

PROBLEMAS ENCONTRADOS NA APLICAÇÃO DO MODELO FRAMTiC A UM AÇO MICROLIGADO AO Ti-Nb

Carlos Tasso E. DeAquino

Itamar Ferreira

Pedro C. Sant'Ana

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica

Departamento de Engenharia de Materiais, Cx. P. 6122 – 13083-970 – Campinas, SP, Brasil

Valdir Alves Guimarães

Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

Departamento de Materiais e Tecnologia – Guaratinguetá. SP, Brasil

Resumo. *O objetivo deste trabalho é o de apresentar algumas dificuldades encontradas na aplicação de um modelo desenvolvido para caracterização da tenacidade à fratura na região de transição dúctil-frágil a um aço API 5L 65X, microligado ao Ti e ao Nb, devido ao bandejamento da microestrutura, ocasionando “splits” na seção transversal de corpos de prova submetidos a ensaios de impacto tipo Charpy e levando a um aumento aparente de tenacidade do material. Também serão apresentadas as medidas corretivas aplicadas..*

Palavras-chave: *Mecânica da Fratura, Integridade Estrutural, Transição Dúctil-Frágil*

1. INTRODUÇÃO

Materiais estruturais utilizados no projeto de instalações industriais podem apresentar uma mudança de seu comportamento à fratura quando se varia a temperatura. Nesta classe de materiais podem ser incluídos os aços ferríticos, largamente usados no projeto de vasos de pressão e tubulações industriais. Este tipo de comportamento caracteriza-se pela existência de uma curva de transição, onde 3 regiões ficam bem definidas: os patamares inferior e superior e a região de transição dúctil-frágil. Nas duas primeiras condições, dentro de cada região as propriedades de fratura dos materiais não apresentam grande variabilidade, apresentando para um determinado valor de temperatura a mesma tenacidade à fratura quando testados corpos de prova de mesma ou de diferentes geometrias.

Na região de transição, ensaios realizados demonstram que os resultados experimentais apresentam alto espalhamento e são bastante dependentes da geometria ensaiada. Para solucionar este problema, foi desenvolvido um modelo analítico-experimental capaz de prever a tenacidade à fratura para quaisquer geometria e temperatura localizadas na região de transição a partir de um pequeno grupo de resultados experimentais obtidos em uma única geometria. Em uma fase anterior de pesquisa foi possível definir e validar uma metodologia aplicável a componentes mecânicos de aplicação nuclear fabricados com os aços ferríticos

A508 Classe 3, A533 Grau B e similares. Para uma nova etapa, motivo de um projeto de pesquisa financiado pela FAPESP, Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo, foi proposto estudar e implantar as alterações necessárias na metodologia inicial de forma a estender a sua aplicação a outros aços estruturais. Com este objetivo foi escolhido um aço microligado ao Ti-Nb, de grande uso na indústria petroquímica nacional, apresentado em três condições microestruturais. A utilização de diferentes microestruturas tem como finalidade o estudo da sensibilidade do modelo na previsão da tenacidade à fratura do material quanto à alterações na sua microestrutura.

A metodologia utilizada nesta pesquisa é baseada em um mecanismo de falha de elo-mais-fraco, assumindo-se que ele exista a uma certa distância da ponta da trinca. Um determinado valor de tensão, aqui chamado de tensão de clivagem, σ_c , deve ser atingido na localização do elo-mais-fraco para disparar o processo de falha. A tensão de clivagem é inicialmente considerada uma constante do material, não sendo o seu valor influenciado pela temperatura. Para tratar a dependência geométrica dos resultados, utiliza-se uma formulação de dois parâmetros, J e Q, para a caracterização do campo de tensões na ponta da trinca. Essa formulação é baseada em uma análise numérica de grandes deformações que permite a consideração de *blunting* na ponta da trinca.

Ao longo do processo de levantamento das propriedades mecânicas e de fratura do material em estudo, um aço API 5L X65, os autores se depararam com um problema de segregação ou bandeamento microestrutural, que levava a uma obtenção de uma tenacidade à fratura aparente muito maior do que a real. O trabalho aqui propõe-se a apresentar as dificuldades encontradas e as medidas tomadas para o prosseguimento da pesquisa.

2. O MODELO FRAMTiC PARA CARACTERIZAÇÃO DA FRATURA NA TRANSIÇÃO

2.1 Introdução

O modelo escopo deste trabalho está sendo desenvolvido para a aplicação a materiais estruturais, que apresentam comportamento à fratura caracterizado pela presença de uma transição dúctil-frágil. Nesta região pode-se identificar dois grandes problemas na avaliação da tenacidade à fratura:

- grande espalhamento de dados obtidos experimentalmente
- a dependência dos resultados em relação à geometria e tamanho das amostras testadas.

O modelo FRAMTiC concentra-se na remoção desses obstáculos, de maneira a permitir o conhecimento da tenacidade para qualquer situação desejada a partir do conhecimento de resultados obtidos em ensaios para uma situação particular.

Para o problema do espalhamento de dados, bem como para o problema da dependência do tamanho do mesmo, a utilização de modelagem estatística, usando a distribuição de probabilidade proposta por Weibull (1951) e baseada na hipótese de elo mais fraco de Landes e Shaffer (1980), ajuda a melhorar a caracterização à fratura. A abordagem que tem sido atualmente utilizada para o problema da dependência geométrica é a da metodologia de caracterização do campo de tensões na ponta da trinca e da resistência do material à fratura através de 2 parâmetros, onde o primeiro é responsável pela caracterização primária da tenacidade e o segundo, pela caracterização da restrição plástica (*constraint*).

2.2 Bases do Modelo

O modelo baseia-se nas observações de Heerens et al. (1991), que a tensão de clivagem é independente da geometria, tamanho e temperatura, mas que a tenacidade ainda assim exibe um grande espalhamento em seus resultados. Esta tenacidade é dependente da distância que um elo-mais-fraco dominante, o mecanismo responsável pelo disparo do processo de fratura, se encontra em relação à ponta da trinca. Como esta distância varia de um corpo-de-prova para outro, os resultados de dois ensaios de tenacidade podem ser bem diferentes, mesmo quando realizados para a mesma corrida, mesma direção e mesma temperatura de um dado material.

No trabalho aqui apresentado, considera-se que a distância do elo-mais-fraco à ponta da trinca, aqui denominada r_{wl} , é ao mesmo tempo uma variável e uma propriedade do material, sendo responsável pelo espalhamento dos dados de tenacidade à fratura na região de transição dúctil-frágil. A definição da posição do elo-mais-fraco, que dará início ao processo de fratura está associada à interseção da curva representativa do campo de tensões na região da ponta da trinca com a reta definindo a tensão de clivagem, conforme mostrado na Fig. 1.

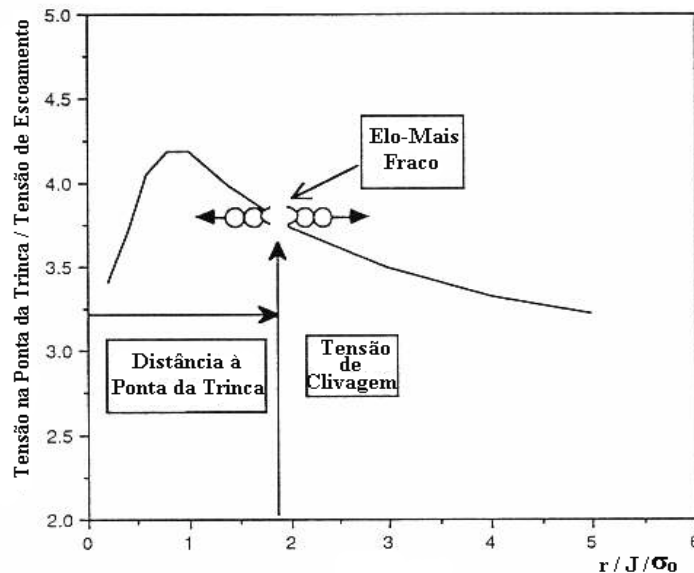


Figura 1 - Modelo de Elo-Mais-Fraco - FRAMTiC

A abordagem de Heerens não incorpora o efeito da restrição plástica na ponta da trinca na modelagem das condições que causam a fratura por clivagem. Para resolver este problema no modelo sendo aqui proposto, o campo de tensões na ponta da trinca é modificado pela restrição plástica característica de cada geometria, conforme definido pelo parâmetro Q , desenvolvido por O'Dowd e Shih (1993).

Este modelo também pode ser usado para a previsão do comportamento de uma mesma geometria a diferentes temperaturas. Além disso, com a sua utilização é também possível prever o fim da região de transição dúctil-frágil e o valor da tensão de clivagem (DeAquino, 1997).

Em uma fase anterior de pesquisa foi possível definir e validar a metodologia FRAMTiC em aços ferríticos A508 Classe 3, A533 Grau B e similares, utilizados na fabricação de componentes mecânicos de aplicação nuclear. A Fig.2 apresenta um exemplo de previsão de tenacidade realizada com o FRAMTiC, cuja qualidade pode ser avaliada pela comparação

com resultados experimentais disponíveis para a temperatura para a qual foram feitas previsões.

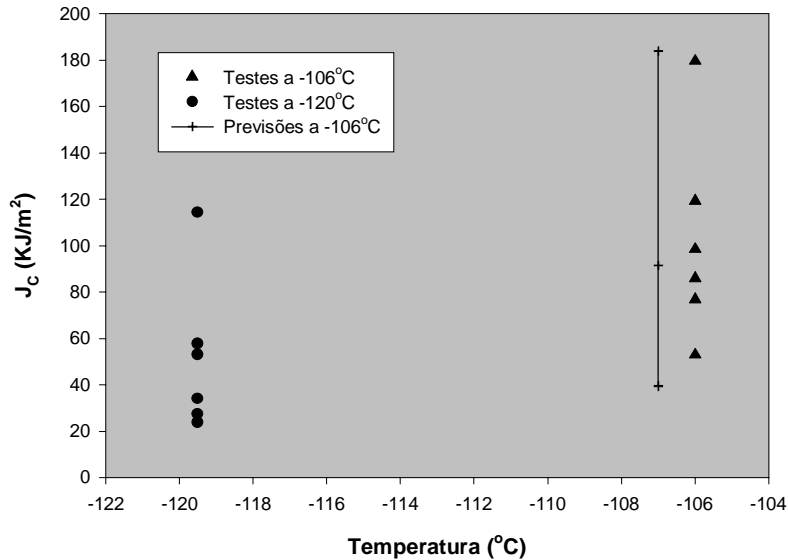


Figura 2 - Resultados Experimentais x Previsão do FRAMTiC - Aço A 508 Classe 3 – Orientação T-L (DeAquino, 1997)

3. A VALIDAÇÃO DO FRAMTiC PARA O AÇO API 5L X65

3.1. Introdução

Para a validação da metodologia FRAMTiC para outros aços estruturais, foi proposto à FAPESP, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, um projeto de pesquisa visando o estudo de aplicação do FRAMTiC a outros materiais utilizados em componentes industriais. A escolha de um material para iniciar o trabalho recaiu sobre o API 5L X65, pela sua extensiva aplicação na área petroquímica. De forma a ser possível uma previsão da tenacidade à fratura na transição, usando o modelo FRAMTiC, torna-se necessário o levantamento de propriedades mecânicas e de fratura do material em estudo, conforme definido na sua metodologia. (DeAquino, 1997). Nesta fase, no entanto, já foram encontradas algumas dificuldades e aplicada medidas corretivas, segundo descrito a seguir.

3.2 Realização de ensaios

Para aplicação do FRAMTiC ao aço API 5L X65, foram definidos ensaios de impacto, tração e tenacidade à fratura. Os corpos de prova (CPs) para tais ensaios foram preparados na orientação T-L, nas instalações do Departamento de Materiais da Faculdade de Engenharia de Guratingüetá (FEG-UNESP). Os corpos de prova de impacto apresentavam a configuração tradicional definida na norma E23 (ASTM, 1996), com seção transversal de 10 mm x 10mm e demais dimensões planares conforme mostrado na Fig. 3. Para os ensaios de tenacidade à fratura, foram definidos dois tipos de CPs com a mesma geometria de corpos de prova usada para ensaios de impacto, com a diferença de sofrerem um pré-trincamento de fadiga antes de serem ensaiados e contarem com duas seções transversais diferentes (ver Fig. 3). Em sua preparação, os corpos de prova de impacto e de tenacidade à fratura foram usinados em uma

fresadora CNC marca Bridgeport, com o entalhe realizado por eletro-erosão por penetração em uma máquina ENGEMAQ NC40. Os corpos de prova de tração, foram usinados em um torno Marca ROMI Centur 30S.

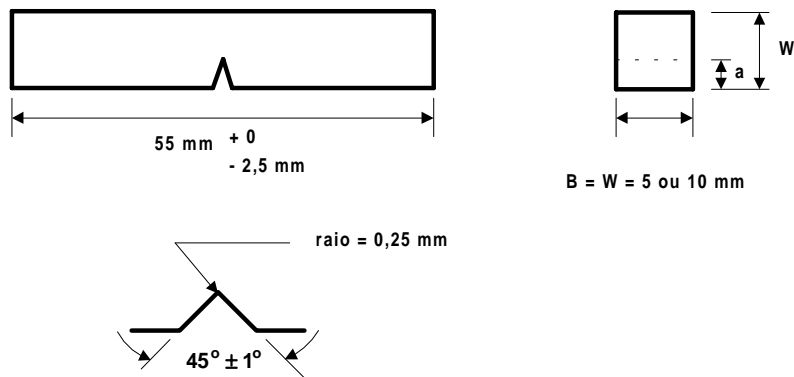


Figura 3 – Dimensões dos corpos de prova de impacto e tenacidade

Para a realização dos ensaios, foram escolhidos procedimentos padronizados pela *American Society for Testing and Materials*, ASTM. Desta forma, para os ensaios de tração, foram seguidas as disposições da E8M (ASTM, 1996), enquanto que para os ensaios de impacto tipo Charpy, a norma adotada foi a E23 (ASTM, 1996) e para os ensaios de tenacidade à fratura na região de transição dúctil-frágil, a E1921 (ASTM, 1998).

Decidiu-se por iniciar a parte experimental do trabalho pelos ensaios de impacto tipo Charpy, ao invés dos ensaios de tração, pela dificuldade de acomodar datas disponíveis do Laboratório de Ensaios Mecânicos do IPEN, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, local de realização destes ensaios. A tabela 1, mostrada a seguir, apresenta os resultados de energia absorvida obtidos para os corpos de prova ensaiados e respectivas temperaturas.

Pela observação dos valores desta tabela, pode-se perceber que algum fator não previsto influenciou no aumento da energia de impacto para temperaturas na região de transição. Corpos de prova ensaiados a temperatura ambiente e a baixas temperaturas, presumivelmente na região de transição dúctil-frágil, apresentaram praticamente a mesma energia absorvida, com raras exceções. A figura 4 apresenta as superfícies de fratura dos corpos de prova com valores atípicos de ductilidade, representados por uma energia absorvida característica de temperaturas mais altas. Da observação destas figuras, pode-se concluir que a alta ductilidade está sempre associada à presença de separações (*splits*) na superfície de fratura dos corpos de prova. Nos corpos de prova ensaiados que apresentaram o nível esperado de energia absorvida para baixas temperaturas não foi notada, por outro lado, a presença das separações em suas superfícies de fratura.

Estas separações são ocasionadas pelo bandeamento na microestrutura do aço estudado. O bandeamento de ferrita-perlita é uma ocorrência comum em aços de baixa liga laminados a quente, como o aço API 5L X65. Bandeamento é um termo usado para descrever uma microestrutura consistindo de camadas alternadas de ferrita pró-eutetoide e, freqüentemente, perlita, em oposição à distribuição aleatória deste constituinte (Thompson e Howell, 1992). Durante a solidificação do aço, elementos de liga, como Mn, Si, P, S e Al, são rejeitados das primeiras dendritas formadas de ferrita delta para o seio do líquido, resultando em regiões interdendríticas com alta concentração de soluto (Hawkins e Hultgren, 1973). O bandeamento microestrutural ocorre porque estes elementos de liga substitucionais rejeitados afetam a atividade do carbono na austenita (Thompson e Howell, 1992). Como os átomos de carbono intersticiais possuem alta mobilidade comparados com os átomos substitucionais, regiões de alto e baixo teor de carbono se desenvolvem nas regiões de austenita contendo diferentes

elementos substitucionais. Durante o resfriamento, estas regiões de austenita, com alto teor de carbono e baixo teor de carbono, transformam-se em regiões de perlita e ferrita, respectivamente (Lee e Chan, 1991). O bandeamento é portanto um tipo de anisotropia microestrutural causada pela segregação de um ou mais elementos durante o processo de solidificação do aço (Lee e Chan, 1991), evento este que leva a um aumento aparente de algumas propriedades mecânicas do material como a sua ductilidade e tenacidade à fratura.

Tabela 1 – Valores de Energia Absorvida em Ensaio de Impacto Charpy
Aço API 5L X65

Corpo de Prova #	Temperatura de Ensaio (°C)	Energia Absorvida (J)
TL-01	ambiente	184
TL-02	ambiente	185
TL-03	ambiente	216
TL-04	ambiente	154
TL-05	ambiente	174
TL-06	-120	4
TL-07	-90	-
TL-08	-80	7
TL-09	-80	60
TL-10	-80	6
TL-11	-40	126
TL-12	-40	172
TL-13	ambiente	168
TL-14	-50	118
TL-15	-60	116
TL-16	-40	132

3.3 Dificuldades encontradas e medidas corretivas adotadas

Na etapa de realização de ensaios foi encontrado o primeiro obstáculo a ser superado no desenvolvimento deste trabalho, o de como fazer para levantar a curva de transição do aço API 5L X65, microligado ao Ti e Nb. A necessidade de se conhecer a curva de transição advém da própria formulação do FRAMTiC (DeAquino, 1997). Como o modelo aqui sendo desenvolvido baseia-se na norma E1921 (ASTM, 1998), para a obtenção da tenacidade à fratura na transição deve-se inicialmente ser definida a que temperatura devem ser realizados os ensaios de tenacidade à fratura. No procedimento da ASTM esta temperatura de ensaio corresponde à temperatura em que a energia absorvida em um ensaio de impacto Charpy é igual a 28 Joules corrigida para a geometria de ensaio. Como não foi possível obter a curva de transição do material, torna-se impossível a obtenção da temperatura dos ensaios de tenacidade por esta metodologia.



Figura 4 – Superfícies de fratura apresentando *splits*

Alternativamente, de acordo com a própria E1921, esta temperatura também poderia ser calculada após realizados e validados os ensaios de tenacidade, em uma temperatura estimada a partir de valores extraídos da literatura. Esta abordagem, no entanto, não foi adotada visto que a presença de *splits* na seção transversal seria muito provável também nos corpos de prova ensaiados à fratura, o que levaria a medições incorretas dos valores de tenacidade.

Decidiu-se por realizar um tratamento térmico no material, conforme mostrado na Fig. 5, de forma a se tentar eliminar ou minimizar a ocorrência de separações. Para tal, as amostras foram austenitizadas a 920°C por um período de 40 minutos e então resfriadas em óleo de têmpera “PETRONASA 20A”. A taxa de resfriamento aproximada foi de 23°C/s.

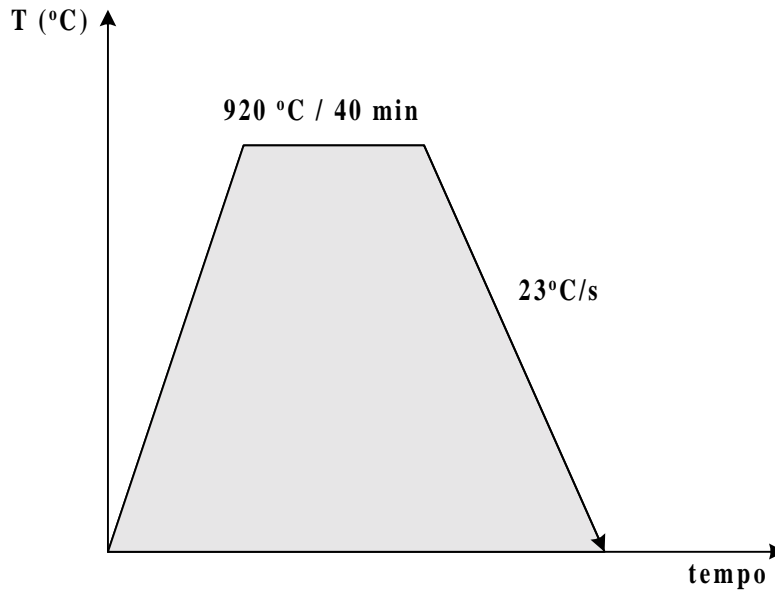


Figura 5 – Tratamento térmico corretivo aplicado ao aço API 5L X65

5. CONCLUSÕES

Constatou-se assim, a partir dos resultados obtidos em ensaios de impacto tipo Charpy, que o material estudado neste trabalho, o aço API 5L X65, não deve ter sua tenacidade à fratura avaliada pelo modelo FRAMTiC, enquanto apresentado em sua condição *as received*. Isto se deve ao surgimento de separações microestruturais, causadas por um bandejamento microestrutural, que eleva artificialmente a ductilidade do material, fazendo com que sejam medidos níveis altos e não reais de tenacidade. Procedeu-se a um tratamento térmico no material original de forma a eliminar ou minimizar o bandejamento microestrutural.

No estágio atual de desenvolvimento desta pesquisa, estão sendo realizados novos ensaios de impacto Charpy e ensaios de tenacidade à fratura, com o intuito de se verificar a validade do procedimento corretivo adotado. Espera-se que, com o sucesso do tratamento térmico realizado no material, torne-se possível a validação da aplicação do modelo FRAMTiC a aços de aplicação petroquímica, como o API 5L X65 aqui estudado.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à FAPESP, Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo, por financiar esta pesquisa através do projeto 97/13023-4.

REFERÊNCIAS

- ASTM - American Society for Testing of Materials. Standard Test Methods for Mechanical Testing of Steel Products. (ASTM. A370); Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]. (ASTM. E8-M); Standard Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. (ASTM. E23). In: 1996 Annual Book of ASTM Standards. Section 3: Metals Test Methods and Analytical Procedures. vol.03.01.
- ASTM - American Society for Testing of Materials, 1998, Test Method for the Determination of Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range. (E1921). In: 1998 Annual Book of ASTM Standards, Section 3: Metals Test Methods and Analytical Procedures, vol.03.01, Philadelphia, Pa., USA.
- DeAquino, C.T., 1997, Uma Nova Abordagem ao Fenômeno da Variação da Tenacidade à Fratura na Transição Dúctil-Frágil de Aços para Vasos de Pressão Nucleares. São Paulo: 1997. Tese (Doutorado) – IPEN, USP, Brasil.
- Hawkins, T.D., Hultgren, R., 1973, in Metals Handbook, 8th.edition, vol.8, pp.215-338. Metals Park, ASM, American Society of Metals.
- Heerens, J. ; Read, D.T. ; Cornec, A. ; Schwalbe, K.H-. Interpretation of Fracture Toughness in the Ductile-to-Brittle Transition Region by Fractographical Observations. In: Defect Assessment in Components - Fundamentals and Applications. London, England: Mechanical Engineering Publications, 1991. ESIS / EGF9, p. 659-678.
- Landes, J.D. ; Shaffer, D.H., 1980, Statistical Characterization of Fracture in the Transition Region. In: Fracture Mechanics: Twelfth Conference. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, ASTM STP 700, p. 368-382.
- Lee, H.L., Chan, S.L.I., 1991, Hydrogen Embrittlement of AISI 4130 Steel with an Alternate Ferrite/Pearlite Banded Structure. Materials Science and Engineering, vol. A142, pp.193-201.
- O'Dowd, N.P. ; Shih, C.F., 1993, Two-Parameter Fracture Mechanics: Theory and Applications, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, EUA. (NUREG/CR-5958)
- Thompson, S.W., Howell, P.R., 1992, Factors Influencing Ferrite/Pearlite Banding and Origin of Large Pearlite Nodules in the Hypoeutetoid Plate Steel, Materials Science and Technology, vol.8, no.9, pp.777-784.
- Weibull, W., 1951, A Statistical Distribution Function of Wide Applicability, Journal of Applied Mechanics.

PROBLEMS IN APPLYING THE FRAMTiC MODEL TO TOUGHNESS PREDICTION FOR A Ti-Nb MICROALLOYED STEEL

***Abstract.** The purpose of this paper is to present the problems faced when trying to apply a model developed for the fracture toughness characterization in the transition to predict the fracture behavior of a API 5L X65 steel, microalloyed to Ti e to Nb. The problems arose due to the appearance of splits caused by microstructural banding in the cross sectional area of specimens subjected to Charpy impact testing, leading to an apparent increase in the material fracture toughness. The corrective actions are also discussed in this work.*

***Keywords:** Fracture Mechanics, Structural Integrity, Ductile-to-Brittle Transition Region*