

A INFLUÊNCIA DA MICROESTRUTURA NA TENACIDADE À FRATURA DINÂMICA APARENTE DO AÇO ABNT 4340. Alexandre Tomio Koike, Ruís Camargo Tokimatsu, Fabiano da Cruz Nogueira. – Engenharia Mecânica – Engenharia Mecânica - Departamento de Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia Mecânica – Campus Ilha Solteira.

O estudo da tenacidade à fratura de um aço submetido a diferentes condições de tratamento térmico visa obter o comportamento das propriedades mecânicas dos materiais, para produzir um aço com as características desejadas evitando a ocorrência de fragilizações da estrutura. Dentro deste contexto Tokimatsu (1995), trabalhou com o aço semelhante ao aço ABNT 4340 e associou alguns indicadores característicos da fragilização da martensita revenida, que são: diminuição da tenacidade, aumento da temperatura de transição dúctil-frágil e ocorrência de fratura intergranular.

Determina-se a FMR através da plotagem das variáveis acima com a temperatura de revenido. O fenômeno da FMR é delineado pela diminuição da energia absorvida e aparece na forma de uma selha de energia – cuja profundidade pode ser usada para indicar o grau de fragilização. A maior porcentagem de fratura intergranular ocorre no ponto correspondente ao mínimo da tenacidade. Embora estes sejam indicadores inquestionáveis da FMR, a fratura intergranular não é pré-requisito para ocorrência do fenômeno, pois estudos têm mostrado que o micromecanismo de fratura associado com FMR nem sempre é intergranular. Outros micromecanismos de fratura também podem operar no processo de fragilização, tais como clivagem, quase-clivagem, microcavidades e modo misto de fragilização. Diante de tais evidências, a fragilização da martensita revenida, pode ser classificada de acordo com o caminho seguido pela trinca em: intergranular ou trangranular.

A FMR-intergranular é mais fácil de ser ativada quando agentes fragilizantes estão presentes nos contornos de grão e a tenacidade à fratura da matriz é relativamente alta. Para se entender melhor este fenômeno, é interessante desmembrar a tenacidade à fratura do aço em duas componentes: a tenacidade à fratura matriz (K_M) e a tenacidade à fratura dos contornos de grão (K_G). Com o aumento da temperatura, podem ocorrer importantes alterações nos contornos de grão, que acarretam em uma acentuada fragilização dessa região. Uma trinca sempre se propaga pelo caminho mais fácil. Se o evento da fragilização conduz à condição $K_M > K_G$, o resultado será uma alteração drástica no micromecanismo de fragilização, que passará a ser intergranular. Todavia, não necessariamente os agentes fragilizantes, decorrentes do revenido, incidem apenas nos contornos de grão. Eles podem ocorrer também no interior do grão. Neste caso, se $K_G > K_M$ a FMR ocorrerá de maneira transgranular.

Segundo Tokimatsu, 1995, vários critérios têm sido utilizados para descrever e classificar os mecanismos de fratura. Como esses critérios são baseados em requisitos com origens completamente distintas, é comum haver muita confusão. Isto ocorre devido à tendência em classificar as fraturas segundo a base dual dúctil-frágil. Sendo a palavra frágil associada a uma deformação plástica mínima, enquanto que a palavra dúctil possui uma conotação de grande deformação plástica.

Apenas em alguns casos os dois tipos de falha são perfeitamente discerníveis, na maioria das vezes não há uma distinção perfeita entre fraturas frágeis e dúcteis. Os metais podem fraturar por clivagem – mecanismo basicamente frágil, - após uma deformação plástica relativamente grande. Da mesma forma, é também possível ocorrer uma deformação macroscópica desprezível em um metal que fratura por um micromecanismo dúctil – por microcavidades. Tais acontecimentos geram muita confusão e dificultam a classificação baseada em um único critério. Como os critérios possuem origens distintas, é comum ocorrer de uma fratura ser classificada como dúctil por um determinado critério e como frágil, quando outro critério é utilizado. Necessita-se ter em mente que não existe uma classificação universal aceita para classificar os vários tipos de fratura. Portanto é necessário especificar claramente qual critério de classificação que está sendo utilizado, tais critérios serão discutidos adiante.

Devido à condição de carregamento existem quatro maneiras distintas de fratura: Fratura por Sobrecarga, Fratura por Fadiga, Fratura Assistida pelo Meio e Fratura por Impacto. O tipo de solicitação exerce influência sobre o processo.

Além dos critérios acima descritos, outros critérios são comumente utilizados para classificar as fraturas: velocidade de propagação de trinca, modo cristalográfico de fratura, aspectos macroscópicos da fratura, deformação plástica macroscópica, energia de fratura (tenacidade), deformação plástica microscópica e micromecanismos de fratura.

Os principais parâmetros utilizados, pelos diferentes critérios, para identificar e classificar a fratura sobre a base dual dútil-frágil é dado pela tabela 01. Neste trabalho se utilizará como critérios de classificação o Micromecanismo de Fratura e a Energia de Fratura.

Tabela 01 – Critérios e termos utilizados para identificar e classificar as fraturas, Tokimatsu(1995).

Critérios de Classificação	Parâmetros de Análise	Termos Característicos	
		Dútil	Frágil
Velocidade de Propagação de Trinca	Velocidade	baixa velocidade de propagação da trinca	alta velocidade de propagação de trinca
Aspectos Macroscópicos da superfície de fratura	* reflexão da luz	opaca (cinzenta)	brilhante
	* morfologia	fibrosa	granular
	* plano da fratura	normal e oblíqua	normal
Deformação Plástica macroscópica	ductilidade	alta ductilidade (grande deformação)	baixa ductilidade (pequena deformação)
Deformação Plástica microscópica	dimensão da zona plástica	maior	menor
Energia de Fratura	tenacidade	grande quantidade de energia absorvida	pequena quantidade de energia absorvida
Modo cristalográfico	forma de separação	cisalhamento	clivagem
Micromecanismo de Fratura	aspécto topográfico	microcavidades	clivagem e fratura intergranular

Foram confeccionados 150 corpos-de-prova Charpy (ASTM E-23) com o aço ABNT 4340, sendo cinco corpos-de-prova por condição de tratamento térmico. A austenitização utilizada foi a 1143K por uma hora e temperado a óleo agitado, seguido dos revenidos durante uma hora e resfriados a óleo, os tratamentos térmicos foram feitos na Unicamp - Campinas. Foi realizado o ensaio de dureza HRC UNESP – Ilha Solteira, conforme a NBR 6672/81 para todas as condições (penetrador de diamante e carga de 150kgf). O ensaio de Impacto Charpy Instrumentado (Instron Wolpert) foi realizado na USP - São Carlos, onde nos forneceu todos os dados necessários para o cálculo da tenacidade à fratura dinâmica aparente (K_{Id}).

Foram feitas análises das microestruturas através da microscopia óptica (NEOPHOT) UNESP – Ilha Solteira, as amostras foram preparadas e atacadas com nital 2% com o objetivo de verificar o tamanho médio de grão a microscopia utilizando o microscópio eletrônico de varredura (MEV) foi realizado na Unicamp – Campinas, onde foram capturadas imagens da superfície de fratura dos corpos-de-prova charpy ensaiados na USP – São Carlos.

No resultado da dureza do aço ABNT 4340 como-recebido (CRE) foi baixa. Entretanto por se tratar de um aço com boa temperabilidade, sua dureza pode ser aumentada, após ser submetida a uma tempera e pode-se diminuir a dureza com o aumento da temperatura de revenido conforme a figura 01 (a). Esta queda se deve ao processo de difusão de partículas dentro da matriz.

No gráfico da tenacidade à fratura figura 01 (b) não apresenta o mesmo comportamento do gráfico da dureza figura 01 (a). Tal comportamento da tenacidade à fratura aparente (K_{Id}) pode ser explicado pela FMR, com a presença de uma selha de fragilização localizada na temperatura de revenido de 550K.

Na figura 02 (b), na condição de revenido à 773K não foi possível uma identificação clara da separação entre a fratura à frente do entalhe e a fratura à frente da trinca, para tanto foi estimado um valor de tamanho de trinca de $400 \mu\text{m} \pm 100$. No gráfico do tamanho do avanço da trinca figura 02 (b) observa-se a presença da selha, indicando que o tamanho da zona plástica é influenciada pelo tamanho da zona plástica ensaiada e a temperatura de revenido.

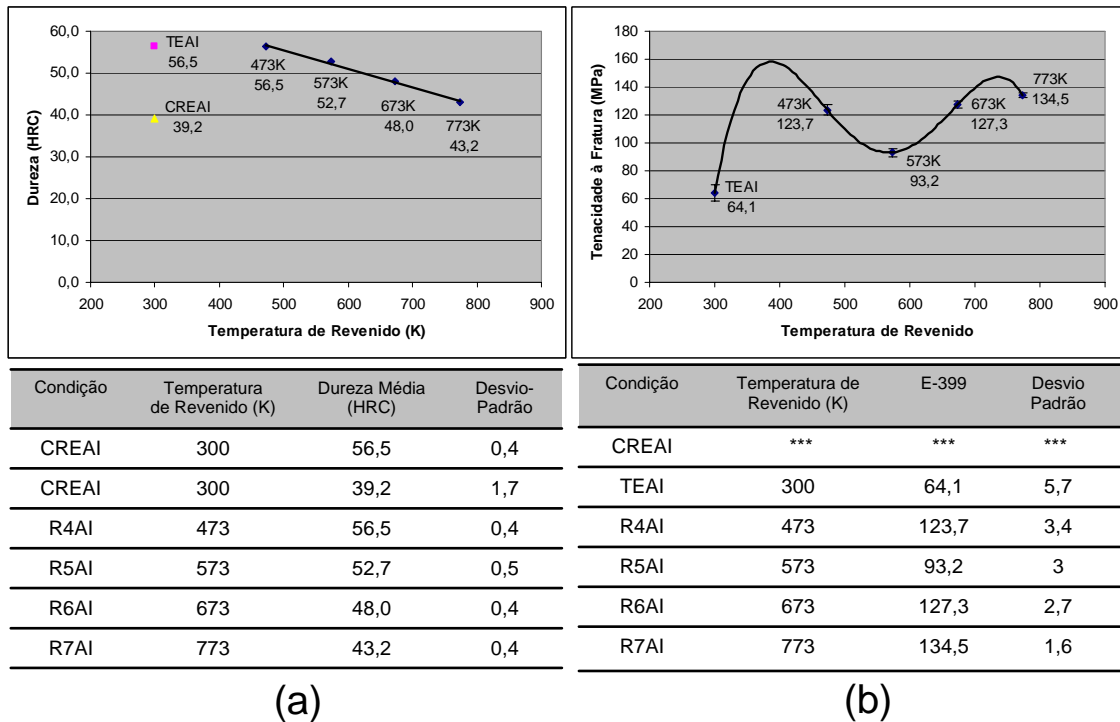


Figura 01 – (a) A influência da temperatura de revenido na dureza, (b) A influência da temperatura de revenido na tenacidade à fratura dinâmica aparente.

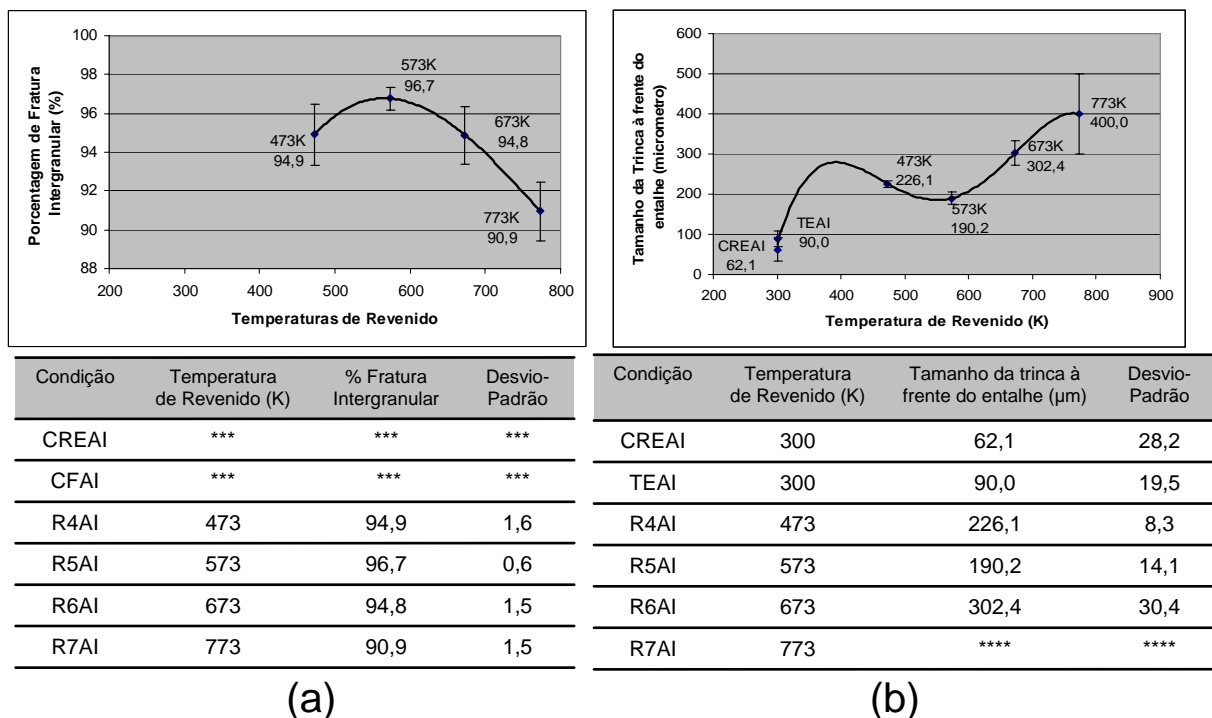


Figura 02 – (a) A influência da temperatura de revenido na porcentagem de fratura intergranular, (b) A influência da temperatura de revenido no tamanho da trinca à frente do entalhe (µm).

O presente projeto faz parte de um trabalho maior, cabendo a este projeto o objetivo de obter uma correlação entre a tenacidade à fratura aparente (K_{Id}) com o micromecanismo de fratura. Os ensaios efetuados foram: Ensaio de Dureza: neste ensaio observou-se a diminuição da dureza conforme o aumento da temperatura de revenido aumenta, devido ao amolecimento da matriz através da difusão e formação de carbonetos. Tenacidade à Fratura Aparente (K_{Id}): verificou-se a presença da selha de fragilização figura 01 (b), o fenômeno da FMR, pode estar associado à quantidade de fratura

intergranular, tal fato foi comprovado na figura 02 (a), onde se observa um aumento da porcentagem de fratura intergranular na temperatura de revenido de 550K. Este salto na condição de temperado e revenido a 550K, não foi observado no ensaio de dureza. O mecanismo que opera na FMR é complexo e não pode ser explicado por um único fator como a segregação de impurezas nos contornos de grão, a precipitação de cementita intra-ripas (fragilização Intergranular) ou a decomposição da austenita retida e subsequentemente a precipitação de filmes de cementita. Entretanto o grau de influência de cada um destes fatores depende da condição de tratamento térmico e a temperatura de austenitização a que este aço foi submetido. Deve-se observar que a degradação da tenacidade à fratura revela a presença de fragilizantes e o caminho seguido pela trinca revela a localização desses agentes. O fenômeno da FMR pode ser observado analisando as curvas: de tenacidade, de tenacidade à fratura aparente (K_{Id}) e através do tamanho do avanço de trinca nos corpos-de-prova com entalhe arredondado. Análise da superfície de fratura com o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV): Na fratura a frente do entalhe foi composta de microcavidades, em todas as condições. Foram monitorados os comprimentos de avanço da trinca por microcavidades, observando um comportamento semelhante a selha a 550K, tal fato pode ser correlacionado com volume de material ensaiado (tamanho da zona plástica) e a temperatura de revenido. Após o mecanismo de microcavidades ocorre uma mudança no modo de fratura à frente da trinca, devido ao novo estado de tensões (trinca aguda), promovendo uma mudança no modo de fratura onde passa a apresentar fratura mista: de microcavidade e clivagem na condição como-recebida e por microcavidades e fratura intergranular nas condições de revenido. Observou-se que na condição de ocorrência da selha (revenido 550K) de FMR, apresentou um aumento da quantidade de fratura intergranular (este aumento da fratura pode ser confirmado analisando visualmente as fotos de cada condição). Indicando que o mecanismo de fragilização que atua se localiza nos contornos de grãos, para um aço ABNT 4340, submetido a austenitização a 1143K e revenido a 550K.

Referências Bibliográficas

- ASM – Metals Handbook – Toughness and fracture machanics, in: Failure Analysis and Prevention, v.10, 8º ed., Metals Park, Ohio, 1975, p.30-44.
- TOKIMATSU, R.C.” Inconvenientes e Confusões Decorrentes da Classificação de Fraturas Segundo a Base Dual Dúctil-Frágil “ – 53ºCongresso Anual da ABM – Belo Horizonte - MG (1998).
- TOKIMATSU, R.C.” Influência de parâmetros microestruturais e procedimentos de ensaio, no comportamento mecânico de um aço de ultra-alta resistência e baixa liga “ Tese de Doutorado – Unicamp – São Paulo (1995).

Bolsa: FAPESP