

ÍKARO AMORIM E SILVA

Correlações Entre Zona de Estiramento e Tenacidade à Fratura para Aço 15-5PH

Guaratinguetá – SP

2016

IKARO AMORIM E SILVA

Correlações Entre Zona de Estiramento e Tenacidade à Fratura para Aço 15-5PH

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Luis Rogerio de Oliveira
Hein

Guaratinguetá – SP

2016

S586c Silva, Ikaro Amorim e
Correlações entre zona de estiramento e tenacidade à fratura para aço 15-5PH
/ Ikaro Amorim e Silva. – Guaratinguetá, 2016.
49 f : il.
Bibliografia: f. 47-49

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual
Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.
Orientador: Prof. Dr. Luis Rogerio de Oliveira Hein

1. Mecânica da fratura 2. Aço – Fratura 3. Cisalhamento I. Título

CDU 620.172.24

IKARO AMORIM E SILVA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. LUIS ROGERIO DE OLIVEIRA HEIN
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. PETERSON LUIZ FERRANDINI
UNESP-FEG


Eng. MARCUS NATHAN SILVESTRE
UNESP-FEG

Abril de 2016

de modo especial, à meu pai Ismael que sempre apoiou e me serviu de inspiração e à minha mãe Sueli que na ausência dele sempre lutou para que esse sonho se concretizasse.

AGRADECIMENTOS

Novamente agradeço aos meus pais por terem me proporcionado sempre uma educação de grande qualidade e me preparar para os desafios que enfrentei e ainda vou enfrentar, e ao meu irmão que sempre me ajudou, apoiou e torceu por mim,

à minha tia Ivone Lopes, que também me apoiou e tenho certeza que acredita muito em mim,

ao meu orientador, *Prof. Dr. Luis Rogerio de Oliveira Hein* que me apoiou nessa jornada sempre com sorriso no rosto e uma conversa boa, e também com paciência de esclarecer as várias dúvidas que tive durante a elaboração do trabalho,

ao colega *Pietro Carelli Reis de Oliveira Caltabiano* por ter contribuído grandemente para esse trabalho, pois o presente trabalho se utiliza dos corpos de prova e resultados dos ensaios mecânicos realizados em sua tese de mestrado,

à toda a família da República Ama-Zonas, que me apoiaram durante toda a minha graduação e me ensinaram muita coisa que levarei pro resto da vida, agradecimento especial ao Daniel Gori Lima que foi amigo desde o começo e por mais que não esteja aqui na minha graduação sei que está muito feliz por mim,

à minha namorada Jéssica, que me incentivou, me ensinou muito e me ajudou a manter o foco na faculdade durante todo o período, sempre com muito carinho e compreensão.

ao meu grande amigo de longas datas Marcos Medeiros Raimundo que sempre me ajudou, e até nesse trabalho me deu algumas dicas muito importantes para a conclusão desse trabalho.

“Só é digno da liberdade, como da vida, aquele
que se empenha em conquistá-la.”

Johann Goethe

SILVA, I. A. **Correlações Entre Zona de Estiramento e Tenacidade à Fratura para Aço 15-5PH**. 2016. 49 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

RESUMO

Este trabalho contempla um estudo sobre a zona de estiramento e a influência das condições de tenacidade no momento da fratura nas suas dimensões e aparência. Foi realizada uma revisão bibliográfica abordando propriedades do material, conceitos de mecânica da fratura, definições e formação da zona de estiramento, importância da tenacidade para cálculo estrutural, métodos e normas para definir a tenacidade a fratura de materiais metálicos além de apresentar o método utilizado na microscopia. Após a revisão bibliográfica foram realizadas identificação e medidas das zonas de estiramento dos corpos de provas através de microscopia ótica confocal e posteriormente analisados os resultados a fim de encontrar relações entre os valores obtidos com a teoria.

PALAVRAS-CHAVE: Zona de estiramento. Tenacidade à Fratura.

SILVA, I. A. **Relationship between stretch zone and fracture toughness for 15-5PH steel.** 2016. 49 f. Graduate Work (Graduate in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

ABSTRACT

This work includes a study on the stretch zone and the influence of the toughness conditions at fracture in size and appearance. It was done a literature review about material properties, fracture mechanics concepts, definitions and formation of stretch zone, importance of tenacity for structural calculation, methods and standards to measure the toughness of metallic material fracture and presents the method used in microscopy. After the literature review were carried out identification and measurements of stretch zones of proof bodies were made through confocal optical microscopy and then analyzed the results in order to find relationships between the values obtained with the theory.

KEYWORDS: Stretch zone, fracture toughness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modo de Abertura de Trincas	15
Figura 2 - Efeito da tenacidade no mecanismo governante da fratura	16
Figura 3 - Dimensões da zona de estiramento	17
Figura 4 - Regiões apontadas na zona de estiramento	18
Figura 5 - Formação da zona de estiramento no arredondamento da ponta da trinca	19
Figura 6 - Fluxograma de metodologia	22
Figura 7 - Posição dos CDP's em relação a chapa laminada.....	24
Figura 8 - Câmara Climática INSTRON	25
Figura 9 - Dimensões dos corpos de prova	26
Figura 10 - Perfilômetro Leica DCM 3D	27
Figura 11 - Posicionamento dos campos de amostragem.....	28
Figura 12 - Superfície da fratura nos corpos de prova: a) -150°C b) -100°C c) -50°C d)23°C.....	30
Figura 13 - Medidas da zona de estiramento realizadas.....	31
Figura 14 - CDP à -150°C em 20x	32
Figura 15 - CDP à 23°C em 20x.....	32
Figura 16 - Exemplo de determinação da ze a) evidenciando a ze b) original.....	33
Figura 17 - Exemplo de medida de Lze.....	33
Figura 18 - Definição de Hip _{ze}	34
Figura 19 - Lze x Kc todos os valores	38
Figura 20 - Hze x Kc todos os valores	38
Figura 21 - Hip _{ze} x Kc todos os valores	39
Figura 22 - Lze x Hze todos os valores	39
Figura 23 - Lze x Kc desconsiderando 23°C.....	40
Figura 24 - Hze x Kc desconsiderando 23°C	41
Figura 25 - Hip _{ze} x Kc desconsiderando 23°C	41
Figura 26 - Lze x Hze desconsiderando 23°C	42
Figura 27 - Selecionando os parâmetros de entrada do programa.....	43
Figura 28 - Visualização das soluções propostas	44
Figura 29 - Frequência das variáveis utilizadas	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limites para composição química.....	23
Tabela 2 - Composição química por espectrometria de emissão ótica a vácuo	23
Tabela 3 - Condições de abertura da pré-trinca por fadiga.....	26
Tabela 4 - Valores de Kc do aço 15-5PH	29
Tabela 5 - Valores obtidos pelo ensaio mecânico e microscopia	35
Tabela 6 - Média dos valores incluindo 23°C	37
Tabela 7 - Média dos valores desconsiderando 23°C.....	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	American Society for Testing Materials
CDP	Corpo de Prova
CTOA	Crack-tip Opening Angle
CTOD	Crack-tip Opening Displacement
MEV	Microscopia Eletronica de Varredura
MFEL	Mecânica da Fratura Elasto-Linear
MFEP	Mecânica da Fratura Elasto-Plástica
MFLE	Mecânica da Fratura Linear Elástica
HSLA	High Strength Low Alloy
ze	Zona de Estiramento

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Comprimento de meia trinca	m
a_0	Comprimento inicial da meia trinca	m
B	Espessura do CDP	m
G	Taxa de liberação de energia elástica	J/m^2
H_{ze}	Altura da zona de estiramento	μm
$H_{ip_{ze}}$	Hipotenusa do triângulo formado por L_{ze} e H_{ze}	μm
J	Tenacidade à fratura elasto-plástica	$Mpa \cdot m^{1/2}$
J_i	Tenacidade à fratura elasto-plástica no início da trinca	$Mpa \cdot m^{1/2}$
K	Fator de intensidade de tensões	$Mpa \cdot m^{1/2}$
K_c	Fator de intensidade de tensões crítico	$Mpa \cdot m^{1/2}$
K_{Ic}	Fator de intensidade de tensões crítico no modo I de fratura	$Mpa \cdot m^{1/2}$
K_{IIc}	Fator de intensidade de tensões crítico no modo II de fratura	$Mpa \cdot m^{1/2}$
K_{IIIc}	Fator de intensidade de tensões crítico no modo III de fratura	$Mpa \cdot m^{1/2}$
L_{ze}	Largura da zona de estiramento	μm
r_p	Raio plástico	m
δ	Abertura da ponta da trinca	m
Δa	Variação da extensão da trinca igual a $a - a_0$	m
σ	Tensão externa aplicada	Mpa
θ'	Angulo entre o plano médio da pré-trinca de fadiga e o plano médio da zona de estiramento	rad

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	TENACIDADE A FRATURA	14
3	ZONA DE ESTIRAMENTO	17
3.1	DEFINIÇÃO	17
3.2	FORMAÇÃO	18
3.3	DIMENSÕES	20
4	MATERIAIS E MÉTODOS	22
4.1	INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	22
4.2	O MATERIAL	23
4.3	ENSAIOS MECÂNICOS	24
4.4	MICROSCOPIA	27
5	RESULTADOS	29
5.1	ENSAIOS MECÂNICOS	29
5.2	MICROSCOPIA	30
5.3	CORRELAÇÃO ENTRE ZONA DE ESTIRAMENTO E TENACIDADE À FRATURA	34
5.4	ANÁLISE DOS DADOS	37
5.4.1	Incluindo os valores à 23°C	37
5.4.2	Deconsiderando os valores à 23°C	39
5.5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	42
5.6	PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS	43
6	CONCLUSÃO	46

1 INTRODUÇÃO

A análise de defeitos e trincas vem sendo estudada para compreender as circunstâncias que levaram determinada estrutura a falhar, procedimento muito útil no ambiente industrial para melhorias no produto e evitar que não ocorra a falha novamente. A mecânica da fratura estuda a influência das falhas e trincas sobre o comportamento do material até a falha, vendo como elas podem influenciar nas propriedades mecânicas.

A fractografia, ou seja, análise de imagens da superfície da fratura é amplamente utilizada para identificar os processos que levaram a fratura, e nesse trabalho o estudaremos o comportamento da zona de estiramento e sua relação com propriedades mecânicas importantes. Antes da ruptura do material existe uma propagação estável da trinca, esse processo gera uma região diferenciada que é denominada zona de estiramento (ze), a formação dessa região se relaciona com a tenacidade a fratura do material devido ao seu mecanismo de formação. Por fornecer informações sobre a tenacidade do material no momento da fratura cresce o interesse por determinar as propriedades dessa região. (SCHWALBE et al., 1993).

Vários autores como Amouzouvi e Bassim (1982), Broek (1974), Sivaprasad et al. (2001) e outros vêm relacionando as dimensões da zona de estiramento com a tenacidade a fratura do material para diversos materiais.

Portanto o principal objetivo deste trabalho é estabelecer uma relação entre as dimensões da zona de estiramento e a tenacidade à fratura do material medida experimentalmente, e com isso ter parâmetros para poder estimar as condições no momento da fratura baseados nas dimensões da zona de estiramento. O material de estudo desse trabalho é o 15-5PH que foi concedido por uma empresa do ramo de aeronaves onde é muito importante a redução de peso e aumento da resistência das estruturas, e a fractografia tem sido fundamental no desenvolvimento de estruturas com essas qualidades principalmente quando são realizados testes destrutivos em peças da aeronave.

2 TENACIDADE À FRATURA

Tenacidade é uma propriedade muito importante do material e representa a capacidade do material de absorver energia até o momento da fratura a fratura, essa capacidade pode indicar a capacidade de suportar o crescimento de uma trinca preexistente, e por trinca pode se entender desde uma pequena descontinuidade, inclusão ou defeito de solda. Essas falhas no material são presentes em praticamente todos os materiais, portanto para simplificar assume-se que todos os materiais possuem os mesmos.

As aproximações comumente usadas não levam em consideração os defeitos do material, porém na mecânica da fratura esses defeitos são levados em conta.

O comportamento da fratura está relacionado aos micro-mecanismos que as originam. Podemos classificar a fratura quanto ao seu comportamento em dúctil ou frágil, a fratura frágil resulta numa rápida e instável propagação da trinca e o ponto de início da trinca fica evidente e bem definido macroscopicamente e a tenacidade neste caso pode ser definida por um único valor. A fratura dúctil por outro lado, que resulta numa propagação mais lenta e estável da trinca, e para definição da tenacidade é necessário a construção da curva R. Além da classificação quanto ao comportamento da fratura observa-se também o comportamento da deformação em elástico-linear (MFEL) e elasto-plástica (MFEP). (ZHU, 2012)

O conceito de Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) é utilizado para materiais com fratura frágeis ou com a fratura no estado de deformação plana com r_p inferior a 1/50 da espessura. E para esse caso a tenacidade à fratura é avaliada pelo fator de intensidade de tensão (K). (CALTABIANO, 2011)

O conceito de Mecânica da Fratura Elasto-Plástica (MFEP) é utilizado em em materiais com espessura reduzida (tensão plana) ou que apresentem ductilidade considerável, nesses casos é utilizado para determinação da tenacidade à fratura o CTOD e a “tenacidade à fratura elasto plástica” (J). (CALTABIANO, 2011)

Os testes para determinação dos valores de tenacidade são imprescindíveis para obtenção de valores confiáveis e vêm sendo realizados intensamente desde 1950 para obtenção de valores críticos para G ou K, J ou δ , CTOD ou CTOA e curvas que relacionam esses valores. (ZHU, 2012)

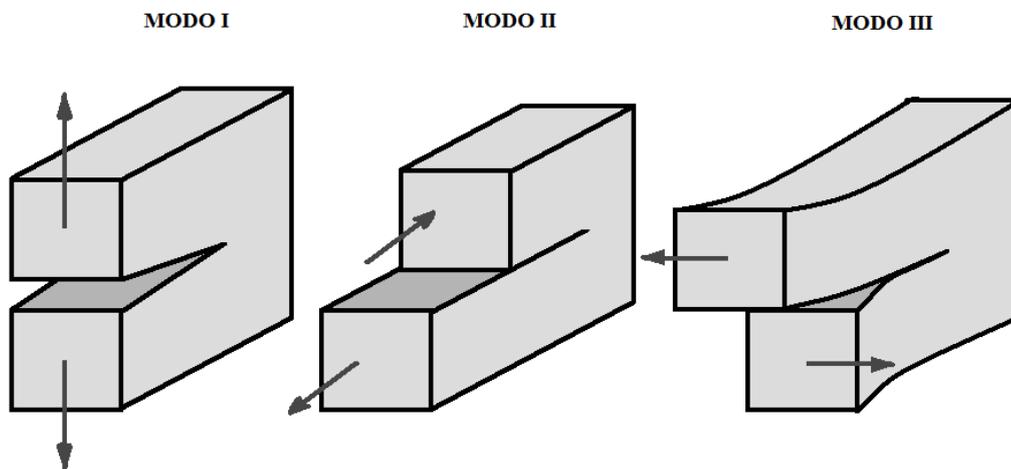
Para valores de K acima do valor crítico K_c , obtemos uma propagação instável da trinca, que provocaria a falha na nossa estrutura e para valores abaixo do K_c podemos encontrar uma propagação estável ou até mesmo não ocorrer propagação da trinca. Porém a limitação do K_c é

a necessidade de avaliar materiais com espessura semelhante, para que a o estado triaxial de tensões seja semelhante. Essa influência da espessura do material passa a não influenciar a medida que se toma dimensões suficientes para restringir a deformação do material e ocorre a deformação plana, e para esse caso o K_c é denominado K_{Ic} , K_{IIc} e K_{IIIc} para cada um dos modos de fratura. Enquanto K_c varia de acordo com as dimensões do material K_{Ic} , K_{IIc} e K_{IIIc} são propriedades do material e não variam com as dimensões do corpo de prova, podendo ser usado para projetos de estruturas de diferentes geometrias. (CALTABIANO, 2011)

Existem três tipos de modo de fratura de acordo com a direção a direção em que o esforço que originou a trinca, o tipo de esforço normal ao plano da trinca caracteriza o modo I e é o mais comum e é também o modo de fratura que foi utilizado nos corpos de prova do presente trabalho. Nos dois outros modos o deslizamento é paralelo à superfície da fratura.

Não existe um padrão estabelecido teste de modos combinados, principalmente para materiais dúcteis. Mas esses modos vêm ganhando cada vez mais importância, já que se assemelha mais aos esforços que uma estrutura em situação real sofre, um exemplo é SRINIVAS et al. (2004) analisou os efeitos do modo I e do modo III.

Figura 1 – Modos de abertura de trincas



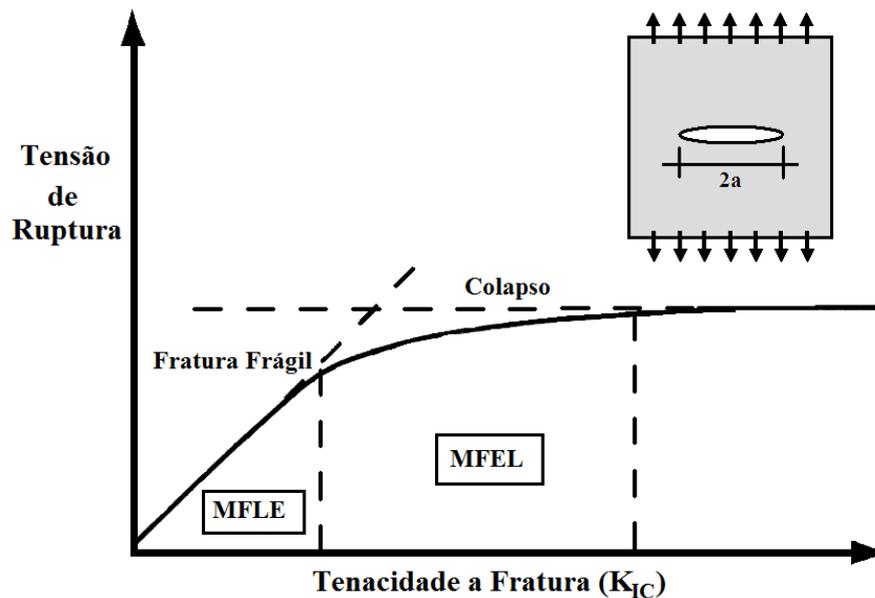
Fonte: Caltabiano (2011)

A partir de análise dimensional chegou-se à conclusão de que K era proporcional a tensão σ e também proporcional a raiz quadrada do comprimento característico. Onde $f(a/W)$ é o comprimento característico e dependerá das dimensões e da geometria do CDP. O fator $f(a/W)$ será igual a 1 quando o tamanho da placa tender a infinito, e o tamanho da trinca for $2a$. (JANSSEN; ZUDEIMA; WANHILL, 2006)

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot f(a/W) \quad (1)$$

Para o regime MFLE a tensão crítica de fratura varia linearmente com o valor de K:

Figura 2 – Efeito da tenacidade no mecanismo governante da fratura



Fonte: Caltabiano (2011)

As proporções da peça influenciam os valores de tenacidade encontrados, a espessura dos corpos influencia na tenacidade até o um valor crítico, a partir da espessura crítica obtém-se na fratura o valor da tenacidade de estado de deformação plana K_{IC} . E o K_{IC} é a maior tensão que um material com fratura em estado plano pode sofrer antes da fratura. O K_{IC} é uma propriedade do material e com isso podemos encontrar valores em na literatura e podemos ter um parâmetro de comparação.

Portanto, de acordo com Pisarenko et al. (1987), a tenacidade na fratura é afetada por diversos fatores como temperatura, taxa de carregamento ou encruamento. Porém, desde que exista o estado de deformação plana frente a trinca as dimensões ou geometria da peça não influencia.

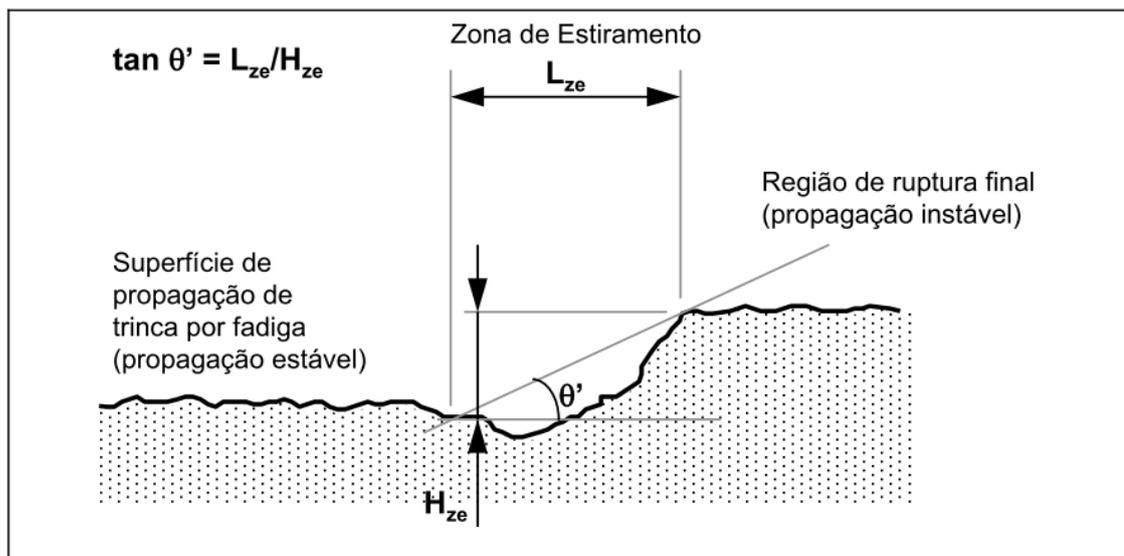
3 ZONA DE ESTIRAMENTO

3.1 Definição

A zona de estiramento é a região entre a propagação estável e instável da trinca, essa transição entre os dois mecanismos de fratura pode ser observada em materiais com ductilidade suficiente para desenvolvê-la. (HEIN, 1996)

Advinda da sobrecarga que leva a ruptura, essa região apresenta uma superfície lisa e inclinada entre planos de alturas diferentes, com evidências de deformação plástica e pode ser medida tanto na sua altura quanto na sua largura conforme a figura 3. Obrigatoriamente o arredondamento da ponta da trinca se dá por esse mecanismo. (HEIN, 1996)

Figura 3 – Dimensões da zona de estiramento



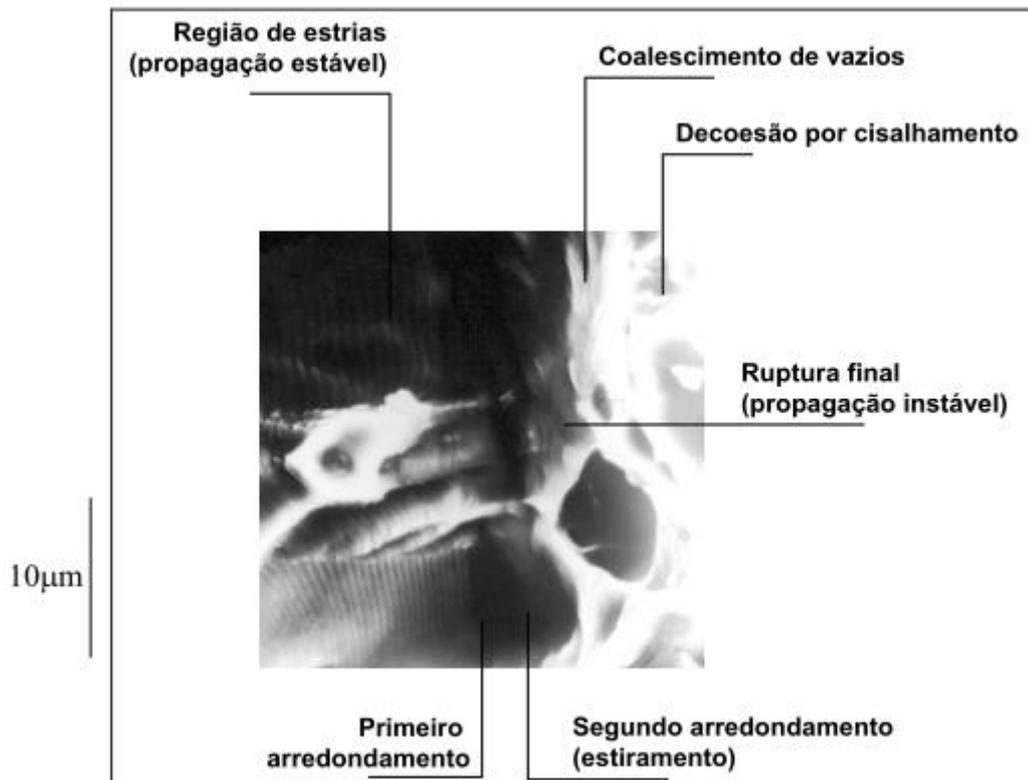
Fonte: Hein (1996)

O arredondamento da ponta da trinca se dá por conta durante a deformação plástica presente na fratura elasto-plástica, a assim observa-se a formação da zona de estiramento. (HEIN, 1996)

El-Soudani (1985 apud HEIN, 1996) observa em aços baixa liga, cinco regiões na zona de estiramento e classifica-as de acordo com os mecanismos de fratura envolvidos. Embora não seja possível sempre identificar todos os mecanismos, seguem os cinco mecanismos citados do processo:

- Primeiro arredondamento à frente da trinca;
- Primeira linha de vazios;
- Segundo arredondamento (estiramento);
- Crescimento da trinca por coalescência de vazios, em zigue-zague;
- Decoção por cisalhamento de bandas conjugadas.

Figura 4 – Regiões apontadas na zona de estiramento



Fonte: Hein (1996)

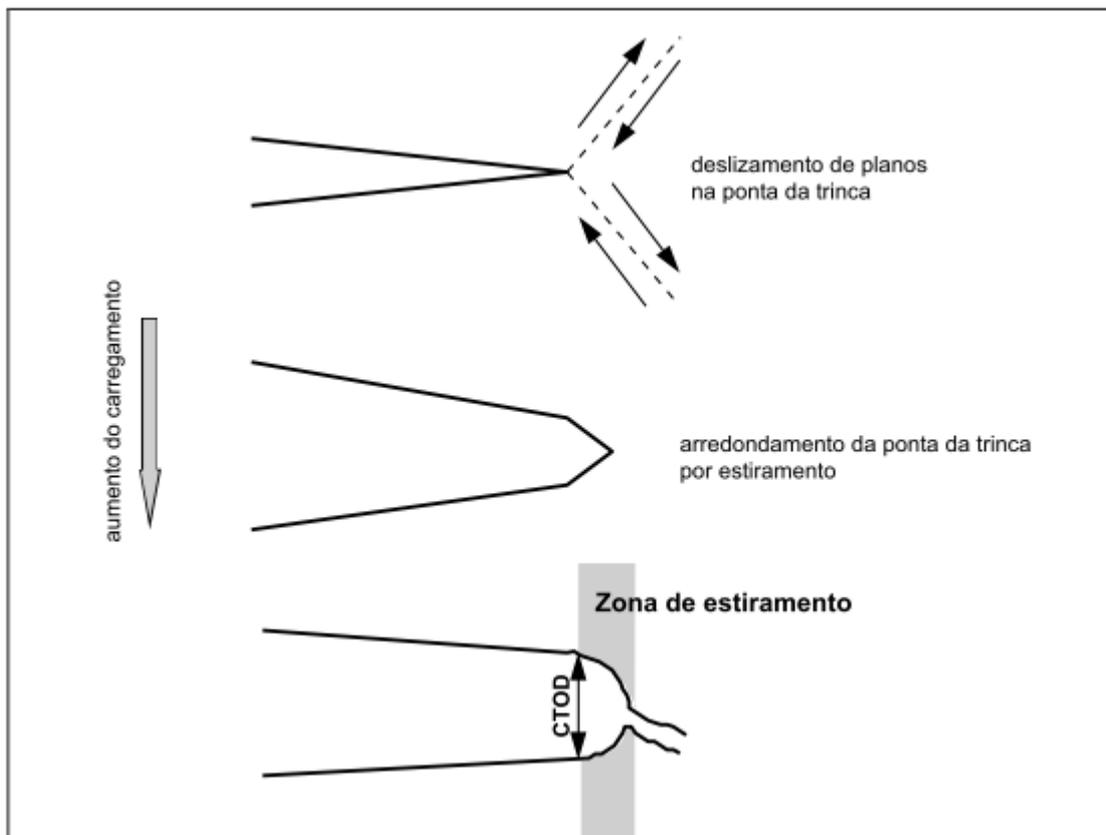
Um ponto importante a ser comentado é que ocorrência de clivagem na frente de trinca da trinca mista pode fazer com que a zona de estiramento não apresente uma formação regular ao longo de toda a frente de trinca, dependendo do estado de deformação plana e das condições locais de ductilidade. (HEIN, 1996)

3.2 Formação

Segundo Hein (1996) a formação da zona de estiramento ocorre em três etapas:

- Com aplicação de cargas externas inicia-se o processo de abertura da trinca com o arredondamento da ponta da mesma por conta da deformação plástica, enquanto começam a surgir os primeiros vazios a sua frente.
- Aumentam-se os vazios e a zona de estiramento até atingir o estado crítico de tenacidade à fratura, o que define o ponto crítico quanto a zona de estiramento pode crescer é a tenacidade do material.
- Por coalescimento dos vazios a trinca se propaga de forma instável, nessa fase já foi encerrado o processo de deformação plástica.

Figura 5 – Formação da zona de estiramento no arredondamento da ponta da trinca



Fonte: Hein (1996)

O gráfico $J - \Delta a$ mostra os processos de arredondamento da ponta da trinca, início da trinca e a propagação instável da trinca. A deformação plástica localizada é responsável pelo arredondamento da ponta da trinca e posteriormente pela formação da zona de estiramento. (WEIDNER et al., 2013)

Determinar a tenacidade da fratura em materiais dúcteis é difícil em comparação com materiais frágeis, em que o início da trinca é facilmente identificado. A fratura dúctil tem particularidades da fratura plástica-elástica que é definida por parâmetros como J_i

.comprimento e largura da zona de estiramento que a torna mais complexa. (NARASIAH et al., 2009)

Várias técnicas podem ser usadas para identificar a topografia do material evidenciando a zona de estiramento no material, pode ser usado microscopia ótica confocal como no presente trabalho outra alternativa é uso do MEV (microscópio eletrônico de varredura). No MEV é impossível medir a topografia em 3D do material sem se usar de se usar de reconstrução estereoscópica. (WEIDNER et. al, 2013)

Usualmente para medidas da tenacidade à fratura dos materiais pode-se usar o ensaio Charpy, mas para o caso de uma deformação elástico plástico pode ficar mais difícil chegar a esses valores o que nos leva a necessidade de análise da topografia da fratura para avaliar a zona de estiramento. (BLUMENAUER; WAGNER, 1984)

3.3 Dimensões

Existe uma grande dificuldade em determinar as fronteiras da zona de estiramento, e é bem conhecido que deve haver uma certa dispersão entre os valores das medidas de altura e largura da zona de estiramento caso tenham sido realizadas por pessoas diferentes, mesmo que sejam pessoas bem qualificadas para a tarefa. (WEIDNER et al., 2013)

Um experimento foi realizado para analisar essa dispersão: foram fornecidas as mesmas amostras para 14 participantes de diferentes instituições ou empresas a fim de realizar medidas da largura da zona de estiramento L_{ze} . Como resultado puderam observar que a dispersão nos resultados não era dependente da habilidade do pesquisador e que em 90% dos casos essa dispersão permanecia inferior à 35% da L_{ze} . (HEERENS et al., 1988)

É importante ressaltar que as dimensões da zona de estiramento vêm sendo estudada por diversos autores portanto define-se L_{ze} como o comprimento da zona de estiramento e como H_{ze} como a altura da zona de estiramento. Define-se também θ' como o ângulo da semi-reta formada entre os pontos que limitam a zona de estiramento.

Como já discutido anteriormente pode-se utilizar de dimensões da zona de estiramento para estimativa da tenacidade a fratura, o que nos traz à questão sobre qual dimensão usar altura ou largura. Ambas tem sido amplamente pesquisadas para estimativas de valor, mas ainda não há um consenso sobre qual dessas duas dimensões deve-se usar. Algumas publicações apontam para um dos parâmetros mas para materiais específicos, no presente trabalho foram levantados

ambos os parâmetros para poder identificar qual dos dois apresenta maior correlação com os resultados experimentais. (SIVAPRASAD et al., 2001)

Sivaprasad et al. (2001) concluiu que para aços HSLA pode ser melhor observada a tendência da tenacidade através de H_{ze} para quando existem condicionantes externos como pré-tensões e o através L_{ze} quando a deformação do material é de modo homogênea.

Das et al. (2006) também trabalhando com aços HSLA observou um leve aumento do L_{ze} com o aumento da temperatura de envelhecimento da liga, isso evidencia que tratamentos térmicos podem influenciar no tamanho da zona de estiramento.

Drab (1995) observou o aumento da zona de estiramento relacionado ao aumento da temperatura para além da transição frágil-dúctil em aços médio carbono, fruto de uma maior taxa de deformação ocorrido pela presença do mecanismo de fratura por clivagem.

A aproximação mais comumente usada é a que considera L_{ze} e H_{ze} com mesmo tamanho e conseqüentemente o $\theta = 45^\circ$, que é baseada num formato semi-circular da zona de estiramento. Porém essa aproximação é bastante discutida e vários resultados experimentais apontam para proporções diferentes dessa. (HEIN, 1996)

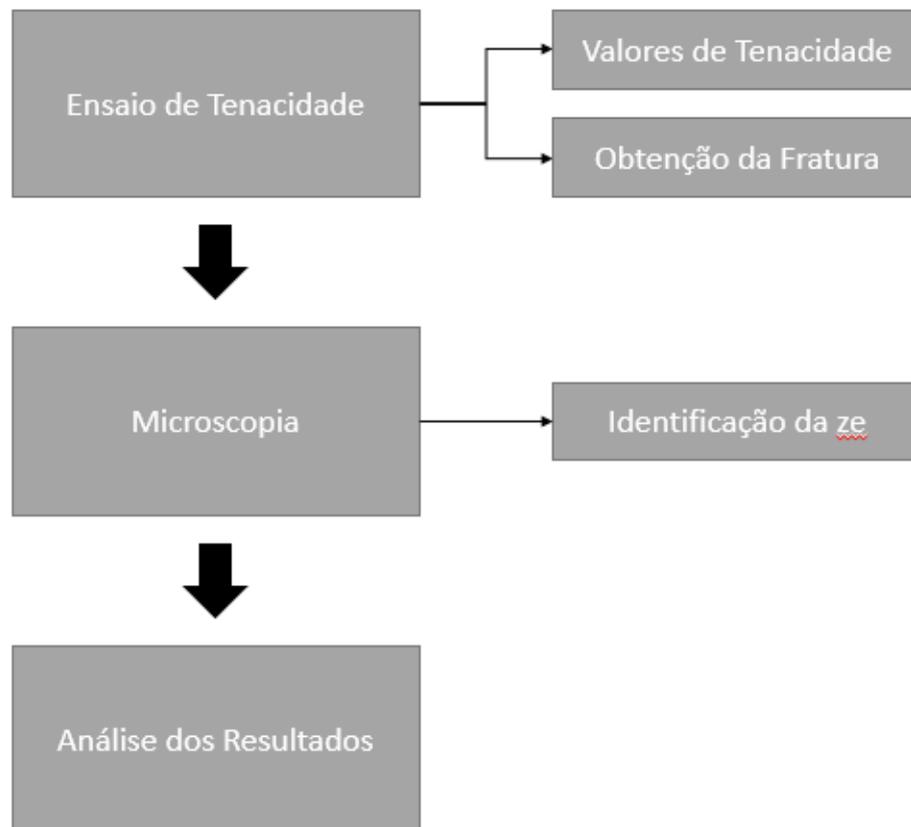
Broek (1974), utilizando-se de ligas de alumínio da série 7XXX, encontrou valores de L_{ze}/H_{ze} entre 1,22 e 1,70.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Introdução e Objetivos

Esse trabalho tem como objetivo implementar a metodologia para buscar relações entre as dimensões da zona de estiramento e a tenacidade à fratura, na figura 6 é apresentado o fluxograma da metodologia utilizada.

Figura 6 – Fluxograma da Metodologia



Fonte: Produção do próprio autor.

Para tanto foi necessário identificar os limites da zona estirada nos corpos de prova, tomando para cada um dez medidas realizadas no terço central. Foi escolhida essa região a fim de que ocorra sempre deformação em estado plano.

4.2 O Material

Neste trabalho foram utilizados os corpos de prova de aço 15-5PH ensaiados no trabalho de CALTABIANO (2011), ele justificou sua escolha pelo fato de o material ter alta tenacidade e comportamento dúctil na fratura, isso favorece a avaliação de ligas metálicas com fratura no regime elasto plástica.

O aço em questão foi utilizado na condição H1150-M, dureza 30 HRC, resistência a tração 1045 MPa e limite de escoamento de 752 MPa em chapas de 20 mm fornecido pela EMBRAER. (CALTABIANO, 2011)

O 15-5PH (UNS S15500) é um aço inoxidável martensítico endurecível por precipitação, avaliado como um material com uma boa combinação de propriedades e por isso é usado em diversas aplicações como componentes aeronáuticos e para reatores nucleares, partes de motor e componentes usados na indústria química. As aplicações desse material são justificadas pela sua boa tenacidade e a liga pode ser encontrada comercialmente de diversas formas como: em barras, tubos, placas, chapas, anéis, arames e forjados. (AK STEEL, 2007)

A tabela a seguir mostra os limites para composição química da liga:

Tabela 1 – Limites para composição química (% em peso)

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Cu	Nb+Ta
0,07	1,00	0,04	0,03	1,00	14,00 -	3,50 -	2,50 -	0,15 -
máx	máx	máx	máx	máx	15,50	5,50	4,50	0,45

Fonte: AK STEEL (2007)

Tabela 2 – Composição química por espectrometria de emissão ótica a vácuo (% em peso)

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Cu
0,04	0,80	0,021	0,002	0,32	14,61	4,65	3,13

Fonte: Caltabiano (2011)

O uso de tratamentos em materiais com endurecimento por precipitação pode melhorar suas propriedades como resistência mecânica e contra corrosão, o envelhecimento com precipitação submete o material a um longo ciclo de tratamento térmico a baixa temperatura e assim desenvolve microestrutura específica da liga. Esse tratamento é realizado após os processos de fabricação, geralmente, por este causar endurecimento que por sua vez aumentaria

os custos de usinagem. As condições de tratamento H1150-M são ($621^{\circ}\text{C} \pm 6$) e ($3,0 \text{ hora} \pm 0,3$). (AK STEEL, 2007)

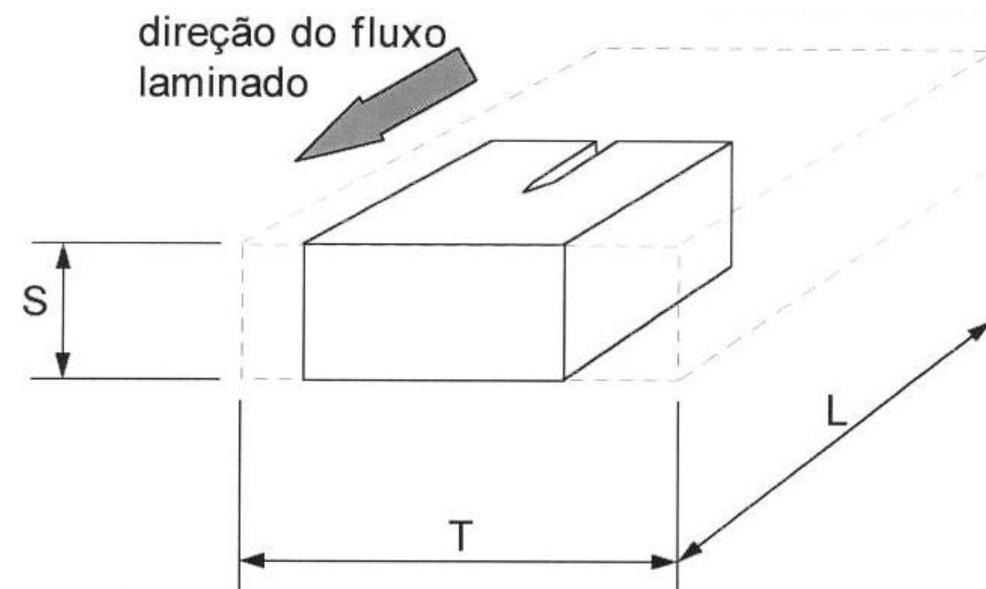
Aços inoxidáveis são ligas de ferro e cromo e nesse caso possui 14,5 %, além de outros elementos de liga e sua principal característica é a resistência à oxidação atmosférica, o que os torna desejáveis para desempenhar papéis que a oxidação é intensa como tubulações que transportam oxidantes, maquinários de indústria química e alimentícia e diversa outras atividades em que o material estará sujeito a condições que o levariam a oxidar. Os aços inoxidáveis podem ser martensíticos, endurecíveis por precipitação, austeníticos, ferríticos ou duplex.

4.3 Ensaio Mecânicos

Os corpos de prova foram ensaiados no trabalho de CALTABIANO (2011) a fim de avaliar a tenacidade à fratura e gerar superfície de fratura para posterior análise da zona de estiramento. No experimento foram introduzidas mudanças no comportamento elasto-plástico através da redução da temperatura. Vale mencionar que no trabalho mencionado além do aço 15-5PH, também foi ensaiado o Alumínio 7475.

Os corpos de provas são oriundos de uma mesma placa e usinados na orientação T-L conforme ASTM E 399 (ASTM, 2008), vide figura 7.

Figura 7 – Posição dos CDP's em relação a chapa laminada



Fonte: Caltabiano (2011)

O equipamento utilizado nos ensaios foi a máquina universal servo-hidráulica INSTRON 8810 do Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – UNESP. Os ensaios visavam a obtenção de valores para tenacidade à fratura no modo I, para tanto foi obedecida a norma ASTM E399 (ASTM, 2008) que aborda a obtenção de valores de K_{Ic} em corpos de prova com entalhes em dimensões especificadas na norma. Embora que, por razões que serão discutidas posteriormente, foi medido K_c invés de K_{Ic} nesses ensaios.

A fim de observar mudanças no comportamento elasto plástico do material e suas características em diferentes temperaturas foi usada uma câmara climática INSTRON, com sistema de refrigeração por nitrogênio líquido (Figura 8). Com isso pode-se estudar diferentes condições de tenacidade, bem como produzir fraturas nos corpos de prova em quatro temperaturas distintas: 23 °C, -50 °C, -100 °C, -150 °C.

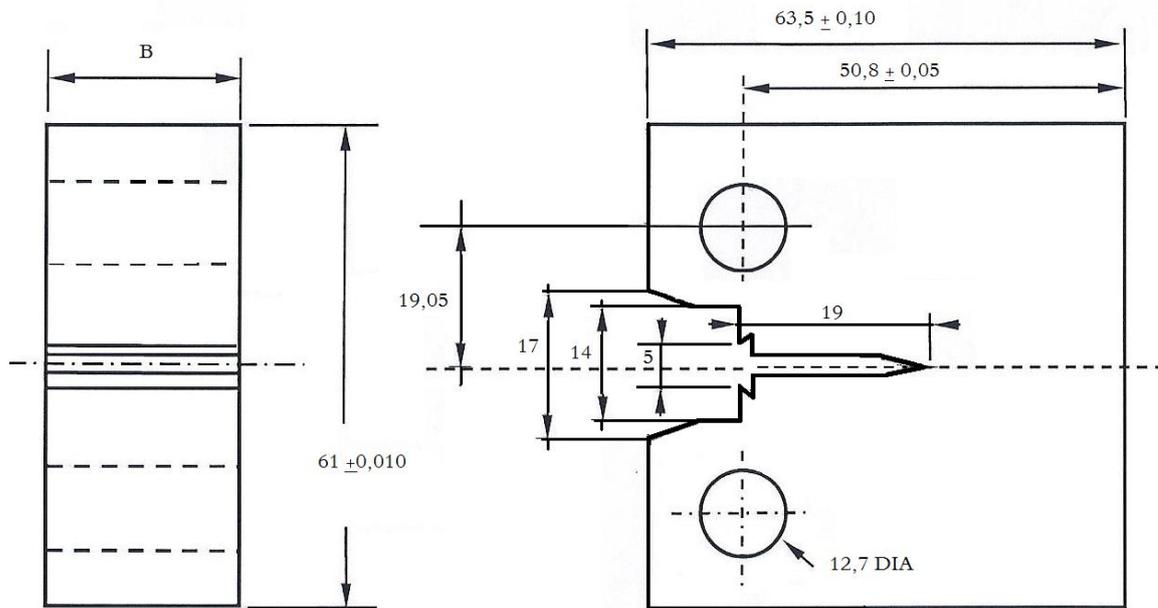
Figura 8 – Câmara Climática INSTRON



Fonte: Caltabiano (2011)

Para os ensaios em baixa temperatura, a espessura (B) dos corpos de provas foram fixadas em 19mm, obtendo uma relação de W/B inferior a dois (onde W é igual a 50,8mm, ver Figura 9), com a finalidade de garantir o comportamento elasto-plástico do material à temperatura ambiente. A relação de W/B inferior a dois inviabiliza a obtenção de K_{IC} segundo os critérios da norma ASTM E 399, mas permite obter valores válidos de K_C . Os corpos de prova do aço 15-5PH foram usinados conforme apresentado na Figura 9. (CALTABIANO, 2011, p. 61-62)

Figura 9 – Dimensões dos corpos de prova



Fonte: Caltabiano (2011)

A abertura da pré-trinca por fadiga se deu nas seguintes condições:

Tabela 3 – Condições de abertura da pré-trinca por fadiga

Parâmetro	Valor
Razão de Carga	Positiva e igual a 0,1
Frequência	14 Hz
Carga máxima para 50% da extensão inicial da pré-trinca	18 kN
Carga máxima para 50% da extensão inicial da pré-trinca	13,2 KN
Tamanho da pré-trinca	entre 0,45W e 0,55W, medido externamente

Fonte: Caltabiano (2011)

4.4 Microscopia

Após realizados os ensaios de tenacidade na máquina universal INSTRON, foram realizadas as fractografias nos corpos de prova. Utilizando o perfilômetro ótico confocal LEICA DCM 3D, também pertencente ao laboratório do Departamento de Materiais e Tecnologia da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – UNESP.

Figura 10 - Perfilômetro Leica DCM 3D



Fonte: Produção do próprio autor.

Esse perfilômetro possui a capacidade de produzir mapas de elevação através de interferometria e microscopia confocal, produzindo um mapa do relevo da superfície em três dimensões sem necessidade de contato com a amostra, que é de grande valia para identificação da zona de estiramento. As amostras não precisaram de preparos especiais para ser analisadas no equipamento, a mesa suportava as dimensões das peças.

Com capacidade de operar em campo claro ou escuro e com objetivas de 2,5 até 150x de ampliação no modo confocal, foram utilizando laser com comprimentos de onda de 410 nm (azul-violeta) e 530 nm branco para obtenção de imagens da região fraturada.

As imagens foram obtidas da zona de estiramento na região indicada pela figura 11, e em cada corpo de prova foram realizada dez ao longo da região onde se encontram os campos na figura.

Os corpos de prova estavam identificados para possível correlação com o trabalho de CALTABIANO (2011), apesar de que para corpos de prova estourados a diferentes temperaturas pode-se notar visualmente suas diferenças.

Figura 11 – Posicionamento dos Campos de amostragem



Fonte: Produção do próprio autor.

5 RESULTADOS

5.1 Ensaio Mecânicos

Os resultados dos ensaios mecânicos foram obtidos na tese de mestrado de CALTABIANO(2011), em seu trabalho foram obtidos valores de K_C , pois os corpos de prova não possuíam espessura suficiente para atender a norma ASTM E399. Os valores encontrados no ensaio em questão se encontram na tabela a seguir:

Tabela 4 – Valores de K_C do aço 15-5PH

Temperatura (°C)	Amostra	K_C (MPa.m ^{1/2})
-150	1	75,89
	2	76,76
	3	66,08
-100	4	106,6
	5	98,74
	6	99,83
-50	7	151,60
	8	149,50
	9	157,70
+23	10	161,40
	11	168,40
	12	166,60

Fonte: Caltabiano (2011)

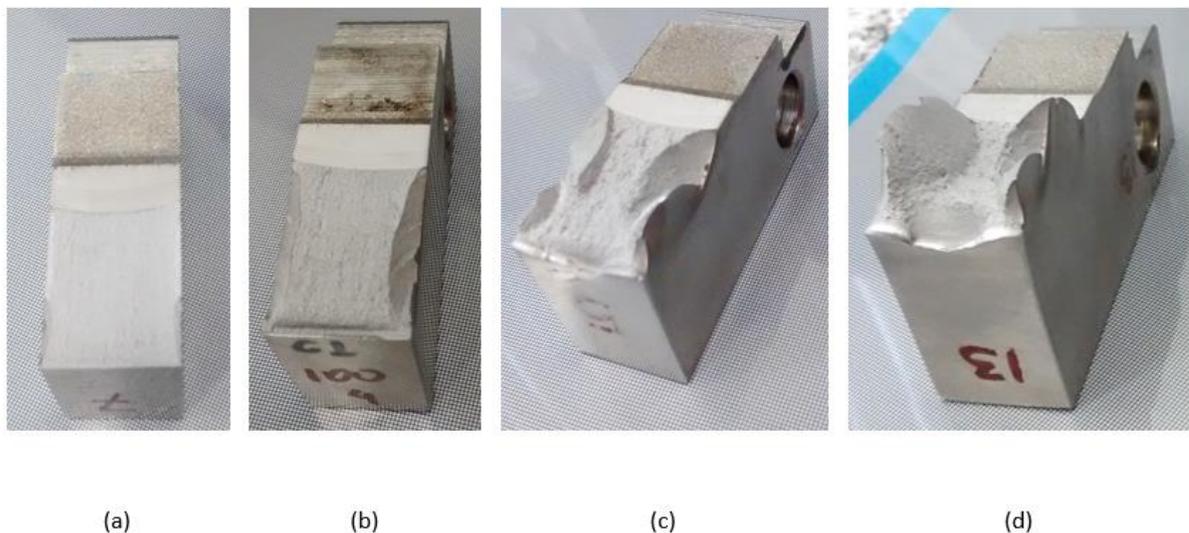
Para análise da zona de estiramento por microscopia ótica foram utilizados os corpos de prova: 1, 2, 4, 6, 7, 8 e 13. CALTABIANO (2011) não listou o corpo de prova número 13 em seu trabalho, portanto faremos duas análises distintas: uma utilizando-se as médias dos valores à 23°C e outra excluindo os valores para 23°C.

5.2 Microscopia

Os corpos de prova utilizados nos ensaios mecânicos foram analisados por microscopia ótica a fim de se obter as dimensões da zona de estiramento. Para cada corpo de prova foram realizadas dez medidas, localizadas no terço médio da superfície de trinca conforme figura 11.

A olho nu já se evidenciava dos valores de tenacidade sobre os corpos de prova. Quando o material sofria a fratura com maior temperatura, ou seja, quando ocorria uma fratura mais dúctil e a deformação plástica demonstrada nas abas das superfícies eram maiores.

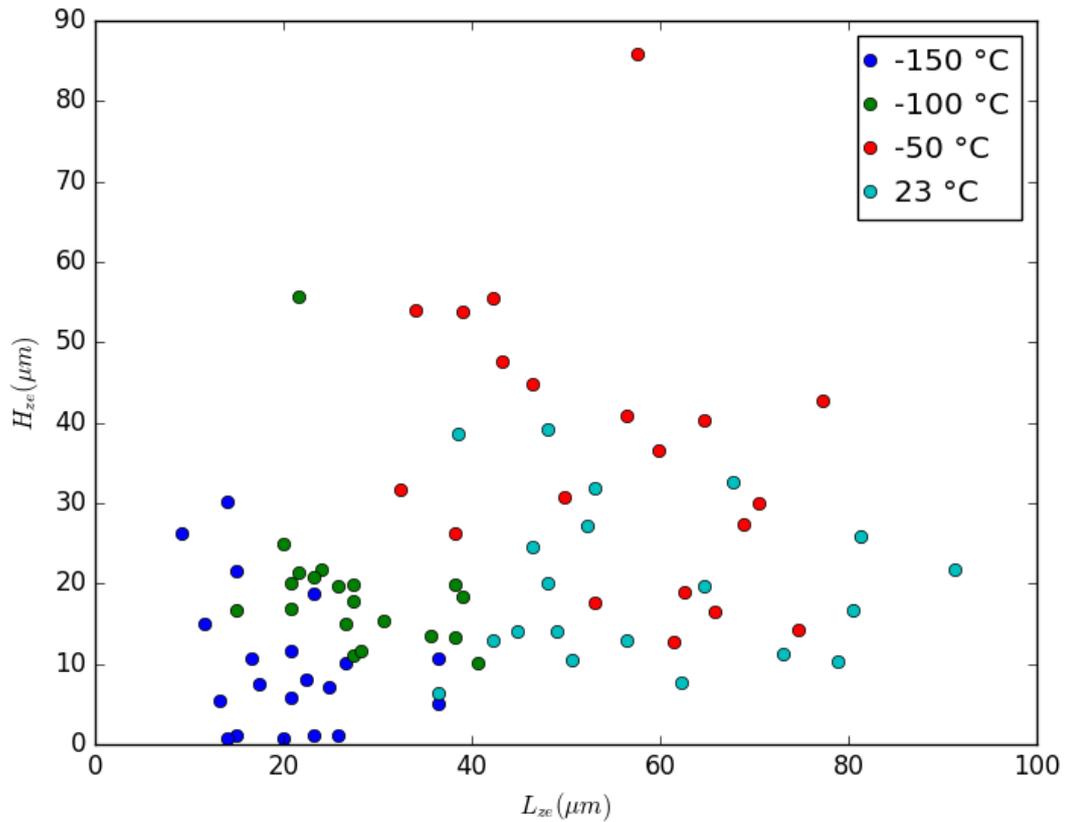
Figura 12 – Superfície da fratura nos corpos de prova : a) -150°C b) -100°C c) -50°C d)23°C



Fonte: Produção do próprio autor.

Os valores das dimensões estão distribuídos no gráfico a seguir, cada medida representada no gráfico com seu valor de largura e altura da zona de estiramento. Os valores estão divididos conforme a temperatura do ensaio.

Figura 13 – Medidas da zona de estiramento realizadas

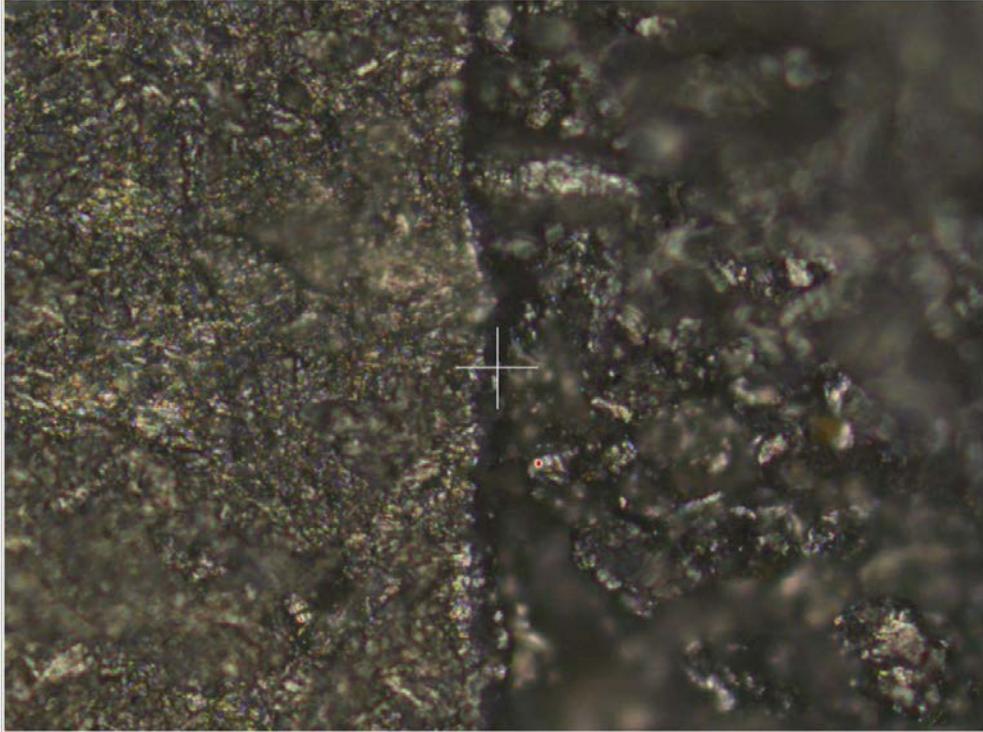


Fonte: Produção do próprio autor.

Como era esperado pode-se notar um maior distanciamento da origem conforme o aumento da temperatura devido ao aumento da tenacidade e consequente aumento da zona estirada, outro fato observado é que para menores temperaturas foi observada uma menor dispersão dos dados, já que para maiores temperaturas ocorre bastante deformação na zona estirada, com menores temperaturas a zona estirada é mais uniforme.

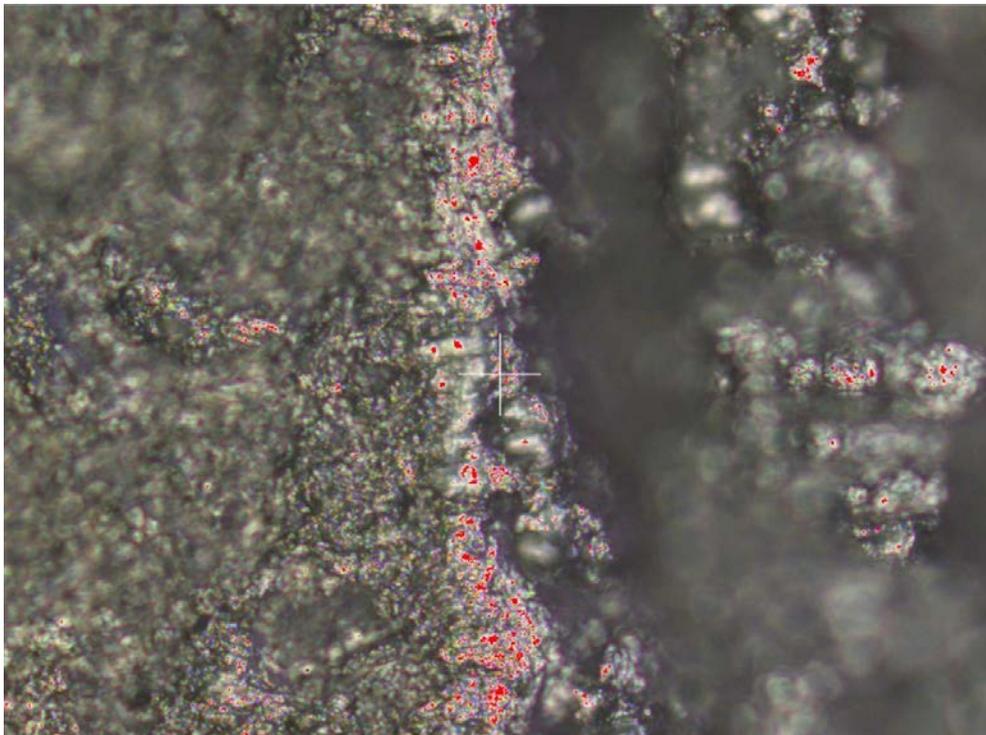
Observando as figuras 14 e 15, que foram adquiridas com a mesma aproximação, podemos visualizar a diferença dimensional e de uniformidade da zona.

Figura 14 – CDP à -150°C em 200x



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 15 – CDP à 23°C em 200x

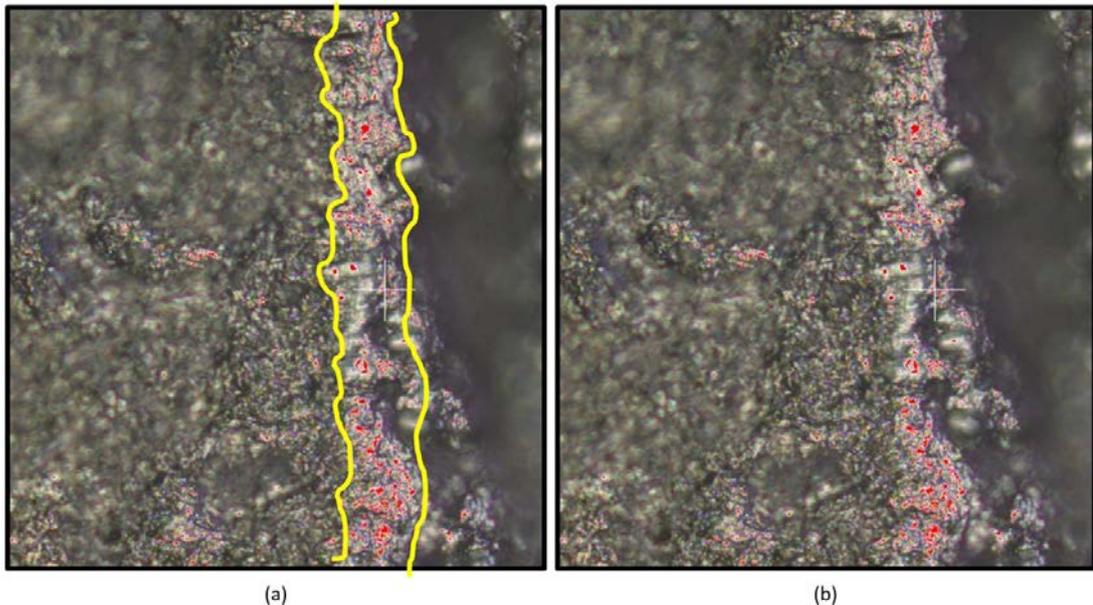


Fonte: Produção do próprio autor.

Tanto na figura 14 quanto na figura 15 pode se observar a esquerda a superfície de fratura por fadiga e a direita a superfície de fratura de ruptura final e entre elas a zona de estiramento. Na figura 16 podemos ver discriminada a zona de estiramento, ao longo dessa região podemos notar seu aspecto diferenciado, pode-se notar uma aparência mais palida nessa região, esse fato a torna de mais fácil identificação.

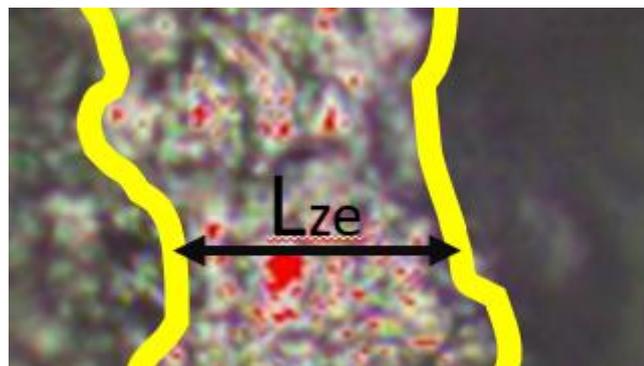
A aquisição dos valores de L_{ze} são feitas na horizontal da imagem, conforme figura 17. O software do perfilômetro Leica já fornece as diferenças de coordenadas ao selecionar-se dois pontos. Esse foi o recurso utilizado para realizar as medidas, e após medidos os pontos exportavam-se os valores em formato de tabela para posterior utilização.

Figura 16 – Exemplo de determinação da ze a) evidenciando a ze b) original



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 17 – Exemplo de medida de L_{ze}

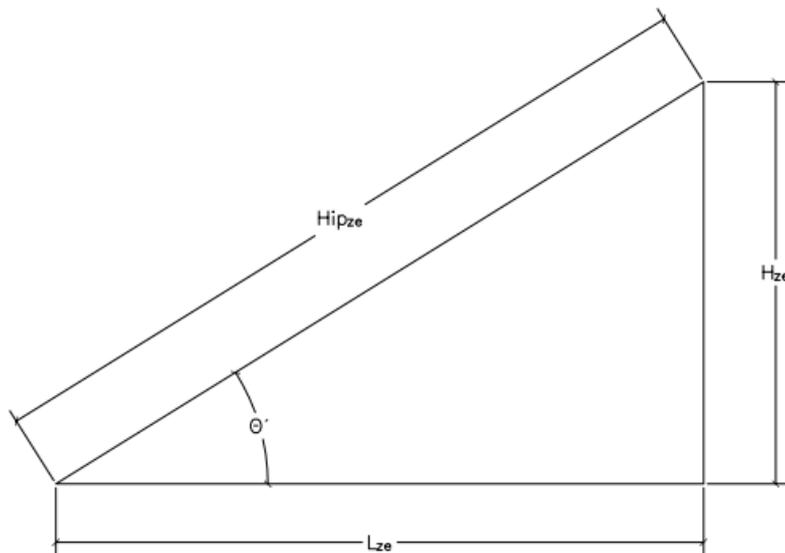


Fonte: Produção do próprio autor.

5.3 Correlações entre Zona de Estiramento e Tenacidade à fratura

Após obtidas e tabeladas as dimensões L_{ze} e H_{ze} , pode-se obter os valores para Hip_{ze} e θ' . A figura 18 mostra o que representa a dimensão Hip_{ze} em relação as outras dimensões da ze.

Figura 18 – Definição de Hip_{ze}



Fonte: Produção do próprio autor.

Tabelados abaixo estão os valores medidos por microscopia, como é o caso da altura e largura da zona de estiramento; avaliados em ensaio mecânico, que é o caso do Kc; e calculados a partir de outros, como o Hip_{ze} e o θ' que são calculados a partir dos valores do comprimento e largura, conforme segue:

$$Hip_{ze} = \sqrt{L_{ze}^2 + H_{ze}^2} \quad (2)$$

$$\theta' = \arctg\left(\frac{H_{ze}}{L_{ze}}\right) \quad (3)$$

Tabela 5 – Valores obtidos pelo ensaio mecânico e microscopia

Número do CDP	T [°C]	L _{ze} [μm]	H _{ze} [μm]	Hip _{ze} [μm]	(continua)	
					Kc [MPa.m ^{1/2}]	Θ' [rad]
1	-150	26,560	10,096	28,414	75,89	0,363
1	-150	36,520	5,086	36,872	75,89	0,138
1	-150	20,750	5,816	21,550	75,89	0,273
1	-150	23,240	1,207	23,271	75,89	0,052
1	-150	24,900	7,198	25,920	75,89	0,281
1	-150	17,430	7,571	19,003	75,89	0,410
1	-150	20,750	11,684	23,813	75,89	0,513
1	-150	25,730	1,156	25,756	75,89	0,045
1	-150	23,240	18,732	29,849	75,89	0,678
1	-150	11,620	14,955	18,939	75,89	0,910
2	-150	36,520	10,693	38,053	76,76	0,285
2	-150	22,410	8,056	23,814	76,76	0,345
2	-150	14,940	1,207	14,989	76,76	0,081
2	-150	14,110	0,664	14,126	76,76	0,047
2	-150	19,920	0,681	19,932	76,76	0,034
2	-150	16,600	10,714	19,757	76,76	0,573
2	-150	14,940	21,536	26,211	76,76	0,964
2	-150	13,280	5,420	14,343	76,76	0,387
2	-150	14,110	30,270	33,397	76,76	1,135
2	-150	9,130	26,248	27,791	76,76	1,236
4	-100	21,580	55,755	59,786	106,60	1,202
4	-100	27,390	19,837	33,819	106,60	0,627
4	-100	20,750	19,998	28,818	106,60	0,767
4	-100	19,920	24,845	31,845	106,60	0,895
4	-100	24,070	21,832	32,496	106,60	0,737
4	-100	38,180	19,914	43,061	106,60	0,481
4	-100	27,390	17,762	32,645	106,60	0,575
4	-100	23,240	20,843	31,217	106,60	0,731
4	-100	14,940	16,766	22,457	106,60	0,843
4	-100	21,580	21,436	30,417	106,60	0,782
6	-100	26,560	14,972	30,489	99,83	0,513
6	-100	30,710	15,303	34,312	99,83	0,462
6	-100	25,730	19,700	32,406	99,83	0,653
6	-100	27,390	10,978	29,508	99,83	0,381
6	-100	20,750	16,919	26,773	99,83	0,684
6	-100	35,690	13,574	38,184	99,83	0,363
6	-100	28,220	11,704	30,551	99,83	0,393
6	-100	39,050	18,283	43,118	99,83	0,438
6	-100	40,670	10,195	41,928	99,83	0,246
6	-100	38,180	13,295	40,429	99,83	0,335
7	-50	38,180	26,266	46,342	151,60	0,603
7	-50	49,800	30,706	58,506	151,60	0,553

Tabela 5 – Valores obtidos pelo ensaio mecânico e microscopia

Número do CDP	T [°C]	(conclusão)				
		L _{ze} [μm]	H _{ze} [μm]	Hip _{ze} [μm]	Kc [MPa.m ^{1/2}]	Θ' [rad]
7	-50	39,010	53,870	66,511	151,60	0,944
7	-50	46,480	44,901	64,626	151,60	0,768
7	-50	34,030	54,047	63,868	151,60	1,009
7	-50	43,160	47,574	64,235	151,60	0,834
7	-50	53,120	17,702	55,992	151,60	0,322
7	-50	42,330	55,444	69,756	151,60	0,919
7	-50	56,440	40,843	69,668	151,60	0,626
7	-50	64,740	40,353	76,287	149,50	0,557
8	-50	65,750	16,541	67,799	149,50	0,246
8	-50	68,890	27,444	74,155	149,50	0,379
8	-50	70,550	30,084	76,696	149,50	0,403
8	-50	59,760	36,487	70,018	149,50	0,548
8	-50	57,520	85,963	103,432	149,50	0,981
8	-50	61,420	12,761	62,732	149,50	0,205
8	-50	62,650	18,978	65,461	149,50	0,294
8	-50	74,700	14,308	76,058	149,50	0,189
8	-50	77,190	42,762	88,243	149,50	0,506
8	-50	67,740	32,550	75,155	165,47	0,448
média	23	48,970	14,089	50,956	165,47	0,280
média	23	38,604	38,604	54,594	165,47	0,785
média	23	48,140	20,027	52,140	165,47	0,394
média	23	53,120	31,858	61,941	165,47	0,540
média	23	44,820	14,064	46,975	165,47	0,304
média	23	81,340	25,800	85,334	165,47	0,307
média	23	80,510	16,601	82,204	165,47	0,203
média	23	48,140	39,234	62,103	165,47	0,684
média	23	46,480	24,498	52,541	165,47	0,485
média	23	78,850	10,379	79,530	165,47	0,131
média	23	73,040	11,264	73,903	165,47	0,153
média	23	64,740	19,744	67,684	165,47	0,296
média	23	50,630	10,508	51,709	165,47	0,205
média	23	36,520	6,341	37,066	165,47	0,172
média	23	91,300	21,698	93,843	165,47	0,233
média	23	42,330	12,884	44,247	165,47	0,295
média	23	52,290	27,108	58,899	165,47	0,478
média	23	62,250	7,677	62,722	165,47	0,123
média	23	56,440	12,891	57,893	165,47	0,225
média	23	39,010	53,870	66,511	151,60	0,944

Fonte: Produção do próprio autor.

5.4 Análise dos Dados

Na parte de análise de dados, teremos a divisão entre a análise considerando os valores da média dos valores de K_c para 23°C e a análise excluindo os valores a 23 °C. Isso se deve ao fato de os corpos de prova para essa temperatura utilizados no trabalho de CALTABIANO (2011) não estavam disponíveis, foram realizadas as medidas no corpo disponível e utilizadas a média dos valores de K_c para essa temperatura.

5.4.1 Incluindo os valores à 23°C

Primeiro foi realizada a análise com todos os valores da tabela 5, isso inclui os valores a 23°C e foram levantadas as médias para cada valor de K_c .

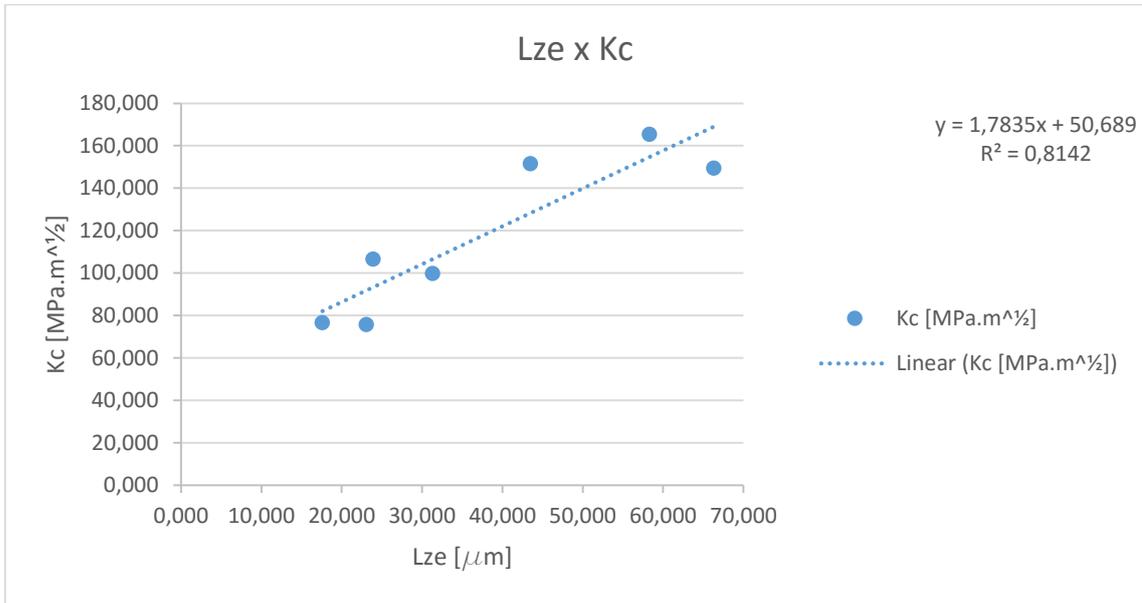
Tabela 6 – Média dos valores incluindo 23°C

Número do CDP	T [°C]	L_{ze} [μm]	H_{ze} [μm]	$H_{ip_{ze}}$ [μm]	K_c [MPa.m ^{1/2}]
1	-150,000	23,074	8,350	25,339	75,890
2	-150,000	17,596	11,549	23,241	76,760
6	-100,000	31,295	14,492	34,770	99,830
4	-100,000	23,904	23,899	34,656	106,600
8	-50,000	66,317	32,568	76,088	149,500
7	-50,000	43,492	40,301	60,478	151,600
média	23,000	58,313	19,891	62,572	165,467

Fonte: Produção do próprio autor.

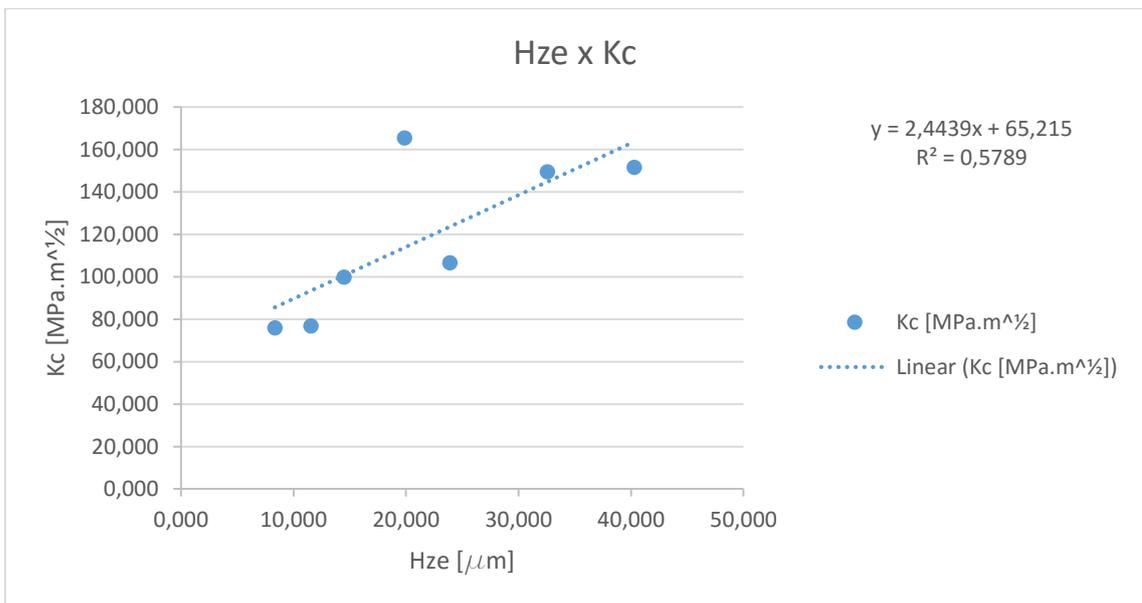
De posse desses valores pode-se realizar a construção de gráficos e as curvas de regressão:

Figura 19- Lze x Kc todos os valores



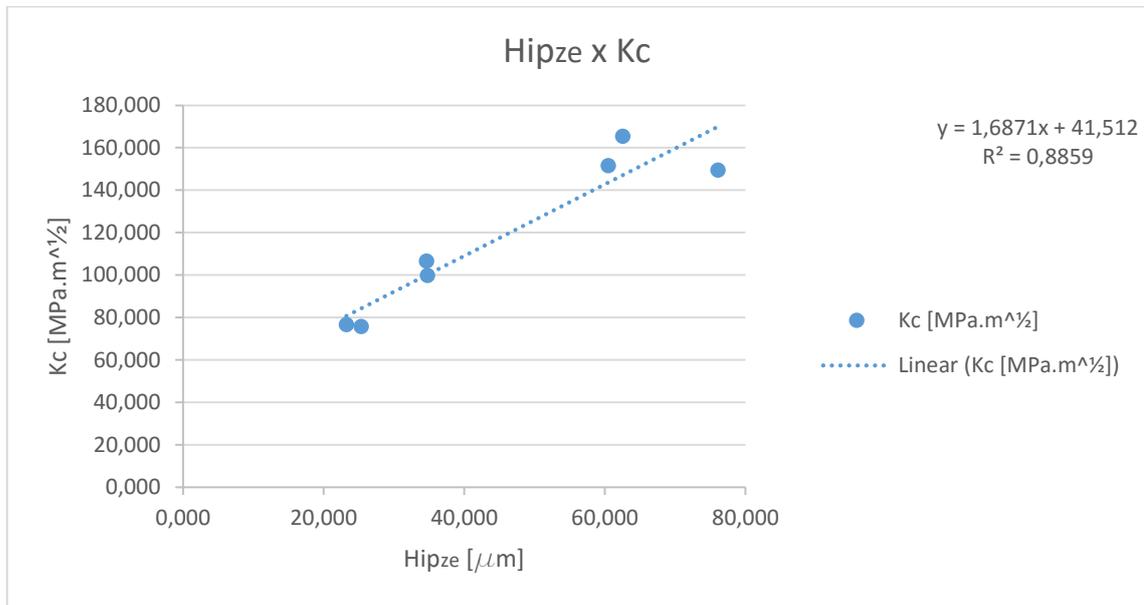
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 20 – Hze x Kc todos os valores



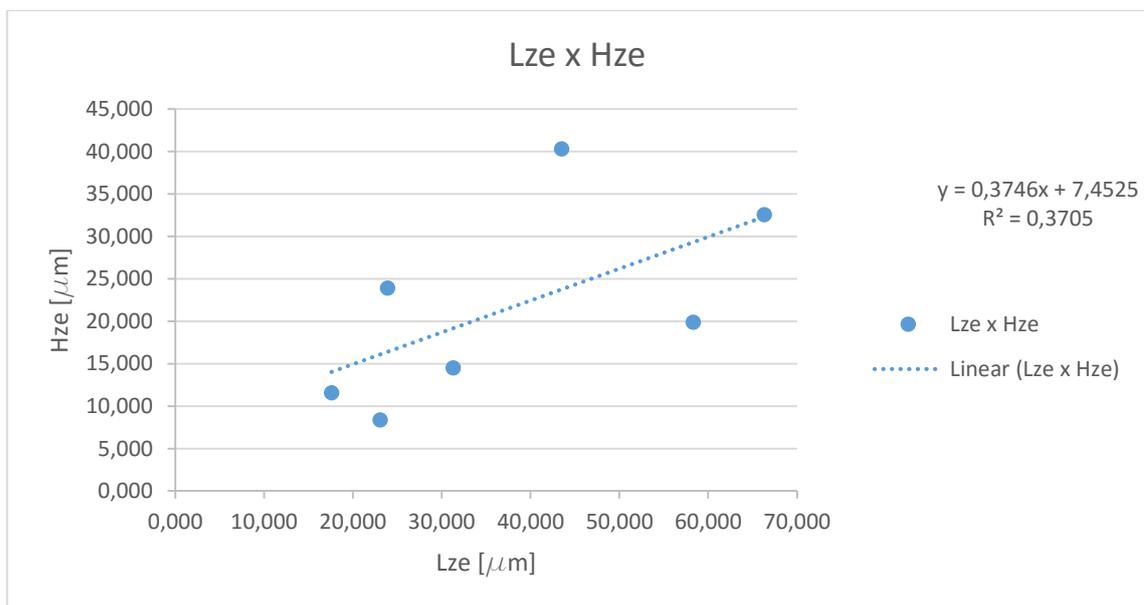
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 21- Hipze x Kc todos os valores



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 22 - Lze x Hze todos os valores



Fonte: Produção do próprio autor.

5.4.2 Desconsiderando os valores à 23°C

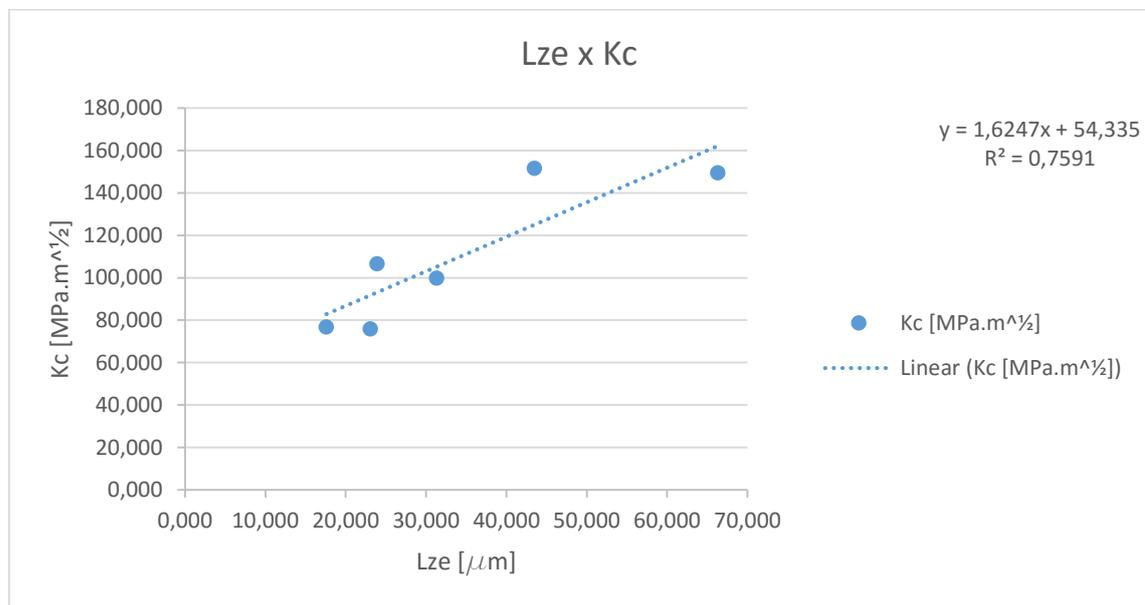
Agora faremos abordaremos os dados sem levar em consideração as medidas nos CDP's a 23°C:

Tabela 7 – Média dos valores desconsiderando 23°C

Número do CDP	T [°C]	L _{ze} [μm]	H _{ze} [μm]	Hip _{ze} [μm]	Kc [MPa.m ^{1/2}]
1	-150,000	23,074	8,350	25,339	75,890
2	-150,000	17,596	11,549	23,241	76,760
6	-100,000	31,295	14,492	34,770	99,830
4	-100,000	23,904	23,899	34,656	106,600
8	-50,000	66,317	32,568	76,088	149,500
7	-50,000	43,492	40,301	60,478	151,600

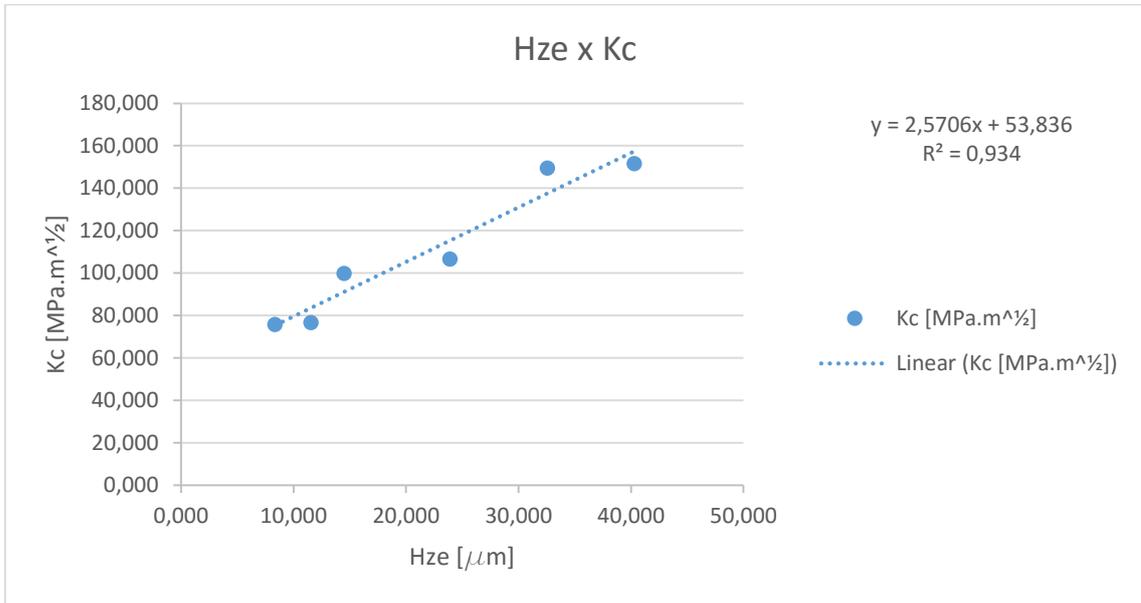
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 23 – Lze x Kc desconsiderando 23°C

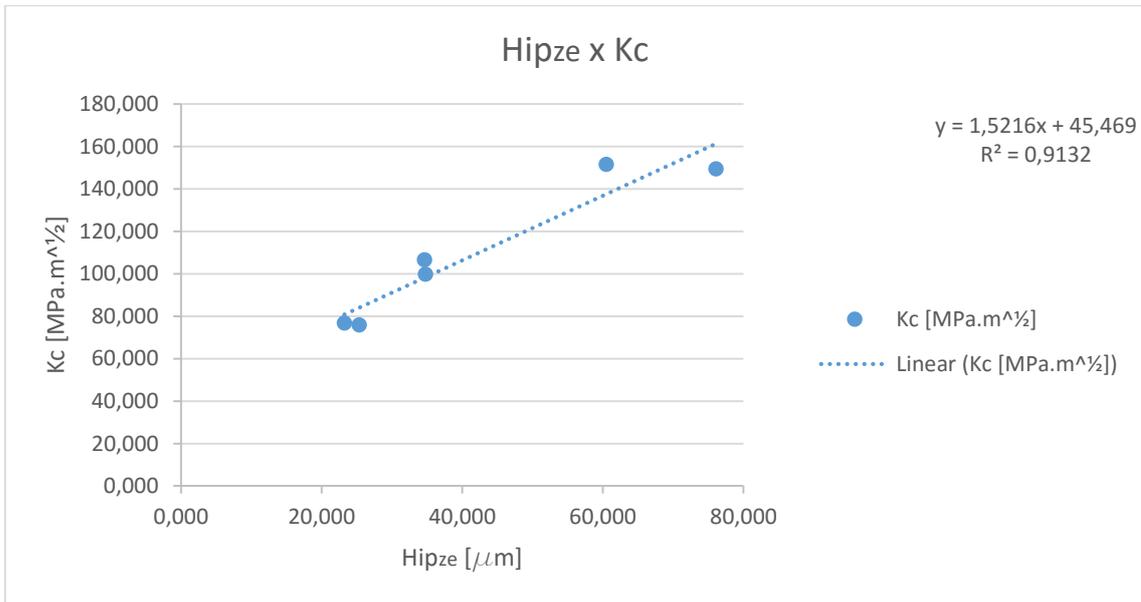


Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 24 – Hze x Kc desconsiderando 23°C

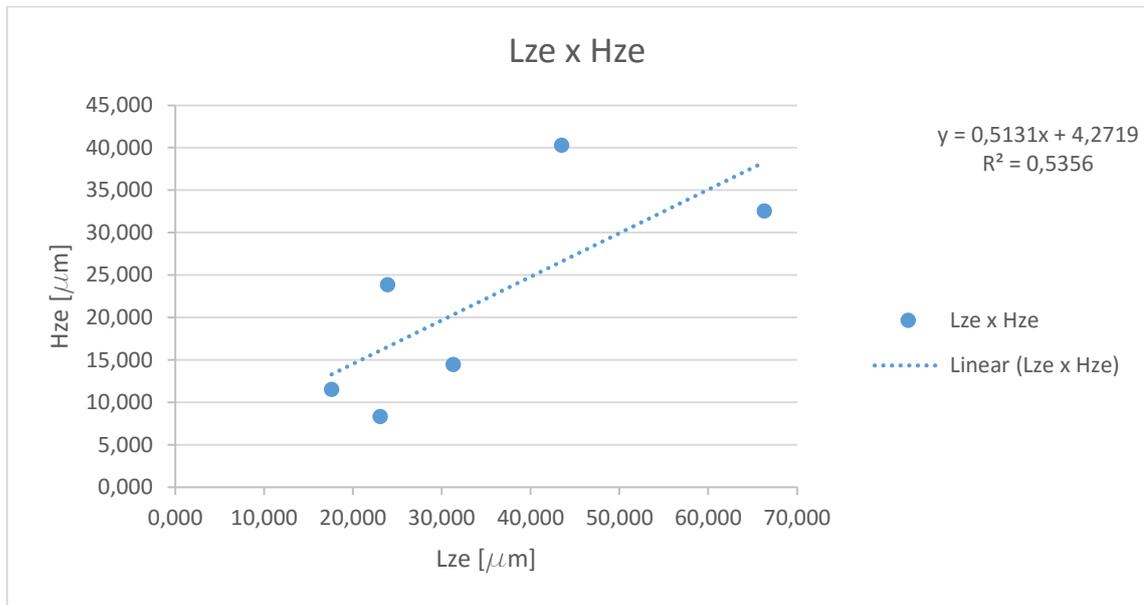


Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 25 – Hip_{ze} x Kc desconsiderando 23°C

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 26 – Lze x Hze desconsiderando 23°C



Fonte: Produção do próprio autor.

5.5 Discussão dos Resultados

Para Lze x Kc, podemos observar uma boa correlação entre o comprimento da ze e o Kc, as equações de regressão para os dois casos (considerando ou não os dados a 23°C) foram próximas e em ambos os casos o $R^2 > 0,75$.

Para Hze x Kc, nos dois casos os valores são próximos novamente, porém quando observamos o gráfico que contém todos os dados observamos que o ponto do 23° percebemos que este ponto está distante da curva o que ocasiona um $R^2 = 0,579$.

Para Hip_{ze} x Kc encontramos correlações $R^2 > 0,880$, a partir disso concluímos que para este material e neste intervalo as melhores estimativas de Kc são proporcionadas à partir deste parâmetro, ou seja, a hipotenusa entre o comprimento e a largura é parâmetro que melhor descreveu o comportamento de Kc.

Para Lze x Hze tentou-se encontrar correlação entre os dois parâmetros medidos microscopicamente nos corpos de prova, porém esses foram os dados que pior se comportaram e tiveram os menores valores para R^2 .

Com Hip_{ze} demonstrando tão forte correlação com os valores de Kc, tomaremos sua função para elaborar uma estimativa para Kc.

- Contemplando dados de 23 °C:

$$Kc = 1,687 Hip_{ze} + 41,512 \quad (4)$$

- Desconsiderando dados de 23 °C:

$$Kc = 1,522 Hip_{ze} + 45,469 \quad (5)$$

5.6 Proposta para Trabalhos Futuros

Neste trabalho, uma das dificuldades foi o pequeno número de amostras, além de não ser possível acessar todos os corpos de prova do trabalho precedente.

Para um número maior de amostras, em diferentes temperaturas pode-se observar melhor o comportamento da curva e obter formulações mais precisas para obtenção de valores de Kc. Com os valores sendo tomados com intervalos menores de temperatura, conseguiria-se muitos outros pontos para estudar. Dispondo de mais valores pode se usar um software como o Eureqa 1.24.0, para realizar regressões avançadas e obter formulas muito mais precisas para obtenção da tenacidade. O software tem a capacidade de avaliar vários parâmetros para fornecer a relação, podemos por exemplo, fornecer todos os parâmetros para o software e obter as melhores aproximações. Como exemplo, será fornecido os dados da tabela (6), que contemplam $L_{ze}, H_{ze}, Hip_{ze}, \theta'$ e Kc para obtenção de relações. (NUTONIAN, 2016)

Figura 27 – Selecionando os parâmetros de entrada do programa.

The Target Expression:

Search for a formula $f()$ that satisfies the equation: $kc = f(T, Lze, Hze, Hip)$

Primary Options:

Formula building-blocks:	Name	Complexity	Currently Selected:
Basic			$C, X, +, -, *, /, \sin, \cos, \tan, \exp, \log, ^, \sqrt$
<input checked="" type="checkbox"/>	Constant	1	Select a minimal set of building blocks Double-click to edit complexity values Building-blocks Documentation
<input type="checkbox"/>	Integer Constant	1	
<input checked="" type="checkbox"/>	Input Variable	1	
<input checked="" type="checkbox"/>	Addition	1	
<input checked="" type="checkbox"/>	Subtraction	1	
<input checked="" type="checkbox"/>	Multiplication	1	
<input checked="" type="checkbox"/>	Division	2	
<input type="checkbox"/>	Negation	1	
Trigonometry			

Error metric: Absolute error (default) [Error Metrics Documentation](#)

Row Weight: <none>

Data Splitting: Treat all data points equally (default) [Prior Solutions Documentation](#)

Base and prior solutions:

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 28 – Visualização das soluções propostas

Size	Fit	Solution
1	1.000	$kc = 107$
3	0.459	$kc = 71.9 + Hip$
5	0.236	$kc = 165 + 0.59 T$
7	0.079	$kc = 135 + Hze + 0.464 T$
11	0.024	$kc = 137 + 0.431 T + 0.0147 HzeHip$
17	0.008	$kc = 139 + 0.445 T + 0.0276 Hip^2 - 0.0251 LzeHip$
21	0.005	$kc = 133 + 0.48 T + 0.313 Hze + 0.0117 HzeHip + 0.000399 T^2$
25	0.000	$kc = 75.8 + 1.62 Hip + 0.499 Hze + 0.173 T + 0.00374 T Hip - 0.008554 LzeHip$

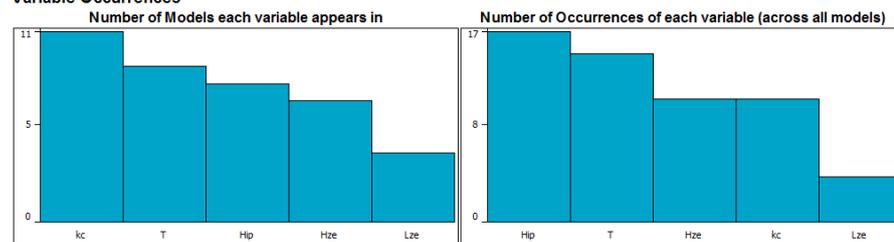
Solution Details (calculated on validation data)	
Solution	$kc = 75.81 + 1.623 \cdot Hip + 0.4986 \cdot Hze + 0.1732 \cdot T + 0.003744 \cdot T \cdot Hip - 0.008554 \cdot Lze \cdot Hip$
R^2 Goodness of Fit	1
Correlation Coefficient	1
Maximum Error	0.00033960839
Mean Squared	$3.8025888e-8$

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 29 – Frequência das variáveis usadas

Eureka Models

Variable Occurrences



Fonte: Produção do próprio autor.

A equação (6) é um exemplo de uma das funções geradas no programa:

$$Kc = 75,809 + 1,623 \cdot Hip_{ze} + 0,499 \cdot Hze + 0,173 \cdot T + 3,744 \cdot 10^{-3} \cdot T \cdot Hip_{ze} - 8,554 \cdot 10^{-3} \cdot LzeHip_{ze} \quad (6)$$

O programa ainda exporta relatórios em formato pdf, esses que por sua vez são vastos em informação e informa inclusive quantas vezes um parâmetro apareceu nas suas soluções.

O software com o cadastro de uma licença de estudante já fica totalmente operacional, permitindo o pleno uso de suas funções. O software fornece diversas funções à partir dos parâmetros de entrada e classifica as funções de acordo com diversos critérios que o usuário pode escolher, utilizamos a opção “default” e o coeficiente de determinação (R^2) do Método dos quadrados mínimos e do coeficiente de correlação de Pearson entre os dados e os valores gerados pela função proposta.

Uma atenção especial teve de ser dada ao fato de o programa usar (.) para separar as casas decimais enquanto nos softwares adaptados aos padrões nacionais utiliza-se (,) e isso pode gerar erro, portanto sugere-se atenção a este fato na utilização deste software.

6 CONCLUSÃO

Através da análise de superfícies fraturadas pode-se obter uma boa estimativa das condições de tenacidade no momento da fratura. Através da observação dos valores e corpos de prova, conclui-se que a temperatura desempenha papel importante nos valores de tenacidade. Os valores de tenacidade são amplamente influenciados pela temperatura durante o ensaio e consequentemente a z_e . A obtenção da função de K_c foi melhor representada pelo parâmetro Hip_{z_e} que demonstrou correlação muito forte com a tenacidade.

REFERÊNCIAS

AK STEEL. **AK Steel 15-5PH Stainless Steel Data Sheet**. 2007. 2p. Disponível em: http://www.aksteel.com/pdf/markets_products/stainless/precipitation/15-5_ph_data_sheet.pdf
Último acesso em: 17 mar 2016.

AMOUZOUVI, K. F.; BASSIM, M. N. Determination of fracture toughness from stretch zone width measurement in predeformed AISI type 4340 steel. **Materials science and engineering**, v. 55, n. 2, p. 257-262, 1982.

ASTM International, **ASTM E 399 (2008)**: Standard test method for linear-elastic plane-strain fracture toughness K_{IC} of metallic materials. West Conshohocken, PA, EUA, 2008.

BLUMENAUER, H.; WAGNER, I. **Relationship between stretch zone and dynamic fracture toughness**. In: ICF6, New Delhi (India) 1984. 2013.

BROEK, D. Correlation between stretched zone size and fracture toughness. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 6, n. 1, p. 173-181, 1974.

CALTABIANO, P. C. R. O. **Fractografia quantitativa: relações entre tenacidade e o comportamento fractal em ligas metálicas**. 2011. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

COSTA NETO, P.L.O., Estatística, 2.ed. São Paulo: Editora Blücher, 2002. 266p.

DAS, Swapan K. et al. The effect of variation of microstructure on fracture mechanics parameters of HSLA-100 steel. **Materials Science and Engineering: A**, v. 431, n. 1, p. 68-79, 2006.

DRAB, H. Dynamic initiation toughness and stretch zone. *Journal of materials science letters*, v. 14, n. 2, p. 88-90, 1995.

EL-SOUDANI, S. M. Correction of scanning electron image distortions for specimen tilt and fracture surface roughness. **Proceeding of the International Symposium for Testing and Failure Analysis (ISTFA 85)**, Los Angeles, CA, p. 232-249, 1985.

NUTONIAN. **Eureqa desktop for windows 7/8/8.1/10 64 bit, version 1.32.0**: Nutonian Inc., 2016. Software. Disponível em: <<http://www.nutonian.com/products/eureqa-desktop>> Acesso em: 06 mar. 2016.

HEERENS, Jürgen; CORNEC, Alfred; SCHWALBE, K.-H. RESULTS OF A ROUND ROBIN ON STRETCH ZONE WIDTH DETERMINATION*. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, v. 11, n. 1, p. 19-29, 1988.

HEIN, L. R. O. **Estudo da zona de estiramento através da técnica de reconstrução tridimensional**. 1996. 113f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.

JANSSEN M.; ZUIDEMA, J.; WANHILL, R.J. H. **Fracture Mechanics**. 2.ed. EUA: VSSD Press, 2006. 365p.

NARASIAH, N. et al. **Effect of Constraint on Stretch Zone Width and Fracture Toughness of Structural Steels**. In: ICF12, Ottawa 2009. 2013.

PISARENKO, G. S. et al. The combined micro-and macro-fracture mechanics approach to engineering problems of strength. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 28, n. 5, p. 539-554, 1987.

SCHWALBE, K.-H. et al. Validation of The Fracture Mechanics Test Method EGF P1–87D (ESIS P1–90/ESIS P1–92): ANALYSIS OF AN EXPERIMENTAL ROUND ROBIN. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, v. 16, n. 11, p. 1231-1284, 1993.

SIVAPRASAD, S. et al. Can stretch zone measurements provide a good estimate of fracture toughness. In: **ICF10, Honolulu (USA) 2001**. 2013.

SRINIVAS, M.; KAMAT, S. V.; RAO, P. Rama. Influence of mixed mode I/III loading on fracture toughness of mild steel at various strain rates. **Materials science and technology**, v. 20, n. 2, p. 235-242, 2004.

WEIDNER, A. et al. Determination of stretch zone width and height by powerful 3D SEM imaging technology. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 108, p. 294-304, 2013.

ZHU, Xian-Kui; JOYCE, James A. Review of fracture toughness (G, K, J, CTOD, CTOA) testing and standardization. **Engineering Fracture Mechanics**, v. 85, p. 1-46, 2012.