

RELAÇÃO ENTRE A ENERGIA CHARPY E A DUCTILIDADE ATRAVÉS DA ESPESSURA DE AÇO API 5L X80

Aluno: Sohad Lerech

Orientador: Ivani de Souza Bott

Co-Orientador: Adriana Forero

Introdução

Alguns países de America Latina tiveram um crescimento exponencial na indústria desde alguns anos atrás. Brasil sendo um dos países mais ricos em recursos naturais como o petróleo e minério de ferro da America Latina, concentrou sua pesquisa no desenvolvimento de novos materiais que permitam a obtenção e distribuição da matéria prima e de produtos obtidos destes recursos naturais. A exploração, recuperação e transporte de tais recursos são dependentes de sistemas dutoviários constituídos de dutos de aço, os quais não são isentos da possibilidade de falhas as quais podem produzir catástrofes ambientais além de perdas humanas e monetárias. Por isto, são realizados estudos cada vez mais exigentes, dos aços com que são fabricados os tubos que compõe os sistema dutoviário na industria de petroleo e gás, permitindo assim produzir sistemas de recuperação e transporte eficientes e seguros.

Aços modernos produzidos por laminação controlada são utilizados em estruturas offshore, dutos e vasos de pressão para citar alguns. O processo de laminação controlada permite a obtenção de aços com alta resistencia, alta tenacidade a fratura e boa soldabilidade. Um destes materiais modernos é o aço API 5L X80 o qual é objeto do presente estudo.

Segundo a norma API 5L (2008), os aços API 5L X80 são aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL). Estes aços possuem um limite de escoamento mínimo de 80 Ksi (550 MPa) e contêm baixo teor de carbono e elementos de liga. São produzidos por laminação controlada e tem características tais como: boa tensão de escoamento, tenacidade ao impacto, alta resistência, ductilidade e conformabilidade. Com a capacidade de suportar maior carga com espessuras de chapas mais finas comparado com os aços convencionais; são amplamente utilizados em diferentes campos da indústria, especialmente no campo petrolífero e do gás.

Embora estes aços possuam tensão de escoamento e tenacidade ao impacto apropriadas, Quando são ensaiados em tração por teste de impacto Charpy apresentam formação de trincas centrais longitudinais conhecidas como delaminações. Esta observação está associada a (through-thickness) ductilidade e a resistencia a trincas induzidas pelo hidrogênio. Este tipo de ductilidade é importante porque aços com baixa ductilidade são susceptíveis a decoesão lamelar (Mamdouh M. Salama, Through-thickness properties of TMCP steels, Transactions of the ASME, vol. 126, pp.346-349, 2004). O comportamento em fratura, de um modo geral é dependente da temperatura, no entanto fatores como taxa de deformação, espessura da amostra e estado de tensões. Trincas de delaminação únicas ou multiplas tem sido encontradas tanto em amostras de tamanho reduzido obtidas para análise laboratorial como em amostras de tamanho real. (Zheng Yang, Chunyong Huo, Wanlin Guo, The charpy Notch impact test of X70 Pipeline Steel with Delamination Cracks, Key Engineering Materials, Vol. 297-30, pp 2391-2396, 2005).

O presente estudo dá seqüência a um projeto anterior onde foram classificados os tipos de delaminações do aço API 5L X80 conforme seu tamanho, foi relacionada a quantidade de delaminações medias com a temperatura de ensaio Charpy, assim mesmo, energia absorvida nas diferentes temperaturas de ensaio do material. No presente estágio serão analisadas as superfícies de fratura com deposição de camada de níquel, com o intuito de associar ao fenômeno das delaminações nestes aços, as características microestruturais, o número de trincas e a influência destas trincas na energia absorvida no teste de impacto Charpy.

Objetivo geral

Estudar o fenômeno das delaminações nos aços API 5L X80, correlacionando a presença de trincas com a energia Charpy e com as características microestruturais.

Objetivos específicos

- Caracterizar metalograficamente as amostras testadas no ensaio charpy, utilizando Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).
- Determinar a quantidade percentual de microconstituinte Austenita-Martensita (AM) presente na microestrutura do aço API 5L X80.
- Identificar a microestrutura associada às trincas na superfície de fratura.
- Medir a microdureza do aço API 5L X80 nas amostras testadas no ensaio charpy para relacionar com a delaminações.
- Realizar gráficos de correlação da presença de trincas com a energia Charpy e com as características microestruturais

Metodologia

A. Materiais

Vinte (20) amostras do tubo tipo API 5L X80 (figura 1) que foi fabricado pelo processo UOE, identificados conforme figura 2, com composição química e valores de carbono equivalentes apresentada na tabela 1.

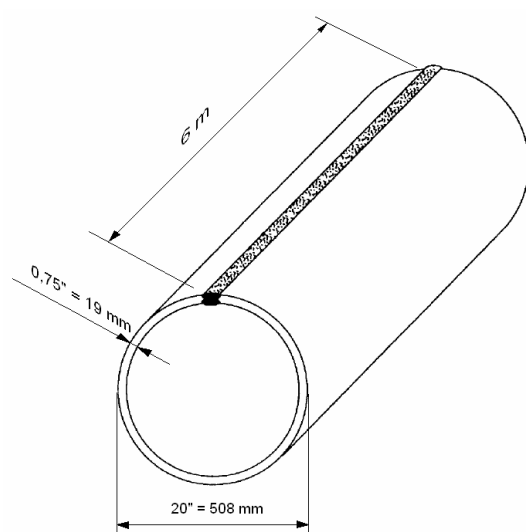


Figura 1 – Dimensões do tubo ensaiado

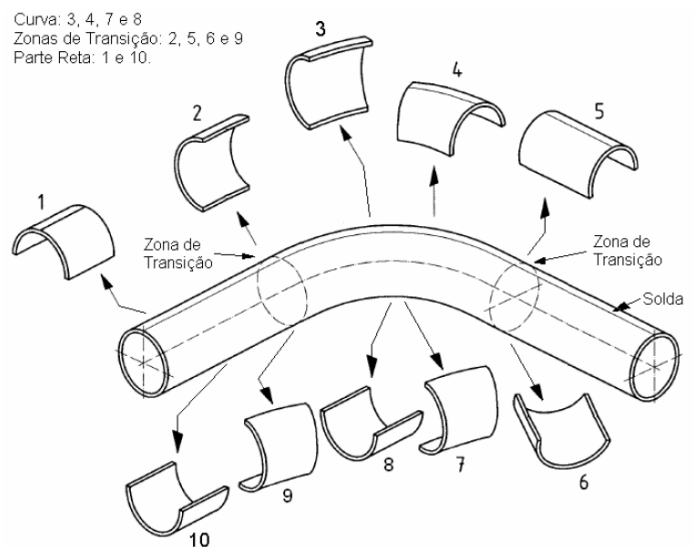


Figura 2 – Divisão do tubo ensaiado

Tabela 1- Composição química.

Elementos (% em peso)											
C	Mn	Si	Nb	V	Ti	Mo	Cr	Cu	Ceq (IIW)	Ceq (Pcm)	Nb+V+Ti
0,05	1,76	0,17	0,06 6	0,02 5	0,01 6	0,20	0,15	0,02	0,42	0,17	0,11
Elementos (em ppm)											
P	S	Sn	As	B	Ca	Ni	N	Al			
160	20	20	20	3	30	200	57	350			

Os corpos de prova selecionados para a análise neste estudo se nomearam segundo as siglas da tabela 2 e serão procedidas por um número que representa a temperatura de ensaio.

Tabela 2 – Padrão de Identificação dos Corpos de Prova.

CRL	Corpo de prova Charpy Longitudinal do trecho reto
CRT	Corpo de prova Charpy Transversal do trecho reto
CZIT	Corpo de prova Charpy Transversal da Zona de Transição do Intradorso
CZIL	Corpo de prova Charpy Longitudinal da Zona de Transição do Intradorso
CZET	Corpo de Prova Charpy Transversal do Extradorso
CZEL	Corpo de Prova Charpy Longitudinal do Extradorso
CZNT	Corpo de Prova Charpy Transversal da Zona de Transição da Linha Neutra (oposta a solda na curva)
CZNL	Corpo de Prova Charpy Longitudinal da Zona de Transição da Linha Neutra (oposta a solda na curva)

As regiões do tubo foram ensaiadas por teste de impacto Charpy a temperaturas de 0 °C, -20 °C, -40 °C, -60 °C e -80 °C , recobertas com uma camada de níquel na superfície de fratura e foi contado o número de delaminações apresentados nos corpos de prova. O critério para a conta das delaminações se baseou em seu comprimento e segundo a classificação da tabela 3.

Tabela 3 – Critério de classificação das delaminações

Tipo	Comprimento(mm)
1	Maior ou igual a 3mm
2	$1\text{mm} \leq \text{comprimento} < 3\text{mm}$
3	Menor que 1mm

Os resultados da energia absorvida e o número das delaminações apresentadas nos corpos de prova neste trabalho estão sumariados na tabela 4.

Tabela 4. Relação das amostras estudadas.

Amostra	Temperatura	Energia (J)	Total Delaminações	Tipo1	Tipo2	Tipo3
CRT 01	0	143,47	18	4	3	11
CRT 43	-40	74,69	26	2	7	17
CRT 63	-60	34,43	5	0	5	0
CRL 01	0	225,36	11	0	5	6
CRL 42	-40	115,90	19	6	9	4
CRL 62	-60	90,07	31	4	10	17
CZIT 21	-20	133,32	32	5	7	20
CZIT 43	-40	83,03	29	6	6	17
CZIL 21	-20	146,35	21	4	5	12
CZIL62	-60	94,33	34	8	7	19
CZEL 21	-20	139,13	11	4	5	2
CZEL 81	-80	97,18	32	6	7	19
CZET 23	-20	87,24	18	5	6	7
CZET 42	-40	77,46	32	6	17	9
CZET 61	-60	61,14	14	4	5	5
CZNT 01	0	144,91	29	7	6	16
CZNT 02	0	208,22	26	3	9	14
CZNT 21	-20	152,12	27	4	9	14
CZNT 42	-40	91,49	50	4	22	24
ZNL 81	-80	81,63	36	7	11	18

B. Métodos Experimentais

As Vinte (20) amostras do tubo API 5L X80 retiradas em duas direções: longitudinal e transversal e ensaiadas no teste de impacto Charpy a 0°C, -20°C, -40°C, -60°C e -80°C de foram cortadas pelo processo de eletro-erosão na direção perpendicular á propagação da fratura (dividindo a superfície de fratura em duas partes) e com uma profundidade de um centímetro. Depois as amostras foram cortadas com processo mecânico na maquina de corte Struers com disco de 125 milímetros de diâmetro e 0,3 milímetros de espessura, os planos de corte dos processos descritos são mostrados na figura3.

Os cortes separam a amostra em duas peças (figura 3(1), (2)) as quais foram processadas da seguinte forma:

Foi executado banho ultra-som nas duas peças na maquina UNIQUE; a amostra classificada com o número 1 (figura3(1)) foi lixada na superfície de corte com lixa 600 e aplicado verniz, finalmente, foi deixada num desecador para uma próxima análise.

A outra parte da amostra classificada com o número 2 (figura 3(2)) foi embutida em resina de ferro na maquina BUEHLER, polida até a lixa 1200 e atacada com solução de nital segundo a norma ASTM E3 (Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens); e com duplo ataque eletrolítico. A microestrutura foi observada no microscópio óptico e no microscópio eletrônico de varredura. Depois da observação no microscópio óptico foi decidido fazer o polimento na maquina automática BUEHLER devido ao fato que as imagens ficaram fora de foco na borda entre a camada de níquel e o aço.

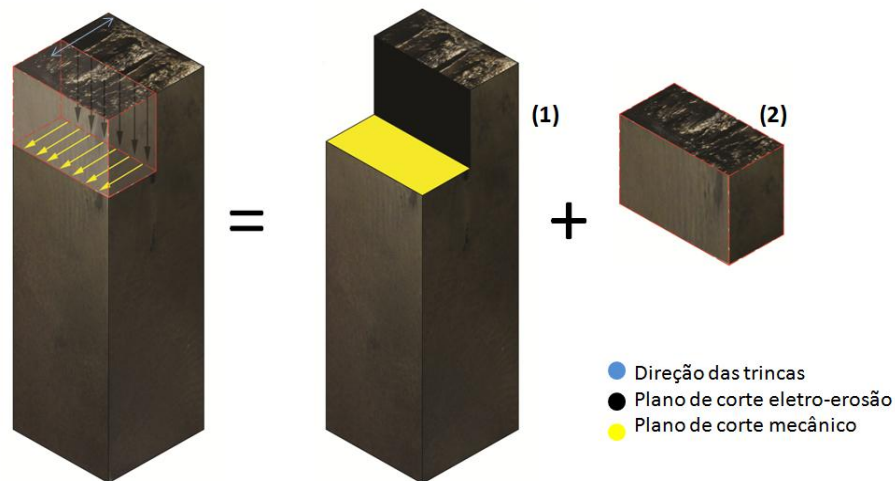


Figura 3- Planos de corte, (1) Primeira peça (2) Segunda peça, processo de eletro-erosão e processo mecânico.

Para a caracterização e identificação da microestrutura associada às trincas, foram capturados mosaicos das superfícies de fratura utilizando o microscópio óptico (MO). Análise microestrutural mais detalhada das pontas e vales das amostras foi realizado mediante microscópio eletrônico de varredura (MEV)

A porcentagem de microconstituente Austenita-Martensita (AM) foi contada utilizando ferramentas manuais do software Axiovision (Release 4.7.1/ 08-2008). O procedimento consiste em fazer uma divisão das micrografias adquiridas no MEV com aumento de 1000 vezes, em três (3) áreas de 750 micrômetros para um total de 2250 micrômetros de área avaliada em cada imagem capturada conforme a figura 4 a informação é armazenada numa folha de cálculo para análise de resultados e processada da seguinte forma:

- 1- Faz-se a divisão das micrografias adquiridas, em três (3) áreas 750 micrômetros que são denominadas MA1, MA2 e MA3, as quais totalizam 2250 micrômetros de área avaliada em cada imagem capturada.
- 2- As bordas do microconstituente AM se contornam manualmente no software Axiovision (Release 4.7.1/ 08-2008) utilizando uma ferramenta que permite calcular a área contorneada, esta informação é armazenada numa folha de cálculo.
- 3- Depois de compilar os dados numa folha se procede a soma da área total do constituinte nas diferentes zonas avaliadas.
- 4- A porcentagem do microconstituente AM é avaliado da seguinte forma:
 - a. É compilada a área do microconstituente em zonas designadas como MA1, MA2 e MA3.
 - b. A área total do microconstituente AM é calculada em micrometros μm .
 - c. A porcentagem do microconstituente AM nas áreas MA1, MA2 e MA3 é calculada mediante a seguinte equação:

$$\text{Porcentagem do AM nas areas MA} = \frac{\text{Area constituinte AM, } \mu\text{m} \times 100\%}{750, \mu\text{m} (\text{Area total de MAx})}$$

- d. A equivalência da porcentagem conforme à área total da zona avaliada que inclui as duas imagens capturadas por ponta ou por vale é calculada mediante a seguinte equação:

$$\text{Porcentagem do AM na zona total avaliada} = \frac{\text{Area constituinte AM, } \mu\text{m} \times 100\%}{2250, \mu\text{m} (\text{Area total de MAx nas duas imagens})}$$

O resultado é somado e considerado a porcentagem total do constituinte AM numa área de 22500 micrometros.

- 5- Depois de ser avaliada a porcentagem em cada uma das imagens capturadas nas pontas e nos vales da superfície de fratura da amostra, os dados são compilados onde se calcula a porcentagem do constituinte em todas as pontas, em todos os vales e em toda a zona avaliada.

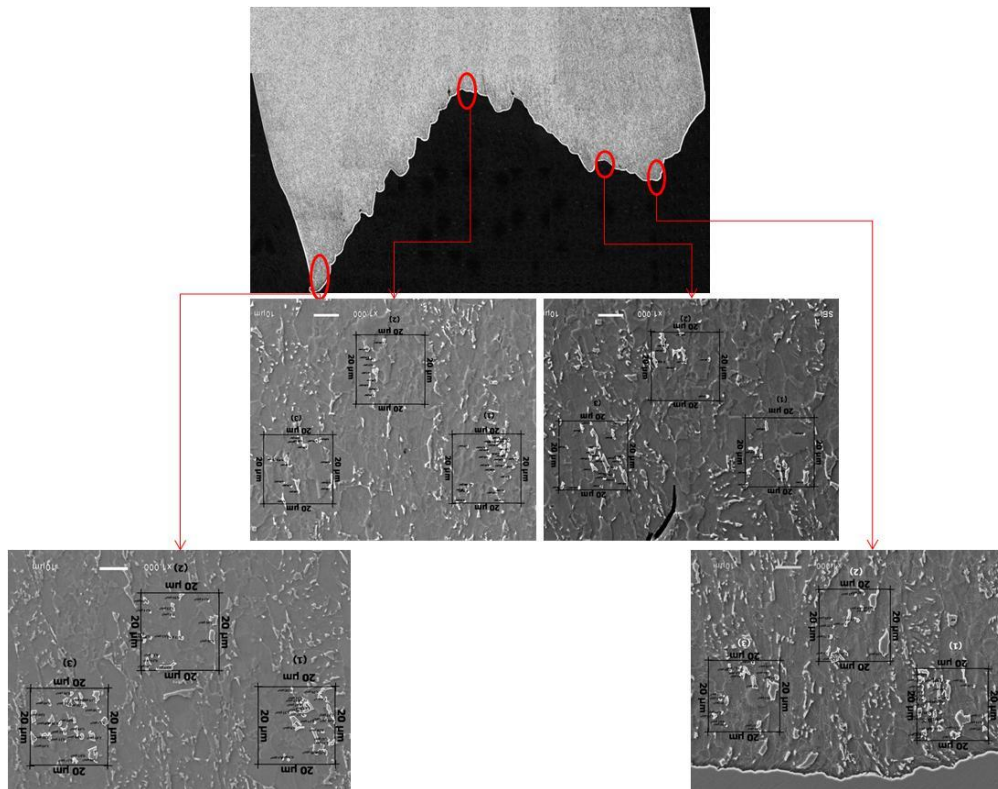


Figura 4- Contagem percentual das fases microestruturais do aço API 5L X80 revelado com duplo ataque eletrolítico no software Axiovision-2008.

Finalmente se fez a dureza do aço API 5L X80 avaliada mediante o ensaio de dureza microvickers.

C. Resultados e Discussão

As vinte (20) amostras ensaiadas com teste de impacto Charpy, apresentam fratura 100% dúctil e deposição de uma camada do níquel em toda sua superfície (figura 5 (a)).

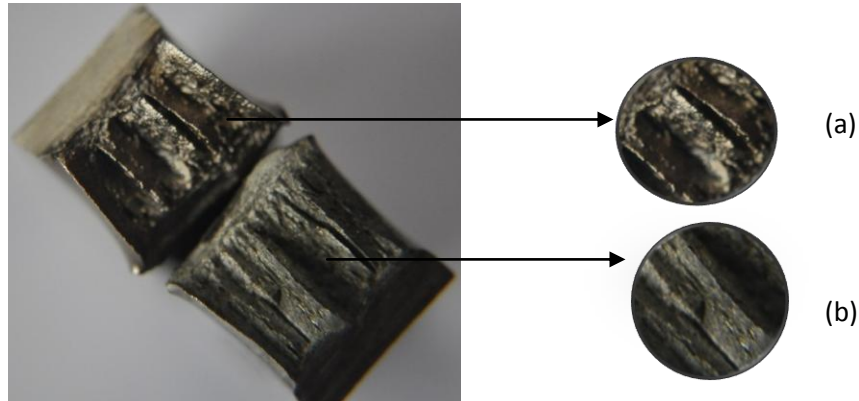


Figura 5- Superfície de fratura das amostras do aço API 5L X80 (a) com camada do níquel (b) sem camada do níquel, testadas no impacto Charpy.

Na análise visual no microscópio óptico foi observado a presença de porosidades na superfície de fratura nas amostras do aço 5L X80 sem ataque como se amostra na figura 6.

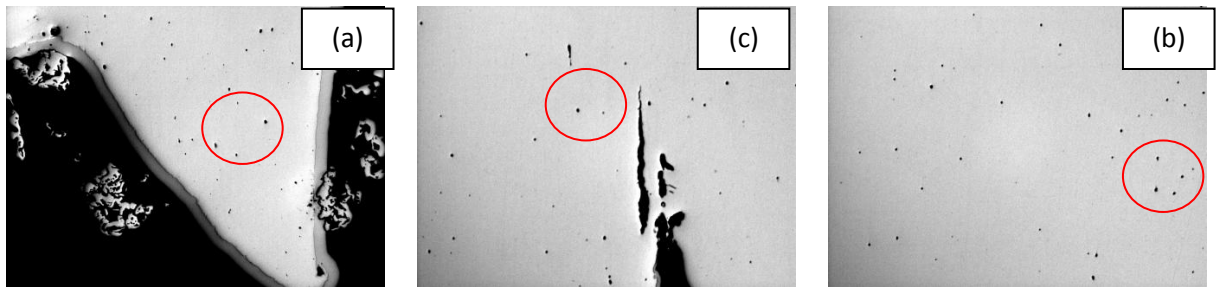


Figura 6- (a) ponta (b) vale, (c) corpo, sem ataque, micrografia MO aço API 5L X80.

As amostras analisadas são da zona de transição e parte reta do tubo API 5L X80 sua microestrutura é uma matriz Ferrítica com dispersão de microconstituente AM (austenita-martensita) o qual pode ser observado como zonas com bordas escuras no microscópio óptico conforme à figura 7, mesmo assim, as duas zonas apresentam carbeto observado no microscópio óptico de Varredura (figura 8 (a),(b)).

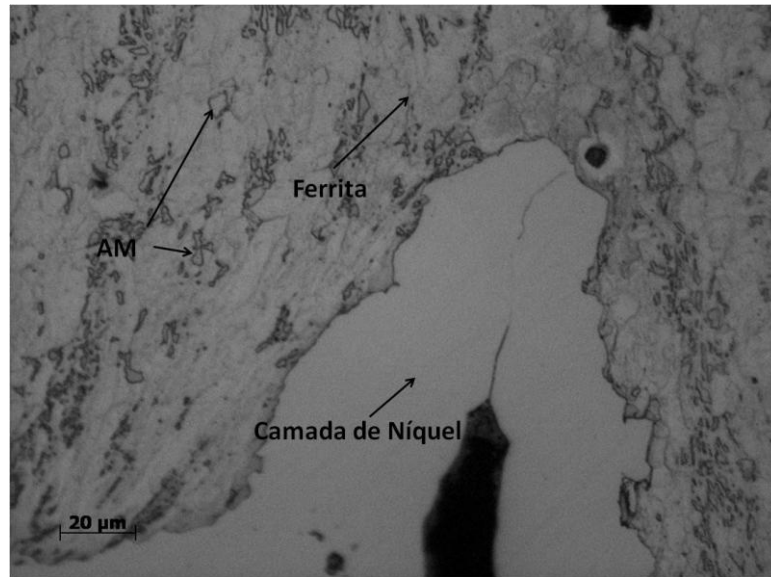


Figura7 - micrografias no MO do aço API 5L X80, duplo ataque eletrolítico.

A zona do trecho reto (figura 8 (a)) e da zona de transição (figura8 (b)) apresentam quase a mesma microestrutura com a diferença que na zona de transição existe maior concentração de carbeto, além de isso, alguns de seus grãos de microconstituente AM tiveram uma transformação para a fase ferrítica.

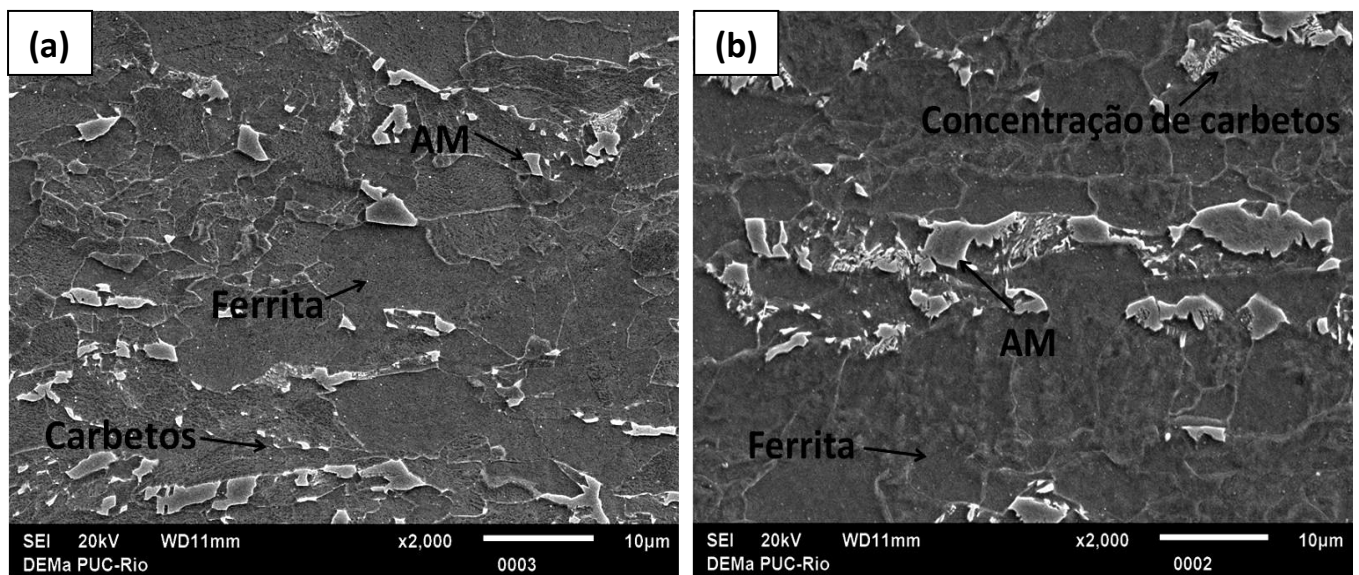
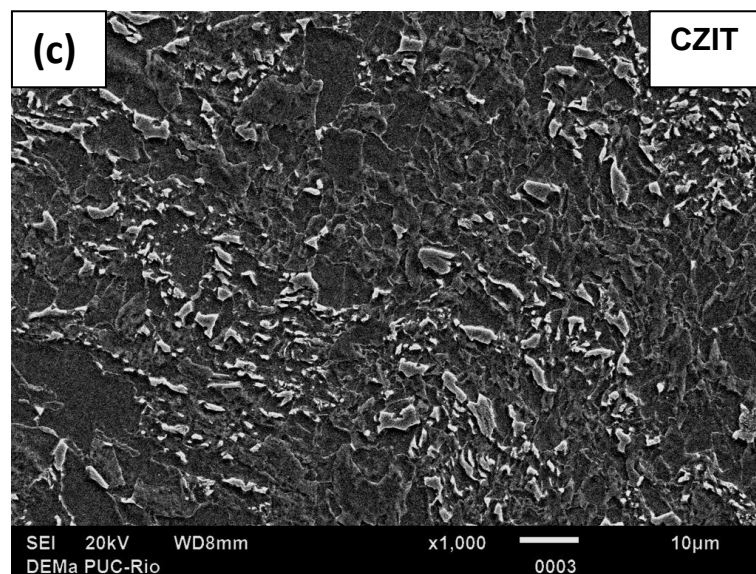
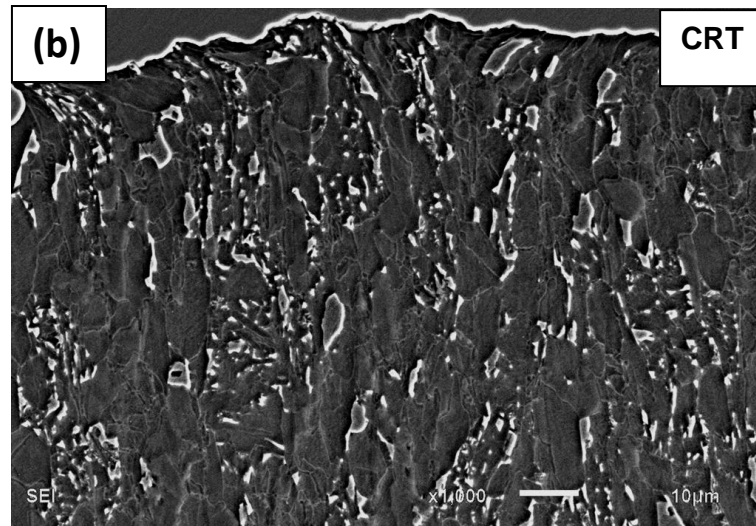
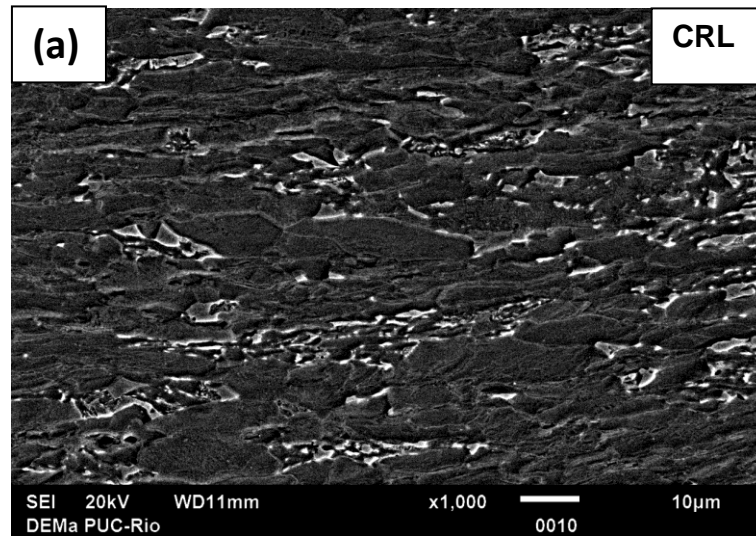
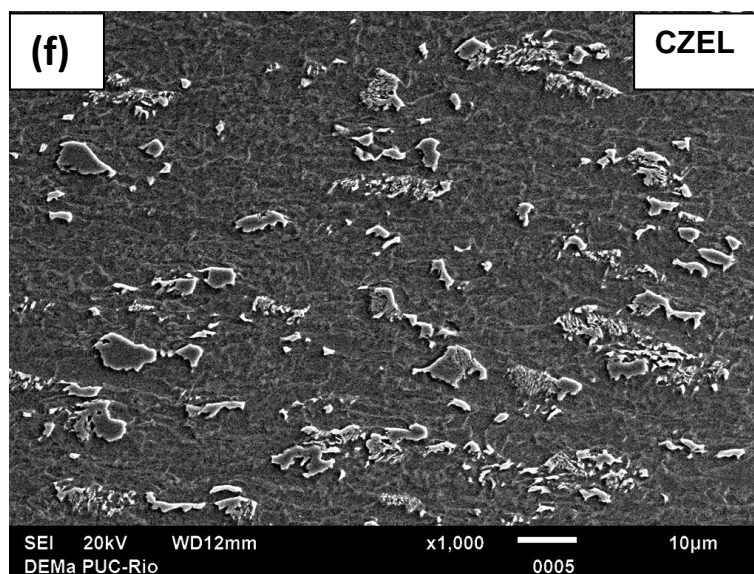
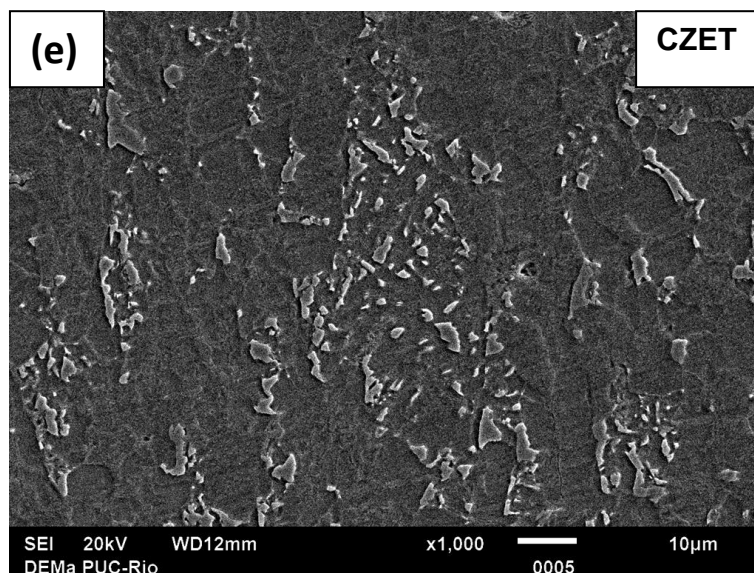
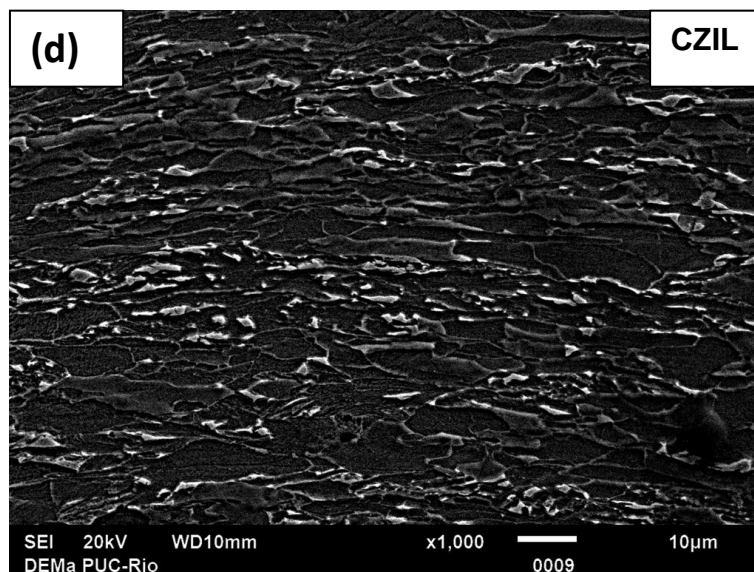


Figura 8 - (a) Trecho reto (b) Zona de transição, micrografias no MEV do aço API 5L X80, duplo ataque eletrolítico.

A microestrutura nas diferentes amostras não é homogênea (figura 9 (a-h)), o microconstituente AM se pode encontrar disperso em toda a microestrutura (figura 9 (f, g)), concentrado em zonas (figura 9 (a, c)), ou situado em aparente orientação preferencial (figura 9 (b, d, g, h)). Em todas as amostras ensaiadas nas diferentes temperaturas o microconstituente AM varia na suas formas e tamanhos e tem diferentes dispersões e orientações as quais formam texturas na microestrutura do material, em algumas amostras.





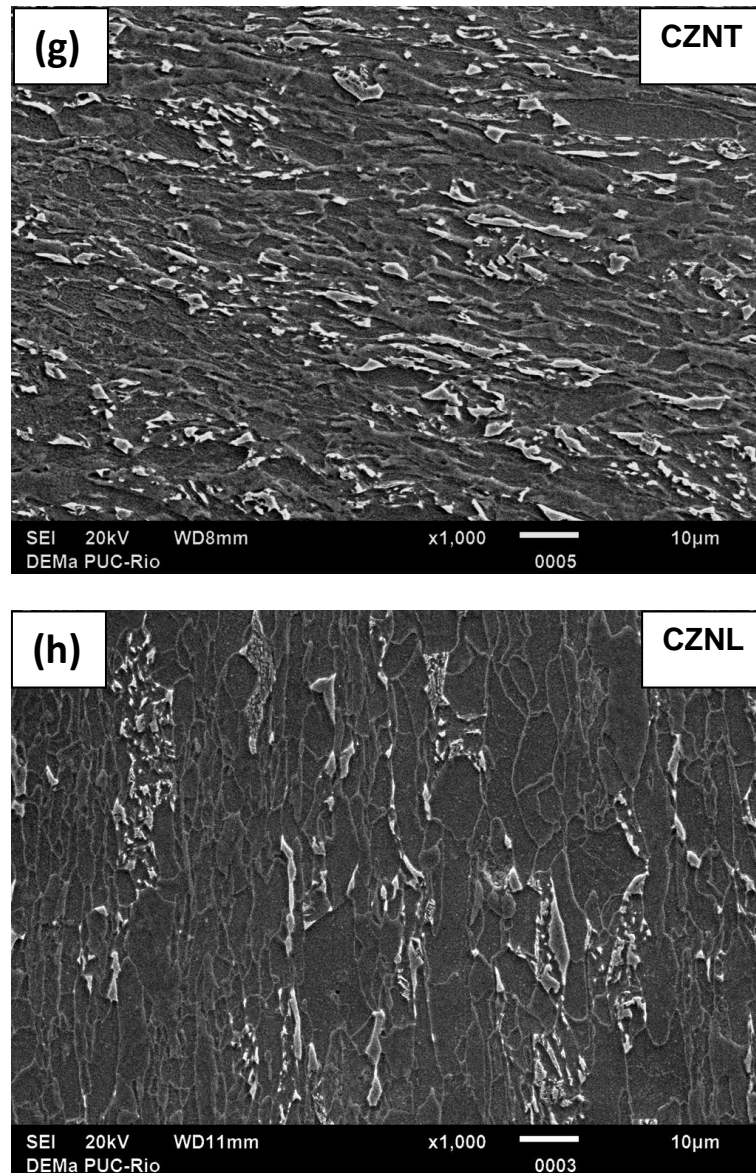


Figura 9 - (a-h) Ponta da superfície de fratura em diferentes zonas do tubo aço API 5L X80, micrografia MEV, duplo ataque eletrolítico.

Também é possível observar nas micrografias da figura 9 que os grãos são alongados, característica própria do processo de fabricação do material (laminação controlada), que origina uma microestrutura de grãos finos, alongados e com orientação preferencial.

A presença de grãos alongados, texturas, alinhamento de partículas, anisotropia e concentração de carbeto, são fatores associados à formação de trincas centrais longitudinais denominadas delaminações (figura 10) as quais são apresentadas por todos os corpos de prova ensaiados nas diferentes temperaturas (Zheng, Yang, Hyeon, Chang, Chagnu). que apresentam as duas zonas analisadas do tubo de aço API 5L X80.

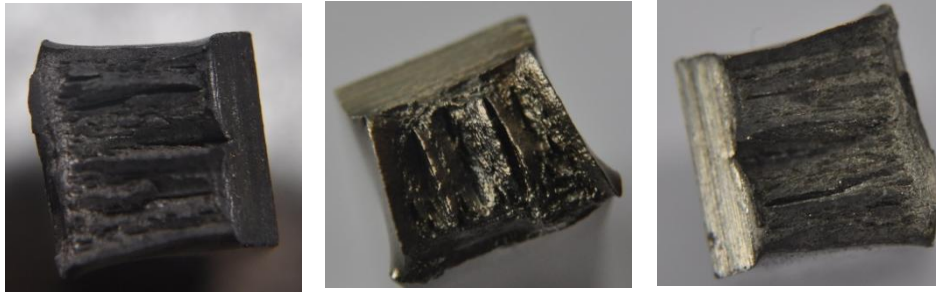


Figura 10. Superfícies de fratura evidenciando o fenômeno de delaminação

O análise na superfície longitudinal dos corpos de prova das amostras do tubo API 5L X80 ensaiadas no teste de impacto Charpy, permite observar a morfologia e profundidade do fenômeno de delaminação do aço, apresentando a formação de trincas centrais longitudinais as quais possuem picos com pontas e vales maiores e menores (figura 11).

Nas micrografias capturadas na superfície de fratura com o Microscópio eletrônico de varredura (MEV) podem ser melhor observadas as pontas e os vales dos picos formados pelo fenômeno de delaminação. Tanto nas pontas como nos vales se observa uma maior deformação dos grãos (figura 12) associada a este fenômeno; também se identificam trincas internas no material com mecanismo de propagação preferencialmente transgranular através dos grãos de ferrita (figura 13).

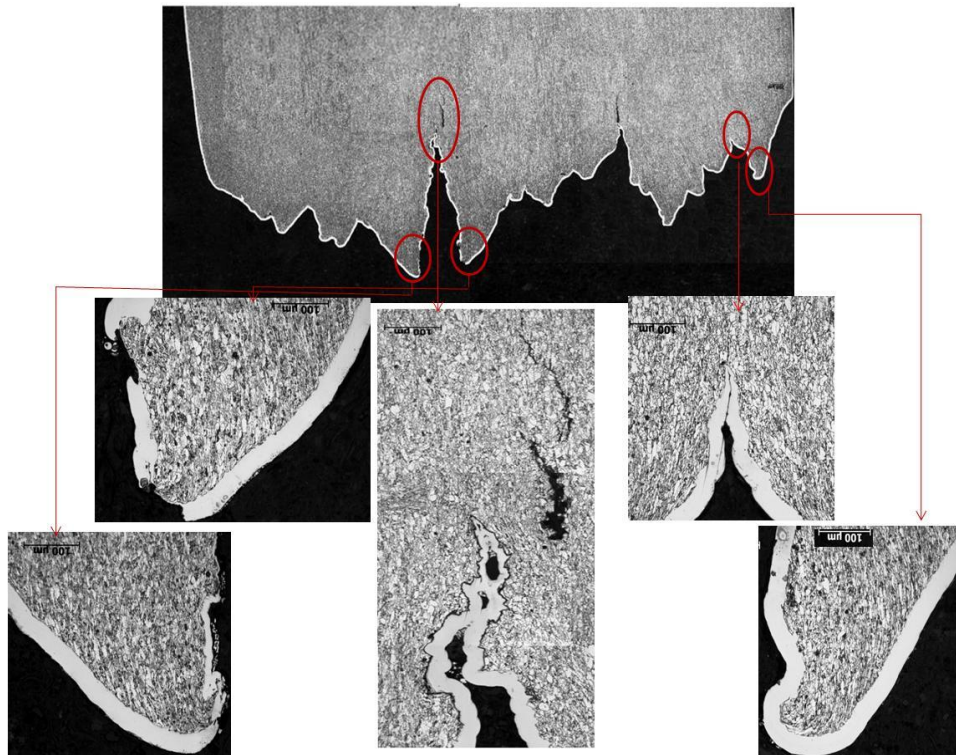


Figura 11-Mosaicos das superfícies de fratura utilizando o microscópio óptico, duplo ataque eletrolítico

A presença de delaminações na superfície de fratura pode influenciar a propagação da trinca, uma vez que estas podem reduzir a concentração de esforços na ponta da trinca e ajudar a deter a sua propagação, contribuindo com a tenacidade do material a baixas temperaturas (Zheng Hua, Liu, Deng, Han,Zheng Lin).

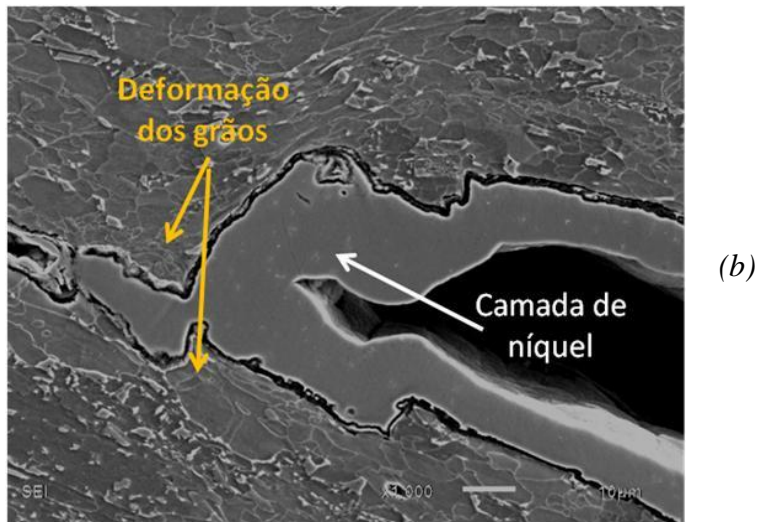
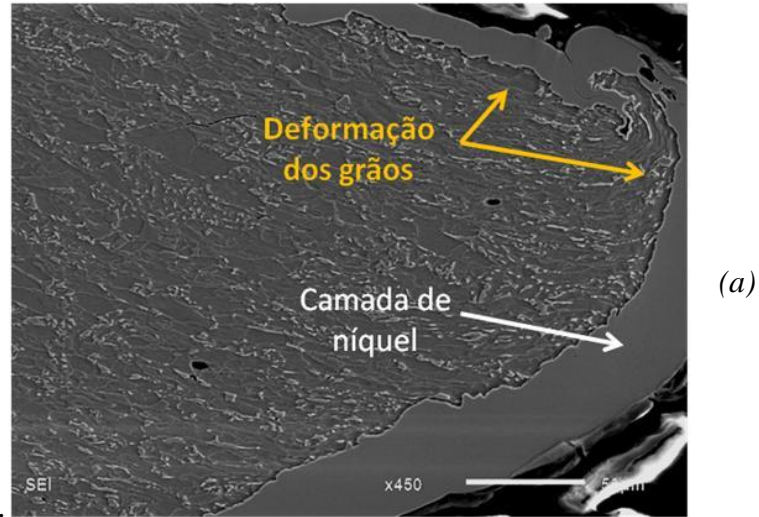
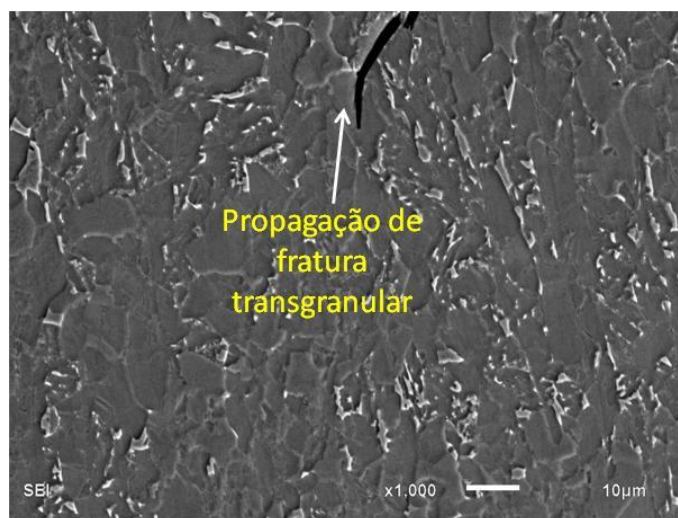


Figura 12-Micrografias (a) ponta (b)vale, MEV.



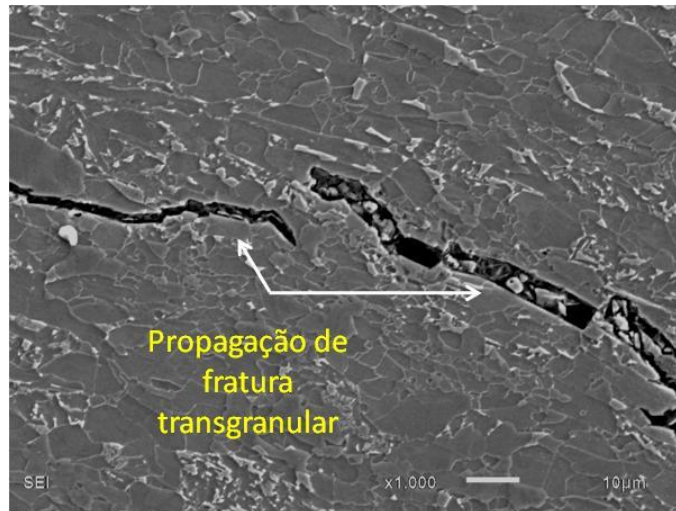


Figura 13-Micrografias vales da superfície de fratura, MEV.

Contagem do microconstituente AM na microestrutura do aço API 5L X80.

Para um melhor entendimento, os 20 corpos de prova foram analisados segundo as temperaturas de ensaio no teste de impacto Charpy, as percentagem de microconstituente AM, energia absorvida e total de delaminações são relacionados com os corpos de prova mediante os gráficos de Microconstituente AM Vs Energia absorvida, Microconstituente AM Vs Delaminações e Corpo de prova Vs Energia absorvida, os dados para a formação das graficas estão sumarizadas nas tabelas 5-9.

Corpos de prova ensaiados por teste de impacto Charpy a temperaturas de 0 °C.

Nos corpos de prova ensaiados na temperatura de 0 °C existe variação na percentagem do microconstituente AM numa faixa de 4 a 6 por cento. A energia absorvida não mostra uma tendência como se pode observar no gráfico 1. Referente ao número de delaminações para esta temperatura aparece uma tendência do numero de delaminações incrementar com o aumento na percentagem do microconstituente (gráfico 2). O grafico 3 apresenta a variação da energia absorvida para os diferentes trechos onde foram retirados os corpos de prova, o valor mínimo de 123,47 J obtido para CP transversal do trecho reto e o valor máximo de 225,36 J obtido para CP longitudinal do trecho reto, indicam também que não existe uma tendencia.

Tabela 5 – Análise dos corpos de prova ensaiados por teste de impacto Charpy a temperaturas de 0 °C.

Corpo de prova	Temperatura de ensaio	percentagem AM	Percentagem Ferrita e carbeto	Energia (J)	Total Delaminações
CRL 01	0	4	Balance	225,36	11
CZNT 01	0	5	Balance	144,91	29
CRT 01	0	5	Balance	143,47	18
CZNT 02	0	6	Balance	208,22	26

Gráfico 1 – Microconstituente AM Vs Energia absorvida a temperatura de 0 °C

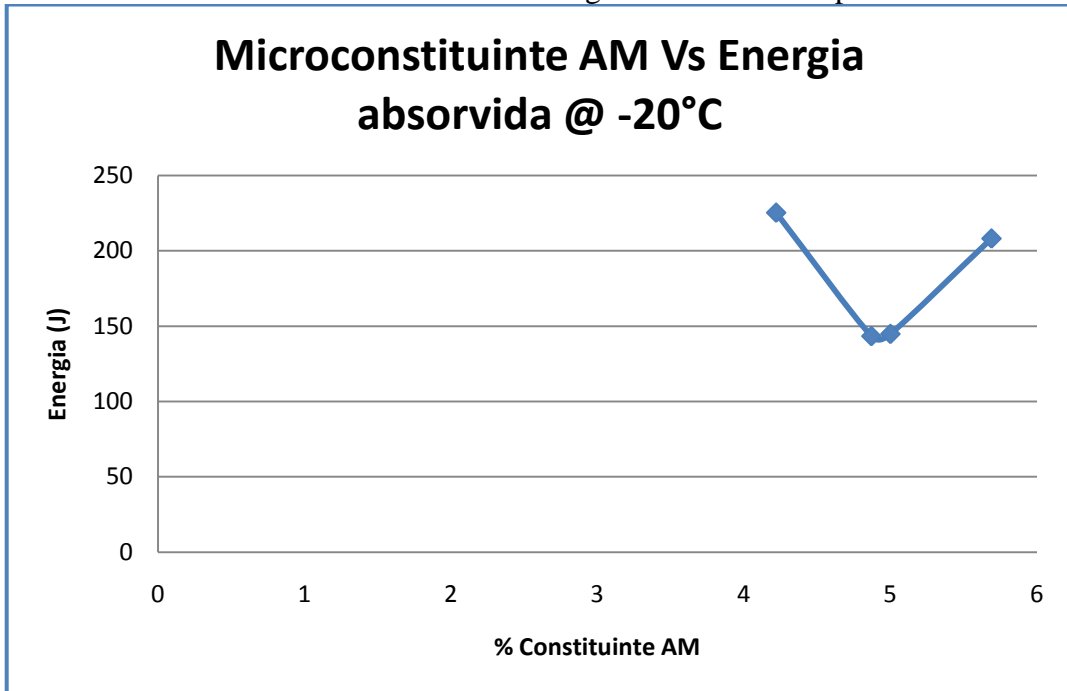


Gráfico 2 – Microconstituente AM Vs Número de delaminações a temperatura de 0 °C.

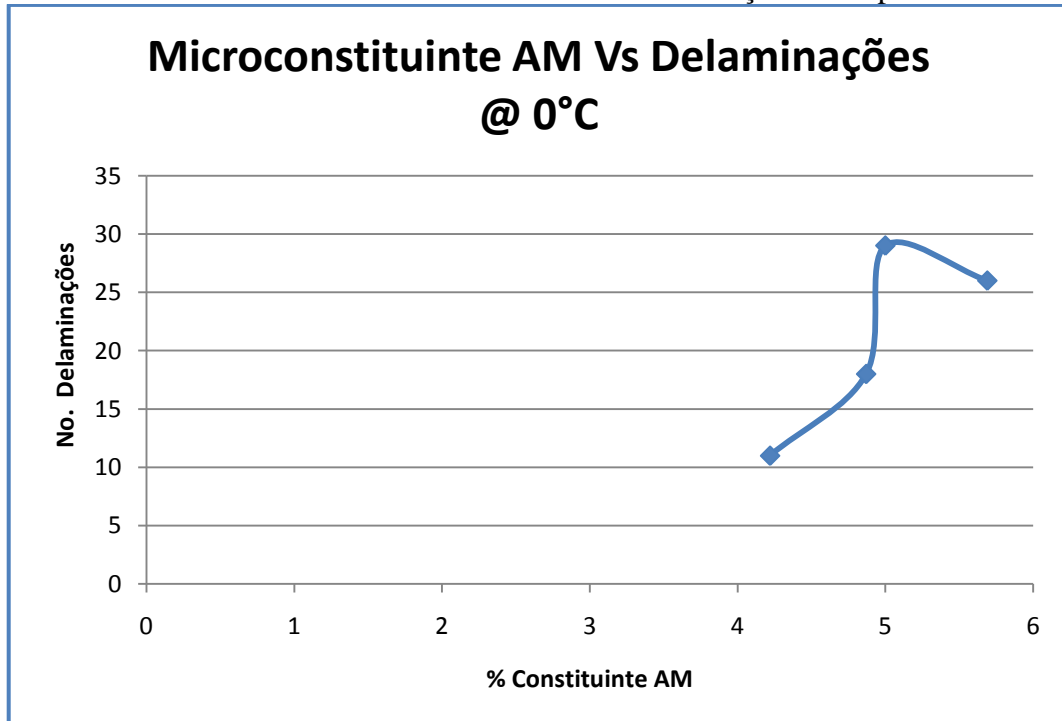
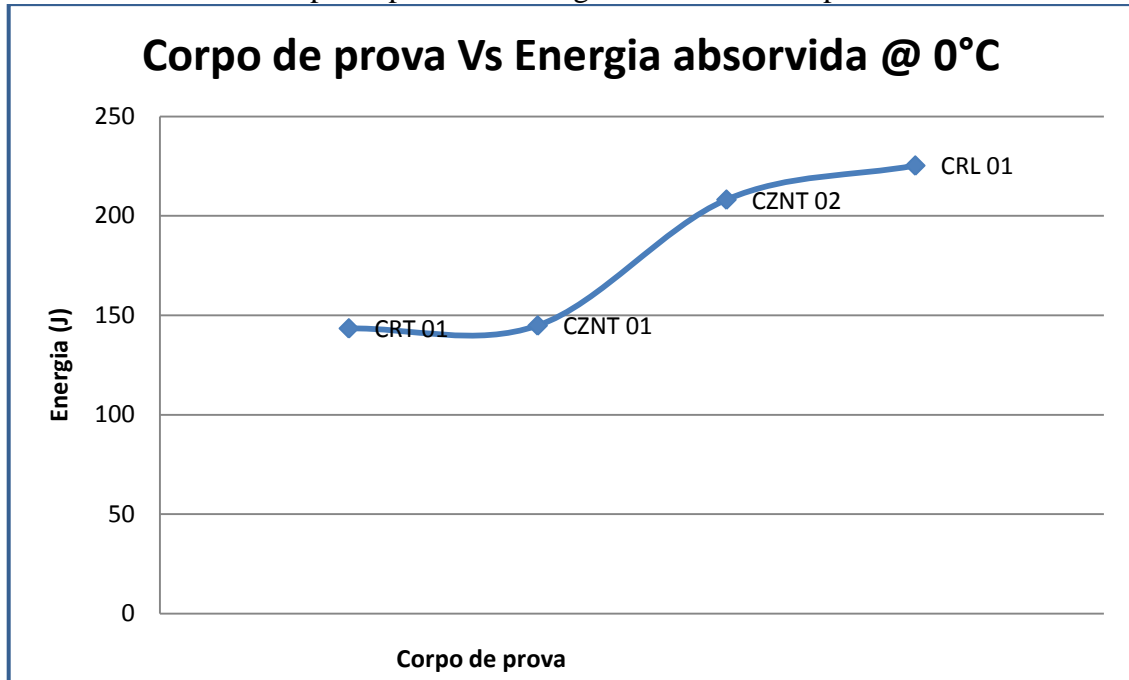


Gráfico 3 – Corpo de prova Vs Energia absorvida a temperatura de 0 °C



Corpos de prova ensaiados por teste de impacto Charpy a temperaturas de -20 °C.

Nos corpos de prova ensaiados na temperatura de -20 °C não existe uma variação significativa na percentagem do microconstituente AM, ainda assim, existe variação na energia absorvida no material e o número de delaminações apresentadas (gráfico 4 e 5). A energia absorvida tem variação nos diferentes corpos de prova entre um valor mínimo de 87,24 J para CZET e um valor máximo de 152,12 J para CZNT(gráfico 6).

Tabela 6 – Análise dos corpos de prova ensaiados por teste de impacto Charpy a temperaturas de -20 °C.

Corpo de prova	Temperatura	percentagem AM	Percentagem Ferrita e carbetos	Energia (J)	Total Delaminações
CZET 23	-20	5	Balance	87,24	18
CZIT 21	-20	5	Balance	133,32	32
CZEL 21	-20	5	Balance	139,13	11
CZIL 21	-20	5	Balance	146,35	21
CZNT 21	-20	5	Balance	152,12	27

Gráfico 4 – Microconstituente AM Vs Energia absorvida a temperatura de -20 °C

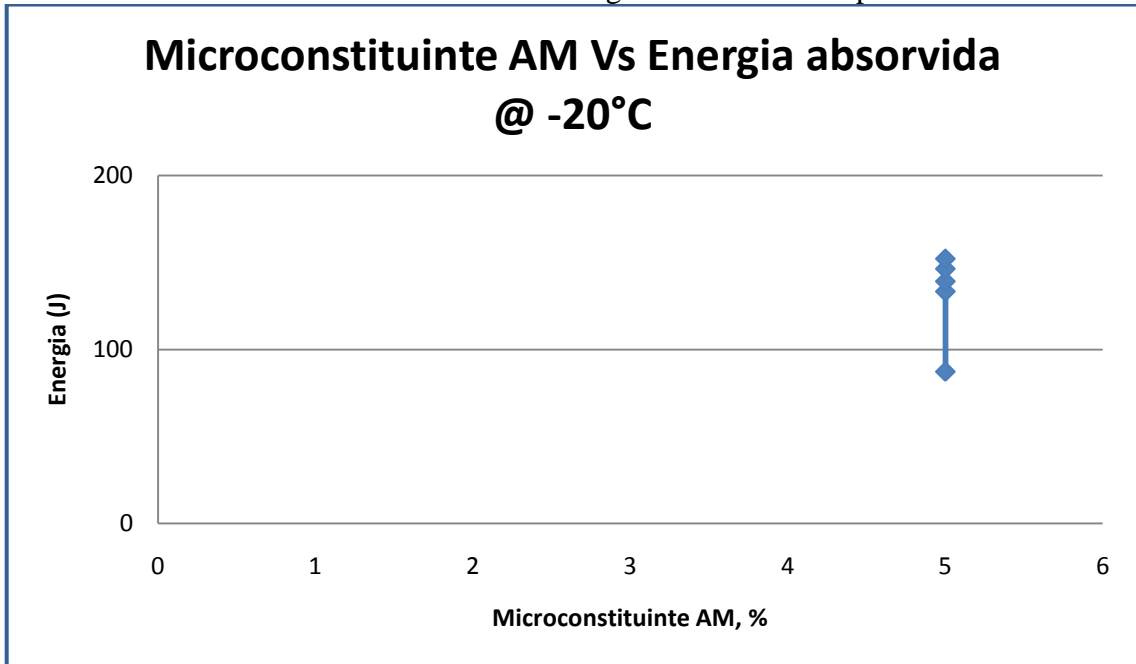


Gráfico 5– Microconstituente AM Vs Número de delaminações a temperatura de -20 °C.

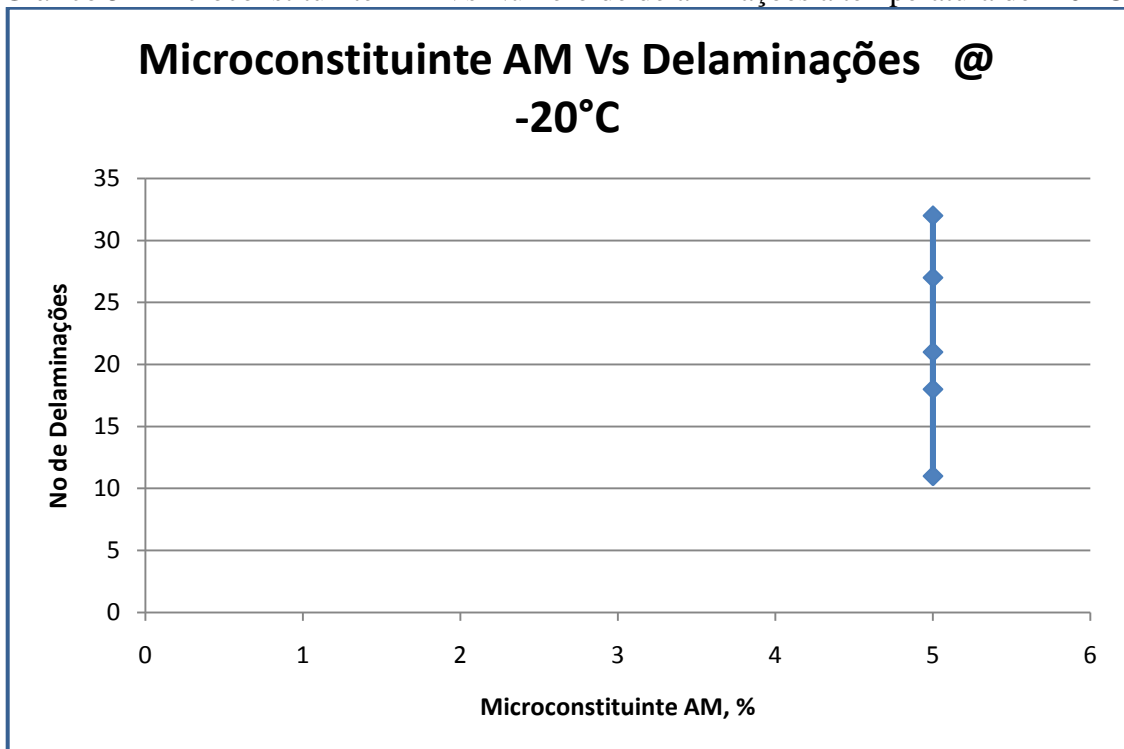
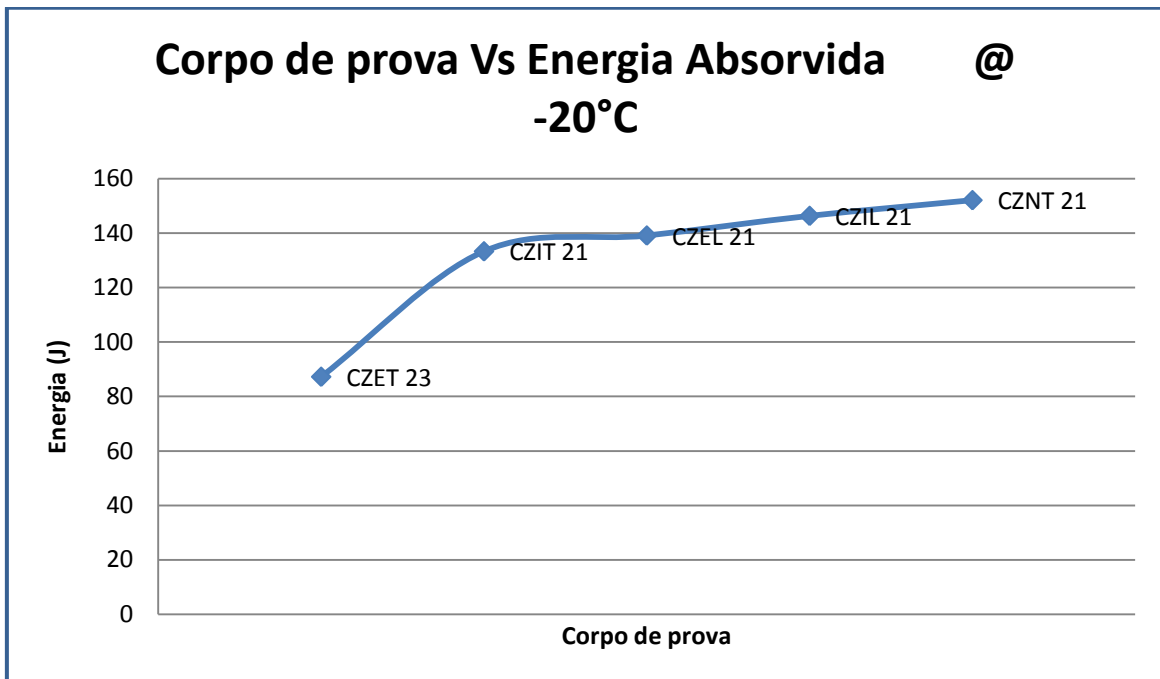


Gráfico 6 – Corpo de prova Vs Energia absorvida a temperatura de -20 °C



Corpos de prova ensaiados por teste de impacto Charpy a temperaturas de -40 °C.

Ao igual que para a temperatura de -20°C, nos corpos de prova ensaiados na temperatura de -40 °C não existe variação significativa da percentagem do microconstituente AM, ainda assim, existe variação na energia absorvida no material e o número de delaminações apresentadas (gráfico 7 e 8). A energia absorvida também varia nos diferentes trechos do tubo analisados em valores entre um mínimo de 74,69 J e um máximo de 115,9 J (gráfico 9).

Tabela 7 – Análise dos corpos de prova ensaiados por teste de impacto Charpy a temperaturas de -40 °C.

Amostra	Temperatura	percentagem AM	Energia média	Energia (J)	Total Delaminações
CZNT 42	-40	3	110,19	91,49	50
CRL 42	-40	6	87,79	74,69	26
CZIT 43	-40	6	75,62	77,46	32
CRT 43	-40	6	89,18	83,03	29
CZET 42	-40	6	123,64	115,9	19

Gráfico 7 – Microconstituente AM Vs Energia absorvida a temperatura de -40 °C

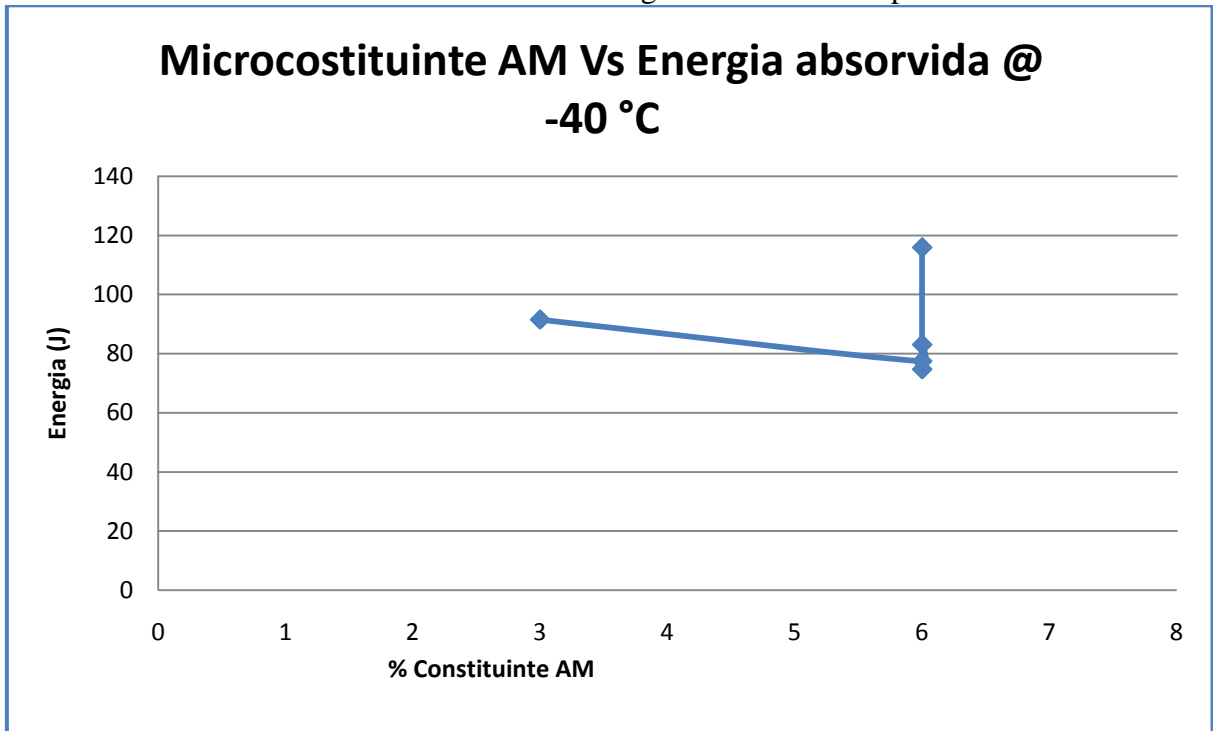


Gráfico 8 – Microconstituente AM Vs Número de delaminações a temperatura de -40 °C

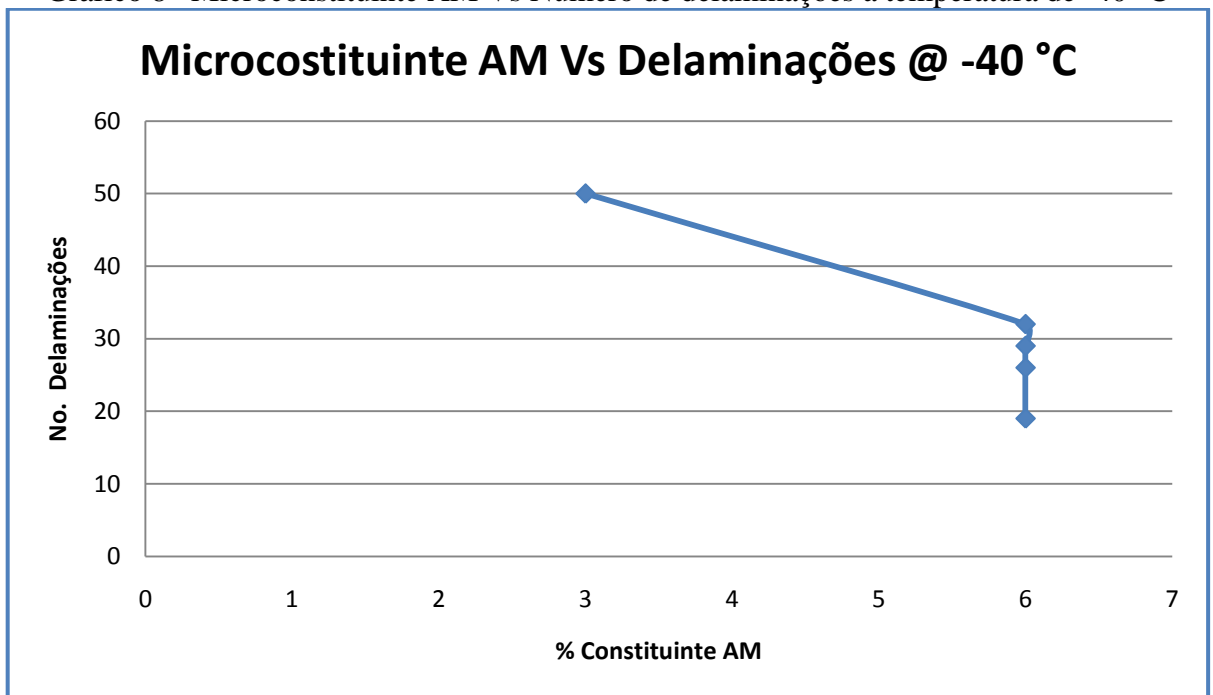
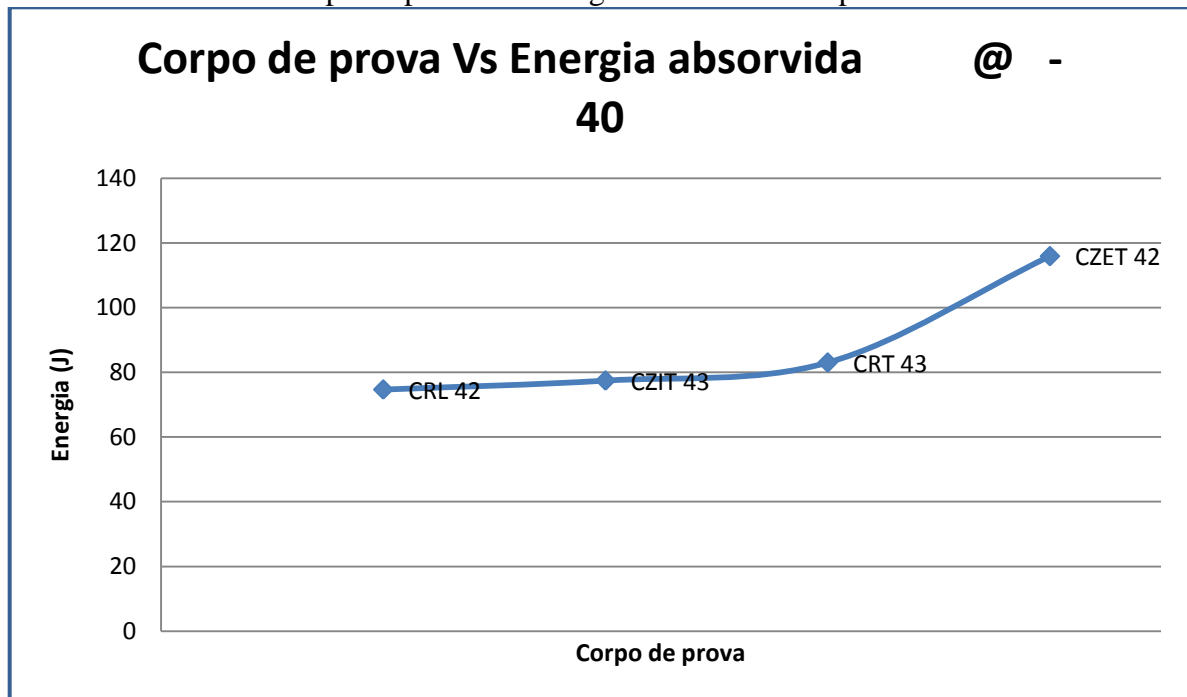


Gráfico 9 – Corpo de prova Vs Energia absorvida a temperatura de -40 °C



Corpos de prova ensaiados por teste de impacto Charpy a temperaturas de -60 °C.

Nos corpos de prova ensaiados na temperatura de -60 °C existe variação na percentagem do microconstituente AM numa faixa de 4% a 7%, nesta temperatura a tendência apresentada foi o aumento da energia absorvida com o incremento da percentagem de microconstituente AM, como pode ser observado no gráfico 10, o número de delaminações apresenta a tendência de diminuir com o incremento da percentagem de constituinte AM (gráfico 11).

Da mesma forma que nas temperaturas anteriores, a energia absorvida varia nos diferentes trechos onde os Cps foram retirados do tubo, entre valores de 34,43 J absorvidos para o CRT e o valor de 94,33 J para o CZIL (gráfico 12).

Tabela 8 – Análise dos corpos de prova ensaiados por teste de impacto Charpy a temperaturas de -60 °C.

Amostra	Temperatura	percentagem AM	Percentagem Ferrita e carbeto	Energia (J)	Total Delaminações
CRT 63	-60	7	Balance	34,43	5
CZET 61	-60	6	Balance	61,14	14
CRL 62	-60	6	Balance	90,07	31
CZIL62	-60	4	Balance	94,33	34

Gráfico 10– Microconstituente AM Vs Energia absorvida a temperatura de -60 °C

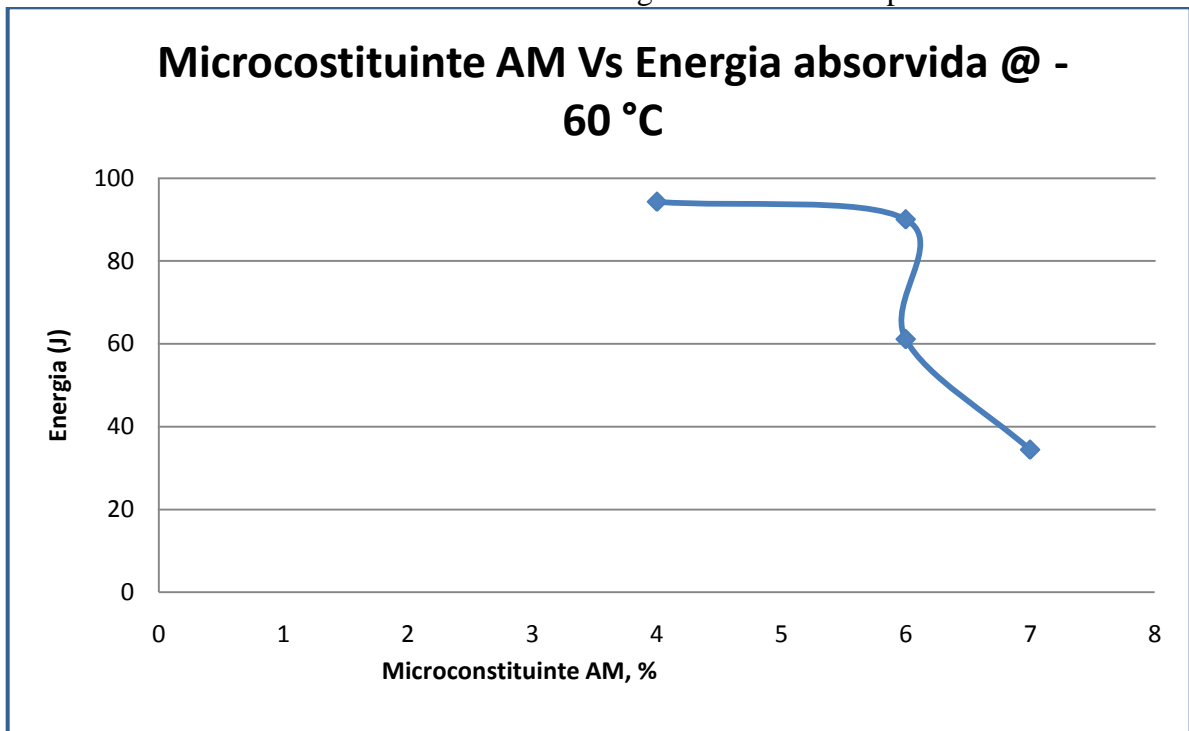


Gráfico 11– Microconstituente AM Vs Número de delaminações a temperatura de -60 °C

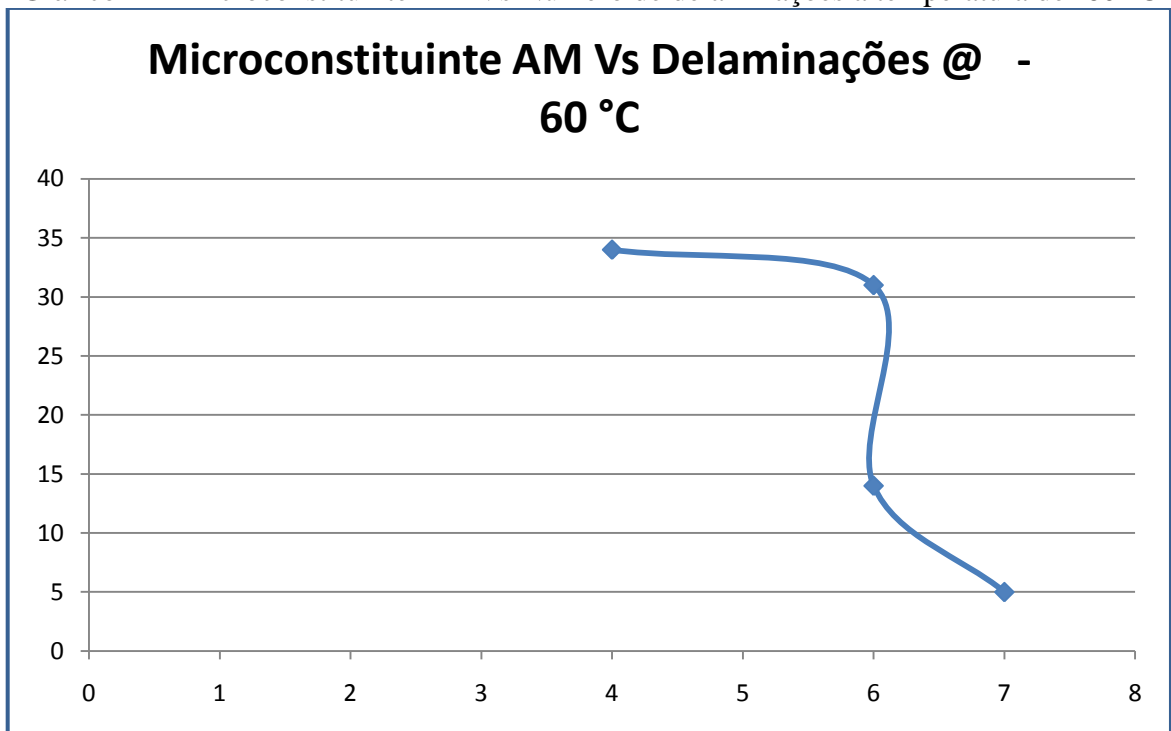
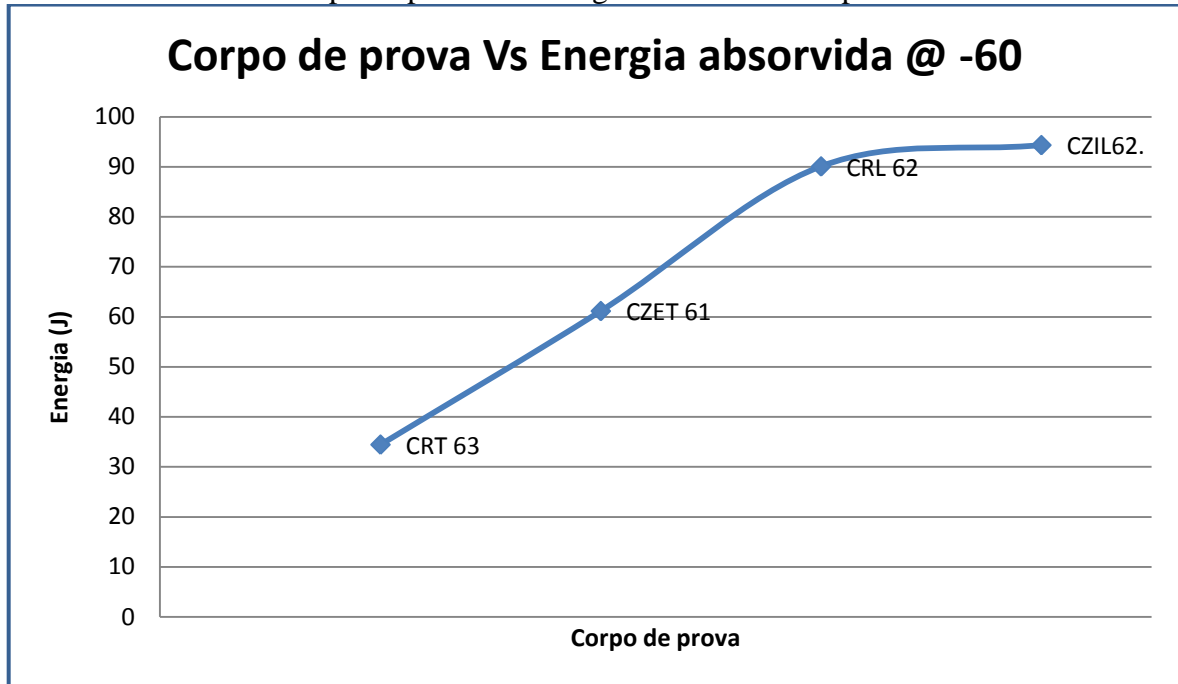


Gráfico 12 – Corpo de prova Vs Energia absorvida a temperatura de -40 °C



Corpos de prova ensaiados por teste de impacto Charpy a temperaturas de -80 °C.

Não foi possível completar o análise dos corpos de prova ensaiados a temperatura de -80 °C, devido a que não se tem suficientes amostras para estabelecer tendências nos resultados.

Tabela 9 – Análise dos corpos de prova ensaiados por teste de impacto Charpy a temperaturas de -80 °C.

Amostra	Temperatura	percentagem AM	Energia (J)	Total Delaminações
ZNL 81	-80	4	81,63	36
CZEL 81	-80	5	97,18	32

Os diferentes corpos de prova possuem uma percentagem de microconstituente que varia em uma faixa de 4% a 7%, está variação se apresenta tanto para as diferentes temperaturas testadas, assim como para os diferentes trechos do tubo onde os corpos de prova foram retirados. Os corpos de prova ensaiados a temperatura de 0°C e -60 °C tem um comportamento diferente que os testados às temperaturas de -20 °C e -40°C.

A 0 °C não existe nenhuma tendência do número de delaminações e a energia absorvida com respeito á percentagem de microconstituente AM; na temperatura de -60°C o número de delaminações e a energia absorvida diminui com o aumento da percentagem de microconstituente AM, finalmente, para as temperaturas de -20°C e -40 °C se apresenta variação do número de delaminações e da energia absorvida, embora a percentagem do microconstituente AM determinado seja quase constante.

Os anteriores resultados indicam que o trecho do tubo onde foram retirados os corpos de prova e as temperaturas de ensaio do teste charpy, tem uma maior influencia na formação

de delaminações e na energia absorvida pelo material, do que a porcentagem de microconstituente AM na sua microestrutura.

Nas temperaturas analisadas a energia absorvida varia com respeito ao trecho do tubo onde foram retirados os corpos de prova. Assim, os corpos de prova retirados na zona de transição e no trecho reto do tubo, ensaiados nas mesmas condições e tendo parecidos constituintes microestruturais, ou seja, quase a mesma microestrutura entre zonas, se esperaria obter uma energia absorvida parecida entre os corpos de prova, mesmo assim, não acontece. Esta variação indica que a energia absorvida esta dependendo de outros fatores tais como: possivelmente a distribuição da microestrutura na zona onde foi extraído o corpo de prova, a orientação do corpo de prova com respeito à direção de laminação (longitudinal ou transversal) (Yang, Kim, Cho, Gyu e Ren) e a existência de delaminações nos corpos de prova ensaiados que também influem na energia absorvida pelo aço (Wei, wei, Lin, Yi-yin, ke-yang).

A energia absorvida por o material está dependendo da zona de onde é tomado o corpo de prova, mais não é possível afirmar com este análise qual das zonas do tubo absorve maior energia, já que não foi possível observar uma tendencia marcada para os trechos analisados nas diferentes temperaturas ensaiadas.

A presença das delaminações nas superfícies de fratura dos CPs analisados, parece não estar dependendo da percentagem do microconstituente AM na faixa de 4% a 7%, nas condições de ensaio aqui testadas. Segundo Zheng e colaboradores, o fenômeno de delaminação depende de outros fatores da microestrutura tais como: grãos alongados, texturas, alinhamento de partículas, anisotropia e concentração de carbeto. A microestrutura observada para todas os corpos de prova analisados, apresentavam estas características.

Durezas microvickers.

Os resultados da dureza microvickers medida em três diferentes pontas e dois diferentes vales de cada uma das das superfícies de fratura dos corpos de prova, é sumarizada na tabela 10.

Tabela 10 – Resultados da dureza microvickers dos corpos de prova ensaiados por teste de impacto Charpy a todas as temperaturas.

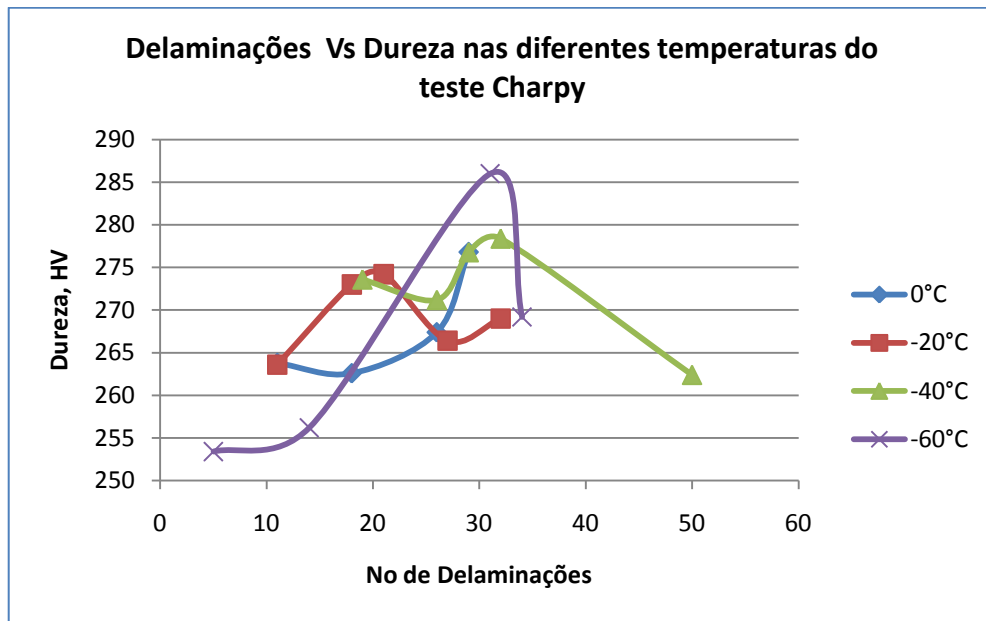
Dureza microvickers, carga 1000 gramas.						
Temperatura	Corpo de prova	Zona superfície da fratura	HV	Dureza	Dureza Media por temperatura	Delaminações medias por temperatura
0	CZNT 02	Ponta	290	267,4	268	21
			274			
			245			
		Vale	284			
			244			
	CZNT01	Ponta	292	276,8		
			275			
			294			
		Vale	265			
			258			
	CRT01	Ponta	264	262,6		
			267			
262						
Vale		251				

			269			
	CRL01	Ponta	276	263,8		
			279			
			265			
		Vale	245			
			254			
-20	CZIT 21	Ponta	274	269		
			277			
			282			
		Vale	253			
			259			
	CZET 23	Ponta	296	273		
			285			
			282			
		Vale	233			
			269			
	ZNT21	Ponta	276	266,4		
			260			
			281			
		Vale	264			
			251			
	CZIL 21	Ponta	279	274,2		
			283			
			306			
		Vale	241			
			262			
CZL21	Ponta	260	263,6			
		264				
		302				
	Vale	226				
		266				
-40	CZIT 43	Ponta	279	276,8		
			274			
			297			
		Vale	281			
			253			
	CRL42	Ponta	300	273,6		
			278			
			282			
		Vale	268			
			240			
CRT43	Ponta	275	271,2			
		256				
		289				
	Vale	265				

	CZNT42	Ponta	271	262,4	266	21
			288			
			253			
		279				
		Vale	255			
			237			
	CZET 42		Ponta	300		
		286				
		289				
		Vale	257			
260						
-60	CRT 63	Ponta	285	253,4		
			279			
			231			
		Vale	227			
			245			
	CRL62	Ponta	312	286		
			279			
			325			
		Vale	254			
			260			
	ZIL 62	Ponta	301	269,2		
			251			
			295			
		Vale	246			
			253			
	CZET 61	Ponta	235	256,2		
			275			
			263			
Vale		264				
		244				
-80	ZNL81	Ponta	321	271		
			258			
			287			
		Vale	239			
			250			
	CZEL 81	Ponta	307	278,6		
			292			
			280			
		Vale	256			
			258			

Para relacionar a microdureza com a delaminações foi feito um gráfico das delaminações Vs Dureza nas diferentes temperaturas (gráfico 13).

Gráfico 13 – Delaminações médias Vs Dureza Media nas diferentes temperaturas.



Não foi possível observar uma tendência específica da dureza com respeito ao número de delaminações, para nenhuma das temperaturas ensaiadas, cabe notar que a dureza foi determinada tomando como referência pontos onde possivelmente a deformação dos grãos sofrida após a realização do teste Charpy pode estar influenciando a resposta. Outro fator que pode estar influenciando nesta análise é a heterogeneidade microestrutural da área que abrange o ponto de indentação, embora, o método utilizado seja de microdureza, as características de refino de grão e a presença de microconstituente AM disperso na microestrutura podem alterar os dados obtidos e contribuir com a dureza em algumas zonas.

Conclusões

O valor da porcentagem de microconstituente AM determinado para as temperaturas de -20°C e -40°C, coincidiu em todos os corpos de prova analisados, o mesmo não acontece para o resto das temperaturas analisadas, nas quais a porcentagem de microconstituente AM varia em uma faixa de 4% a 7%, apresentando variação também segundo o trecho do tubo onde foi retirado o Cp.

Pelo comportamento das curvas obtidas é possível concluir que o número das delaminações e a energia absorvida pelo material, dependem da zona de ensaio no tubo do aço API 5L X 80 e não da porcentagem do microconstituente AM na faixa de 4% a 7% na sua microestrutura.

A microestrutura entre a zona de transição e o trecho reto do tubo não tem muitas diferenças, mesmo assim, existe uma distribuição do microconstituente AM que dá uma textura na microestrutura a qual é associada a presença de delaminações que afetam a energia absorvida e com isso a ductilidade no aço.

Referências

- 1 - BATISTA, Gilmar Zacca; BOTT, Ivani de S.. **Curvamento por indução de tubo da classe API 5L X80**. Rio de Janeiro, 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

- 2- FERNANDEZ, Isis; BOTT, Ivani de S. **Relação entre a Energia Charpy e a ductilidade através da espessura de aço API 5L X80.** Rio de Janeiro, 2010. Dissertação (Engenheiro de Petróleo) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- 3 - SHIN, S.Y.; HONG, S.; BAE, J.; KIM, K.; LEE, S. **Separation Phenomenon occurring during the Charpy impact test of API X80 pipeline steels.** Metallurgical and Materials transactions A, vol. 40A, October 2009 pp.2333-2349.