módulo tangente para baixos níveis de tensão coincide com o módulo de elasticidade inicial ( $E_0$ ) conforme previsto. A variação do módulo tangente para a liga recozida 1000°C/1h WQ, antes e após o envelhecimento, é dada na Fig. 5. Nota-se que o efeito de não-linearidade fica mais evidente no material recozido a 1000°C/1h WQ, observando-se uma perda suave de rigidez numa extensa faixa de tensão, o que resultou no menor valor de n (6,85) dentre as condições estudadas.



**Figura 4:** Comportamento do módulo tangente na região elástica da liga Ti-13Nb-13Zr na condição recozida a 900°C/30 min WQ e envelhecida 400°C/3h.



**Figura 5:** Comportamento do módulo tangente na região elástica da liga Ti-13Nb-13Zr na condição recozida a 1000°C/1h WQ e envelhecida 400°C/3h.

#### 4 CONCLUSÕES

A importância em se conhecer o comportamento elástico do material, no caso de aplicações biomédicas, está relacionada à rigidez, caracterizada pelo módulo de elasticidade. No presente trabalho o comportamento elástico da liga Ti-13Nb-13Zr pode ser melhor relatado pela equação de Ramberg-Osgood, que mede o grau de não-linearidade na região elástica pelo parâmetro  $n$ .

Os valores de módulo de elasticidade para as ligas recozidas, a 1000°C/1h e 900°C/30 min, foram iguais e o grau de não-linearidade próximo ( $n = 6,85$  e  $7,93$ ). A liga recozida a 1000°C/1h apresenta maiores valores de limite de escoamento e de resistência quando comparada à liga na condição 900°C/30 min, que apresenta maior alongamento.

Constatou-se que o tratamento térmico de envelhecimento apresenta grande influência sobre esse comportamento não-linear elástico. Após o envelhecimento, houve melhora na linearidade dos pontos

experimentais na região elástica, comprovado tanto pelo aumento do valor do parâmetro  $n$  quanto pelo comportamento da rigidez em termos do módulo tangente. Como consequência, o módulo tangente da liga envelhecida permanece constante para um intervalo maior de tensão na zona elástica e uma transição para a zona plástica mais abrupta.

Verificou-se que o envelhecimento a 400°C/3h resulta em valores de propriedades mecânicas praticamente idênticos, independente das condições de recozimento investigadas nesse trabalho. Observou-se que a liga recozida na condição 900°C/30 min foi mais sensível ao tratamento térmico de envelhecimento com base nos valores iniciais e finais de propriedades mecânicas.

## 5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e à Fapesp.

## 6 REFERÊNCIAS

- [1] BERG, G.J. VAN DEN, “The effect of the non-linear stress-strain behavior of stainless steel on member capacity”, *Journal of Constructional Steel Research*, v. 54, pp. 135-160, Apr. 2000.
- [2] CALLISTER JR., W.D., *Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução*, 5ed. Rio de Janeiro, LTC, 2001.
- [3] DAVIDSON, J.A., MISHRA, A.K, KOVASC, P., POGGIE, R.A., “New surface-hardened, low-modulus, corrosion-resistant Ti-13Nb-13Zr alloy for total hip arthroplasty”, *Bio-Medical Materials and Engineering*, v. 4, pp. 231-243, Mar. 2000.
- [4] GEETHA, M., MUDALKI, K. U., GOGIA, A. K., ASOKAMANI, R., RAJ, B., “Influence of microstructure and alloying elements on corrosion behavior of Ti-13Nb-13Zr alloy”, *Corrosion Science*, v. 46, pp. 877-892, Apr. 2004 A.
- [5] GEETHA, M., SINGH, A. K., GOGIA, A. K., ASOKAMANI, R., “Effect of thermomechanical processing on evolution of various phases in Ti-Nb-Zr alloys”, *Journal of Alloys and Compounds*, v. 384, pp. 131-144, Dec. 2004 B.
- [6] HILL, B.N, “Determination of stress-strain relationships from offset strength values”, *NACA technical note n°927*, Feb. 1944.
- [7] RASMUSSEN, K.J.R., “Full-range stress-strain curves for stainless steels alloys”, *Journal of Constructional Steel Research*, v. 59, pp. 47-61, Jan. 2003.
- [8] SCHNEIDER, S.G., *Obtenção e caracterização da liga Ti-13Nb-13Zr para aplicação como biomaterial*, Tese de D.Sc., Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), São Paulo, 2001.
- [9] SILVA, H.M., SCHNEIDER, S.G., MOURA NETO, C., “Microstructure of arc-melted and heat-treated Ti-8Nb-13Zr and Ti-18Nb-13 Zr alloys”, *Acta Microscopica, Supplements C*, v. 12, pp.7-8, Sept. 2003.