



Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de São Carlos
Departamento de Engenharia de Materiais, Aeronáutica e
Automobilística

Informações fornecidas pelo solicitante:

Material Declarado: Liga VR510 7075

Fornecedor Declarado do Material: Empresa Alcoa/Utinga

Tratamento Térmico: T6 – Envelhecimento e Solubilização.

Amostra: Flange de roda 2014 Formula

Certificado de Controle de Qualidade: Não declarado

Certificado de Análise de Material: Não declarado

SMM0330 – Princípios de análise de falhas

Prof. Dr. Cassius O.F. Terra Ruchert

Turma de Engenharia de Materiais e Manufatura

São Carlos, novembro 2015

1. Objetivo.....	7
2. Descrição do Problema e Informações Fornecidas	7
2.1 – Propriedades Mecânicas dadas pelo fabricante.....	9
3. Procedimento experimental	10
3.1 – Vida em fadiga (elementos finitos).....	10
3.2 – Análise Macrográfica	14
3.3 – Análise Micrográfica	22
3.4 – Microscópico Eletrônico de Varredura (MEV)	34
3.5 – Análise Química.....	44
3.6 - Ensaio de Tração	46
3.7 - Ensaio de Impacto	56
3.8 - Ensaio de Tenacidade a Fratura (K1C).....	63
3.9 – Análise de Dureza	68
4 – Conclusão.....	69
5 – Recomendações.....	69

Índice de Ilustrações

Gráficos

Gráfico 1: Espectro de tensões em uma volta na pista.....	12
Gráfico 2: Comprimento da trinca versus Ciclos com tensões obtidos na Tabela 3.	12
Gráfico 3: Taxa de crescimento da trinca.	13
Gráfico 4: Comprimento da trinca versus Ciclos com tensões obtidas no “Estudo de caso - 4. Análise tensões e Fadiga”.	14
Gráfico 5: Tensão por Deformação para o corpo de prova CP 1.....	46
Gráfico 6: Tensão por Deformação para o copo de prova CP 1.	47

Tabelas

Tabela 1: Dureza do material utilizado.....	9
Tabela 2: Propriedades mecânicas do material.	10
Tabela 3: Tensões máximas, mínimas e os ciclos por volta.	10
Tabela 4: Médias e amplitudes de tensão de fadiga.....	11
Tabela 5: Composição química obtida via EDS	44
Tabela 6 - Composição nominal da liga 7075-T6.....	44
Tabela 7 - Comparação entre a composição nominal da liga ASM 7075-T6 e a amostra analisada	45
Tabela 8 - Possíveis candidatos para o material da flange.....	45
Tabela 9: Propriedades monotônicas, bem como suas médias, obtidas no ensaio de tração e o valor encontrado na literatura para a liga 7075-T6.	47
Tabela 10 - Valores das Durezas (HRB) e suas médias obtidos.....	69

Figuras

Figura 1: Flange traseira com dimensões gerais: (a) face externa, (b) face oposta.	7
Figura 2: Montagem do conjunto: (a) vista isométrica da face externa, (b) vista isométrica da face oposta.	8
Figura 3: Montagem do conjunto: vista em corte.	8
Figura 4: Conjunto da roda montado no carro.	9
Figura 5: Fotografia do dente 2-A.	15
Figura 6: Fotografia do dente 4-B.	15
Figura 7: Estereoscopia do dente 2-A.	16
Figura 8: Estereoscopia do dente 4-B.	16
Figura 9: Fotografia do dente 5-A.	17
Figura 10: Fotografia do dente 5-B.	18
Figura 11: Estereoscopia do dente 5-A.	19
Figura 12: Estereoscopia do dente 5-B.	20
Figura 13: Fotografia do dente 5.	21
Figura 14: Fotografia do dente 6 para efeitos de comparação.	21
Figura 15: Imagem tirada da amostra sem fratura da região central da amostra sem ataque. Ampliação 10x. Destacam-se precipitados em toda extensão da amostra.	22
Figura 16: Imagem obtida da amostra sem fratura da região da extremidade da amostra sem ataque. Ampliação 20x. Em destaque, tem-se aglomerado de pontos mais escuros indicando precipitados.	23
Figura 17: Imagem obtida da amostra sem fratura da região central da amostra sem ataque. Ampliação 50x. Em destaque, diferentes cores indicam diferentes precipitados.	23
Figura 18: Imagem obtida da amostra com fratura da região central da amostra sem ataque. Ampliação 10x. Destacam-se precipitados em toda área.	24
Figura 19: Imagem obtida da amostra com fratura da região central da amostra sem ataque. Ampliação 20x.	24
Figura 20: Imagem obtida próxima a fratura da amostra fraturada sem ataque. Ampliação 20x.	25
Figura 21: Imagem obtida da amostra com fratura da região próxima a fratura sem ataque com ampliação 50x. Em destaque, diferentes cores representam diferentes precipitados.	25
Figura 22: Imagem obtida da amostra com ataque da região central. Ampliação 20x.	26

Figura 23: Imagem obtida da amostra com ataque da região central. Ampliação 50x.	27
Figura 24: Imagem obtida da amostra com ataque da região central. Ampliação 100x.	27
Figura 25: Imagem obtida da amostra fraturada próxima a região de fratura com ataque. Ampliação 10x.....	28
Figura 26: Imagem obtida da amostra fratura próxima a região de fratura com ataque. Ampliação 50x.....	28
Figura 27: Imagem obtida da amostra fraturada da região central com ataque. Ampliação 50x.	29
Figura 28: Imagem obtida com luz polarizada da amostra fraturada atacada na região central. Ampliação 50x.	29
Figura 29: Imagem com contraste na amostra fraturada com ataque da região central. Ampliação 20x.....	30
Figura 30: Imagem com contraste obtida na amostra fraturada sem ataque. Ampliação 10x.	31
Figura 31: Imagem obtida do corpo de prova sem fratura sem ataque. Ampliação 20x.	31
Figura 32: Corrosão intergranular na liga 7075-T6. Na qual os contornos de grãos foram atacados e separados. Ampliação 200x (ASM HANDBOOK).	32
Figura 33: Típica fratura dúctil da liga 7075-T6. Mostrando os grãos deformados e empescoamento da fratura. Ampliação 200x (ASM HANDBOOK).	32
Figura 34: Típica fratura frágil da liga 7075-T6 devido ao superaquecimento causado por solução sólida se dissolvendo nos contornos de grão. Ampliação 200x (ASM HANDBOOK).	33
Figura 35: a) Foto da peça falhada; b) Ampliação da Foto 1a) mostrando o princípio de falha que ocorreu pela peça.	34
Figura 36: Imagem da nucleação da trinca: a) Imagem SE e b) Imagem BSE.....	35
Figura 37 – a) Imagem das marcas de praia e estrias de fadiga; b) Ampliação da Imagem 3a) demarcando as marcas de praia e estrias de fadiga.	36
Figura 38 - Imagem do meio da peça mostrando dimples e vazios: a) Imagem SE, b) Aproximação da imagem SE e c) Imagem BSE.....	38
Figura 39 - Imagem da fratura interdendrítica: a) Imagem com menos aproximação e b) Imagem mais aproximada.	39
Figura 40 - Imagem de uma inclusão: a) Imagem SE e b) Imagem BSE.	40
Figura 41: Imagem demarcando os pontos e áreas analisados por EDX.	41
Figura 42: Imagem do final da fratura.	43

Figura 45: Análise macroscópica da fratura do CP 1.	48
Figura 46: Análise macroscópica da fratura do CP 2.	48
Figura 47: Análise microscópica da fratura.	49
Figura 48: Análise microscópica da fratura.	50
Figura 49: Análise microscópica da fratura.	51
Figura 50: Análise microscópica da fratura.	52
Figura 51: Análise microscópica da fratura.	53
Figura 52: Análise microscópica da fratura.	54
Figura 53: Análise microscópica da fratura.	55
Figura 54: Superfície de fratura após o ensaio de impacto Charpy.	56
Figura 55: Fratura intergranular do corpo-de-prova Charpy após o ensaio. è possível observar as facetas dos grãos.	57
Figura 56: Precipitados e pequena fração de fratura dúctil (alvéolos) na superfície analisada. ...	58
Figura 57: Distribuição de precipitados (fases mais claras) por toda superfície de fratura analisada.	59
Figura 58: Precipitados de diferentes composições.	60
Figura 59: - Mapeamento químico. a) Visão geral da região mapeada. b) Alumínio, elemento que compõe a matriz. c) Zinco, elemento que em conjunto com o alumínio compõe a matriz. d) Cobre, componente de um dos tipos de precipitado (mais claros). e) Ferro, elemento.....	62
Figura 60: Região com fratura interdendrítica.....	62
Figura 61- Corpos de Provas Fraturados	63
Figura 62- Corpo de Prova 1 após o primeiro ensaio.	64
Figura 63 - Corpo de Prova 2 após a realização do ensaio.	64
Figura 64- Gráfico do Carregamento pela Deflexão do primeiro corpo de prova.....	65
Figura 65 – Gráfico do Carregamento pela Tenacidade a Fratura do Plano do primeiro corpo de prova.	65
Figura 66- Gráfico do Carregamento pela Deflexão do segundo corpo de prova.	66
Figura 67 - Gráfico do Carregamento pela Tenacidade a Fratura do Plano do segundo corpo de prova.	66
Figura 68 – Corpo de prova embutido com três peças distintas.	68

1. Objetivo

O objetivo deste trabalho foi o de investigar as possíveis causas da falha do componente denominado de flange de roda que fraturou durante operação.

2. Descrição do Problema e Informações Fornecidas

A peça, mostrada na figura 1, consiste na flange de roda traseira do veículo E12, desenvolvido em 2014 pela equipe extracurricular de Formula da Escola. A peça possui a função de suportar os esforços mecânicos transmitidos entre a roda e o cubo de roda.

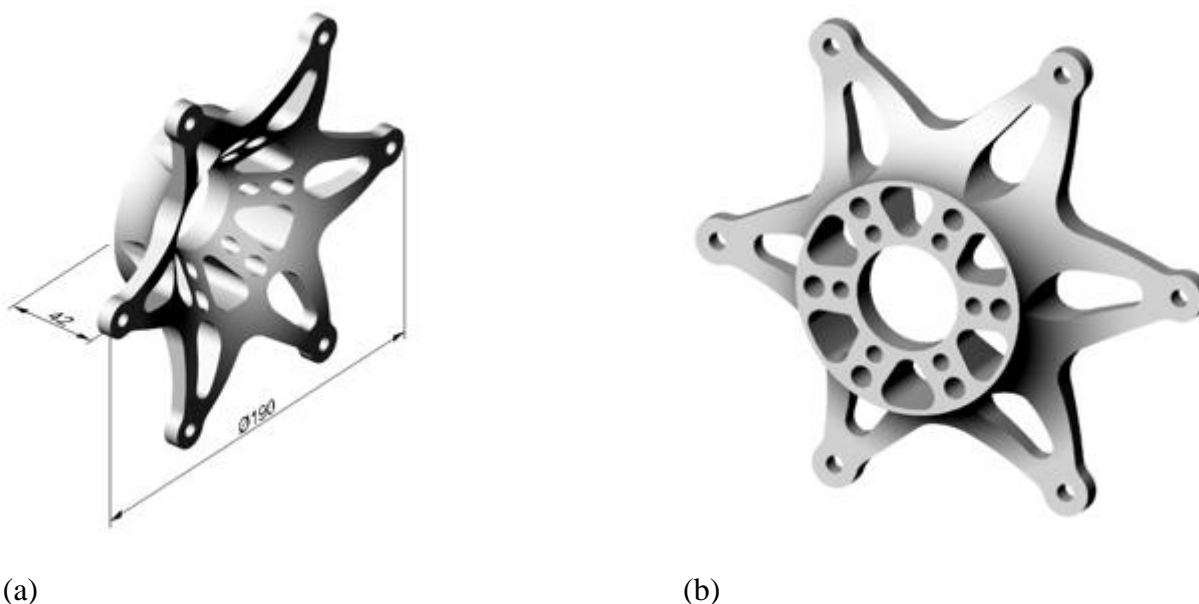


Figura 1: Flange traseira com dimensões gerais: (a) face externa, (b) face oposta.

A montagem do conjunto da qual a peça faz parte pode ser observada na figura 2, em que (a) é uma vista isométrica da face externa, (b) é uma vista isométrica da face oposta e (c) é uma vista em corte com identificação das peças. O funcionamento do conjunto, no veículo, pode ser observado no vídeo. A flange é fixada à roda através de seis parafusos e porcas M6 apertados manualmente. A flange, guiada por pinos folgados, assenta na superfície do disco de freio e o conjunto ("sanduíche") é fixado por atrito ao cubo através do esforço axial de uma porca cônica M28x1,5mm apertada manualmente até um torque projetado de 500Nm. O cubo possui um estriado interno, no qual é acoplado o eixo de transmissão do torque, e é apoiado à manga através

de 2 rolamentos cônicos, os quais permitem a rotação do conjunto da roda. O eixo de transmissão possui uma rosca em sua extremidade, na qual é acoplada a porca cônica. A manga é estacionária, fixada por 3 parafusos.

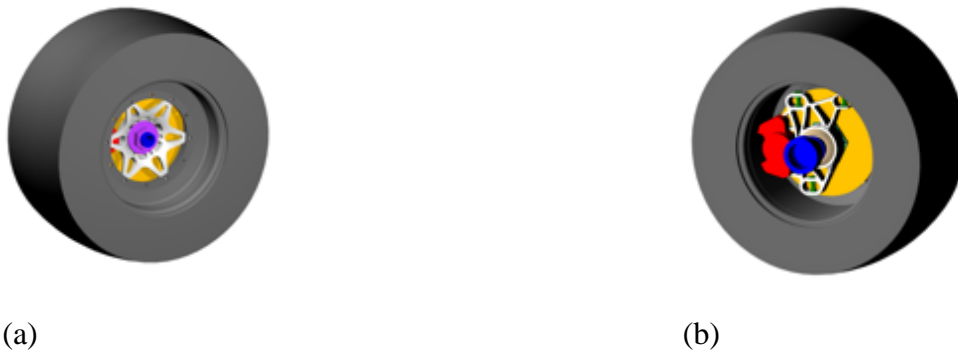


Figura 2: Montagem do conjunto: (a) vista isométrica da face externa, (b) vista isométrica da face oposta.

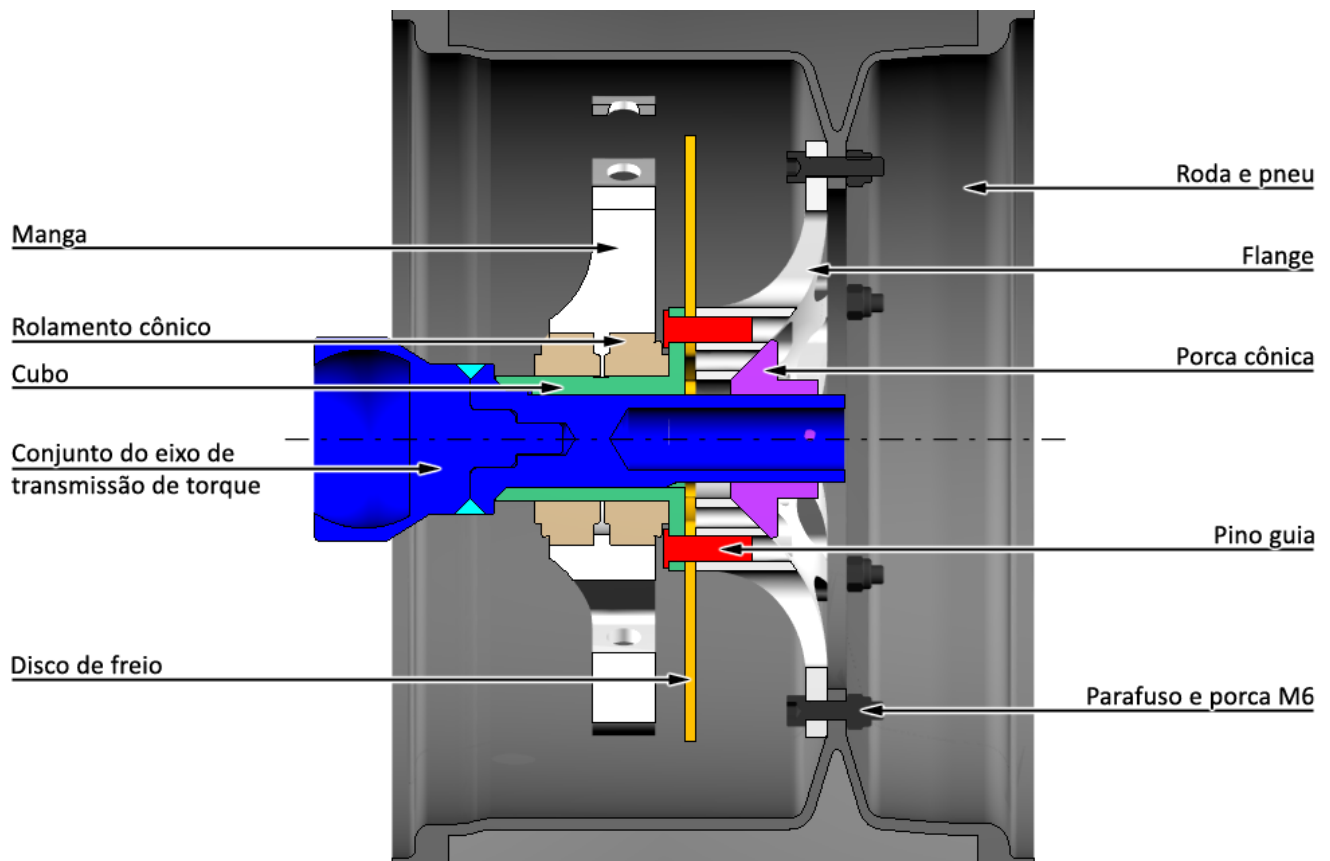


Figura 3: Montagem do conjunto: vista em corte.

Na figura 3, pode ser observado o carro com os conjuntos de roda montados e a peça que apresentou a falha em destaque (flange traseira da lateral direita). O veículo anda em pista com asfalto plano e limpo. Durante a translação do veículo ao longo da pista, podem ocorrer situações adversas como derrapagens e passagem sobre zebras, como é possível observar no vídeo. Nota-se, também, algum aquecimento na peça, devido ao calor gerado no disco de freio nos instantes de frenagem. Entre os testes, o conjunto roda-flange era circunstancialmente desmontado do carro. O lado da remontagem do conjunto no carro era aleatório, ou seja, a flange traseira que inicialmente estava do lado esquerdo poderia ser montada no lado direito e vice-versa. Os testes eram quase sempre realizados no mesmo sentido do circuito.



Figura 4: Conjunto da roda montado no carro.

2.1 – Propriedades Mecânicas dadas pelo fabricante

Tabela 1: Dureza do material utilizado.

Liga	Dureza Mínima (HB)
2011	90
6061	85
6063	65
6261	85
6262	90
6351	90
7075	120

Tabela 2: Propriedades mecânicas do material.

TEMPER	THICKNESS in. (mm)	TENSILE STRENGTH ksi (MPa)	YIELD STRENGTH ksi (MPa)	ELONGATION %
0 Sheet & plate	0.015-2.00 (0.38-50.80)	40 (max) (276)	21 (max) (145)	9-10
T6 Sheet	0.008-0.249 (0.203-6.32)	74-78 (510-538)	63-69 (434-476)	5-8

3. Procedimento experimental

3.1 – Vida em fadiga (Afgrow)

Com a adição das forças no Ansys e utilizando os métodos dos elementos finitos, foram obtidas as tensões máximas e mínimas na região onde ocorreu a falha, obtendo-se a Tabela 3.

Tabela 3: Tensões máximas, mínimas e os ciclos por volta.

Trecho	Tensão máx (MPa)	Tensão min (MPa)	Ciclos
B, D, F	161,06	-203,84	19
C, E	56,98	-46,5	19
G	52,67	-46,28	14
H	225,81	-299,23	23
I	49,87	-44,11	29
J, L	186,14	-245,97	42
K	59,25	-57,71	28
M	58,71	-44,182	14
N, P, R, T, V	159,76	-191,78	33
O, Q, S, U	48,87	-47,41	33
W	65,89	-48,13	29
X	170,82	-211,08	20
Y	56,46	-41,56	14
Z	71,27	-96,17	26
2 ^a	116,34	-154,7	26
2B,2D	164,47	-239,25	23

2C,2K	39,28	-54,11	33
2E	36,535	-45,125	10
2F	40,029	-52,38	19
2G	30,67	-47,01	29
2H	73,39	-100,14	19
2I	135,57	-173,33	18
2J	234,87	-311,79	59
2L	174,07	-224,08	4
A	50,16	-48,13	14

Ao comparar a Tabela 3 com a Tabela 4 obtida no “Estudo de caso – 4. Análise tensões e Fadiga” observa-se que a Tabela 3 possui maior número de pontos, pois mesmo tensões relativamente baixas (como na reta) foram consideradas no estudo de fadiga. Também se obteve valores diferenciados para mesmo trecho, como por exemplo o trecho 2J da Tabela 4 e caso 1’ da Tabela 5.

Tabela 4: Médias e amplitudes de tensão de fadiga.

Caso	$\sigma_{\text{médio}}$ [MPa]	Amplitude de tensão [MPa]
1'	-35,5	240
2	-29,4	217
3	-26,4	195
4	-23,4	173
5	-20,3	150

Com as tensões e o número de giros completos da roda em cada trecho do percurso, calculou-se o espectro de tensão do Gráfico 1. Esse espectro de tensões foi adicionado no Afigrow.

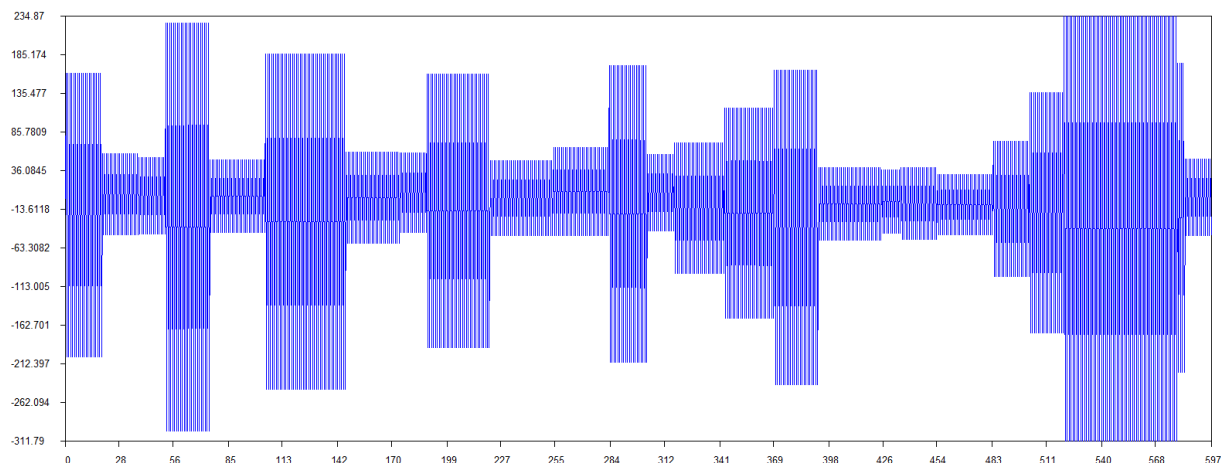


Gráfico 1: Espectro de tensões em uma volta na pista.

Adicionando as tensões e as características do material no programa, realizou-se os cálculos da vida em fadiga, obtendo assim os Gráfico 2 e Gráfico 3.

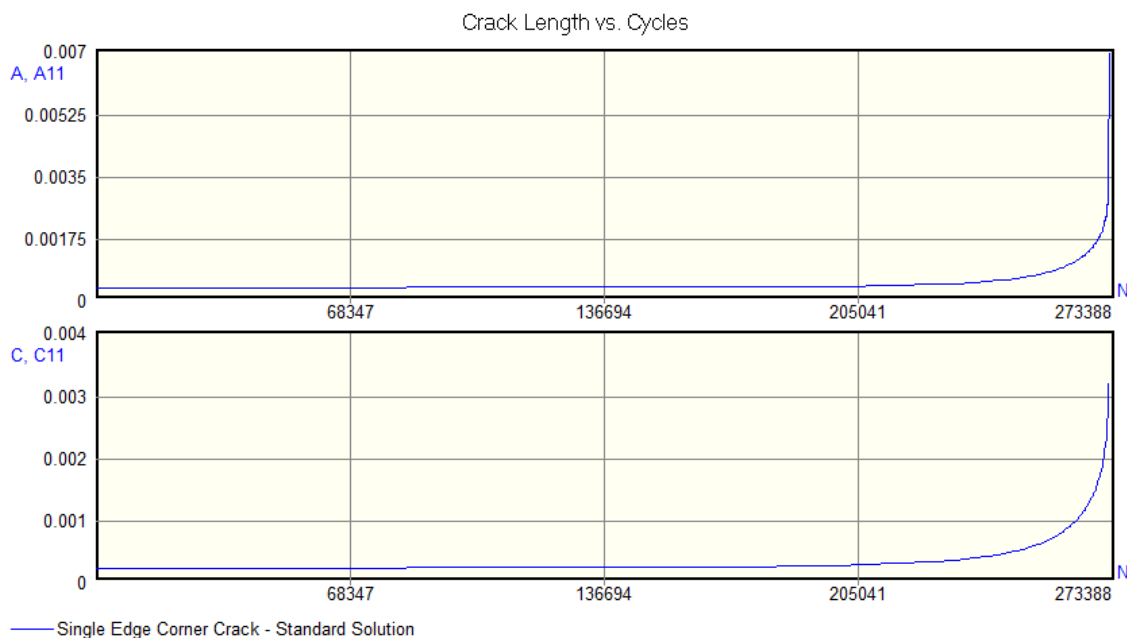


Gráfico 2: Comprimento da trinca versus Ciclos com tensões obtidos na Tabela 3.

No Gráfico 2 observa-se que foram necessários 273388 ciclos para o comprimento “A” da trinca chegar ao tamanho de 0,007m e o componente falhar, nesse mesmo ciclo o comprimento “C” da trinca cresceu menos chegando a 0,0032m. Como o espectro tem 597 ciclos, então foram necessários 458 espectros para o componente falhar.

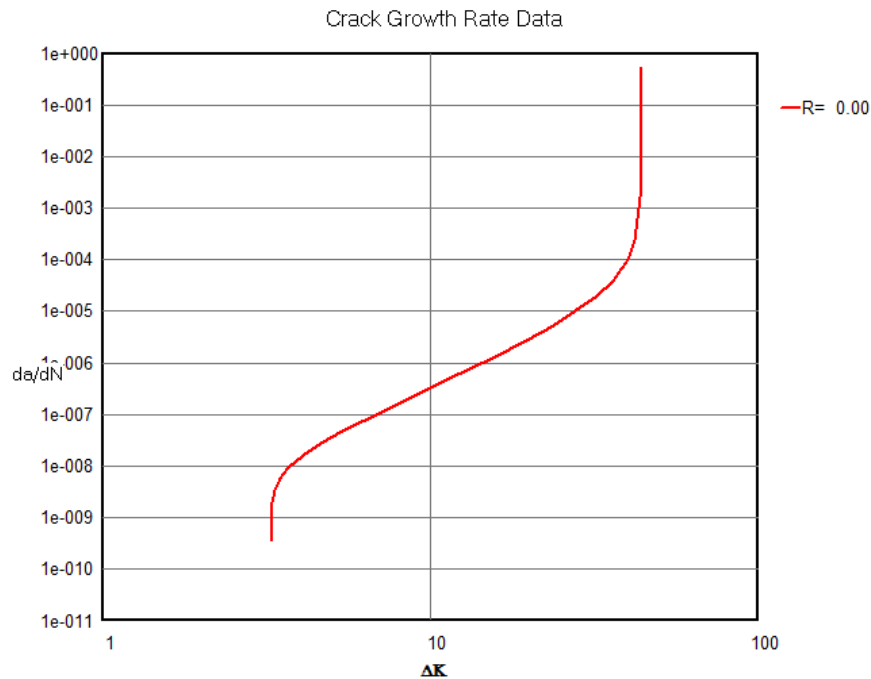


Gráfico 3: Taxa de crescimento da trinca.

A partir do Gráfico 3, pode-se notar que em baixas velocidades de crescimento da trinca assim como na parte superior do gráfico (alta velocidade de crescimento da trinca), a curva é praticamente vertical, representando um crescimento inicial e final da trinca extremamente rápido, indicando uma ínfima zona plástica de fratura. Uma breve análise visual da fratura corrobora com este fenômeno, validando o gráfico. Na região intermediária, a curva segue a equação de Paris.

Foi calculado que a vida do componente durou 458 voltas do percurso, contra 1318 que foi obtida do “Estudo de caso – 4. Análise de tensões e Fadiga”. Além das diferenças entre os dados considerados, como as forças e os trechos observados, é importante salientar a diferença entre as equações consideradas para o crescimento da trinca. Por isso, realizou-se ensaios no Afgrow utilizando os dados de tensões considerados no “Estudo de caso – 4. Análise de tensões e Fadiga”, e foi utilizado as equações NASGRO com a mesmas condições de contorno utilizado na metodologia, exceto a trinca inicial, aumentando os comprimentos A e C para 78,7 μm , e mesmo com este aumento, a trinca inicial apresentou uma vida maior de 635 voltas, devido as cargas e tensões desconsideradas.

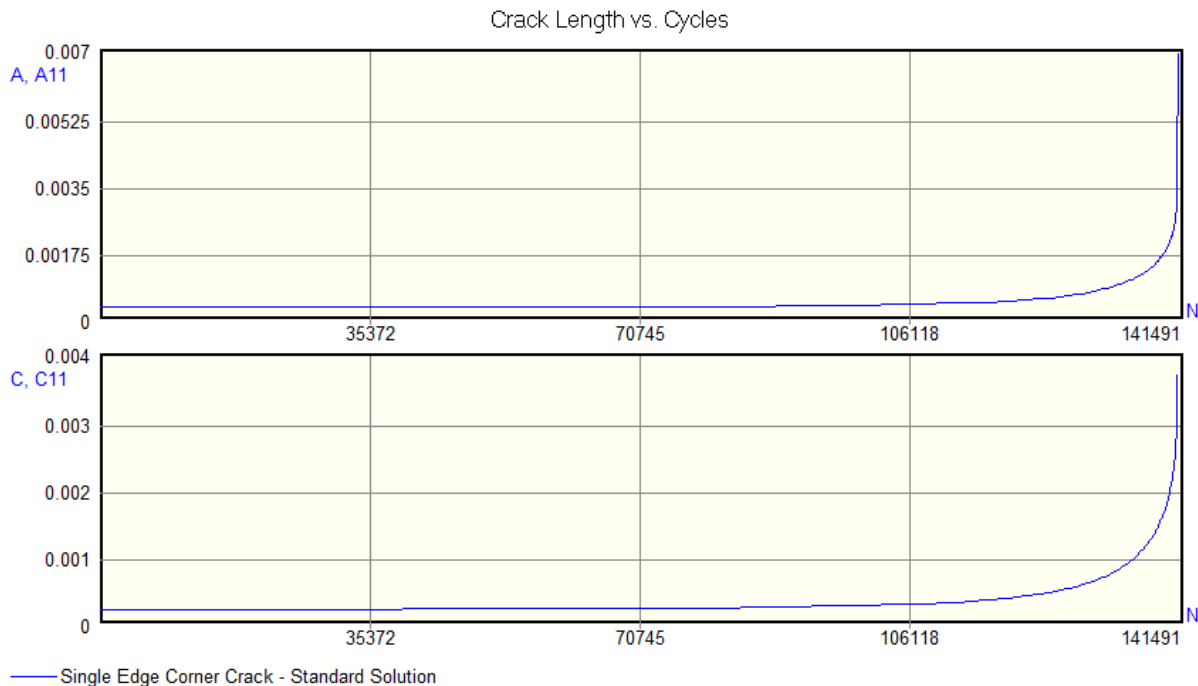


Gráfico 4: Comprimento da trinca versus Ciclos com tensões obtidas no “Estudo de caso - 4. Análise tensões e Fadiga”.

Conforme o Gráfico 4 que foi obtido a partir do espectro de tensões extraídas do “Estudo de caso - 4. Análise tensões e Fadiga” pode-se observar que foram necessários 141491 ciclos para falhar, e como o espectro possui apenas 223 ciclos/volta, então são necessárias 635 voltas para o componente falhar.

Com isso pode-se observar a diferença entre resultados obtidos mudando apenas a equação de cálculo de vida, de 1318 para 635 voltas.

3.2 – Análise Macrográfica

As superfícies de fatura de praticamente todos os dentes da peça apresentam aspecto semelhante: irregular e, apesar de semelhantes à fratura através de dimples, exibem aparência polida e lustrosa com baixo grau de deformação, caracterizando uma fratura frágil.

Por se tratar de uma peça fundida, é provável que a fratura tenha sido interdendrítica e predominantemente frágil, a julgar pela aparência da superfície. Outro fator a ser considerado é a temperatura de trabalho, pois peças fundidas podem sofrer fragilização por segregação quando submetidas a altas temperaturas e, além disso, o próprio processo de fundição pode gerar microvazios no interior do componente.

As figuras 5 e 6 mostram a aparência da fratura em fotografia e as figuras 7 e 8, as estereoscopias.

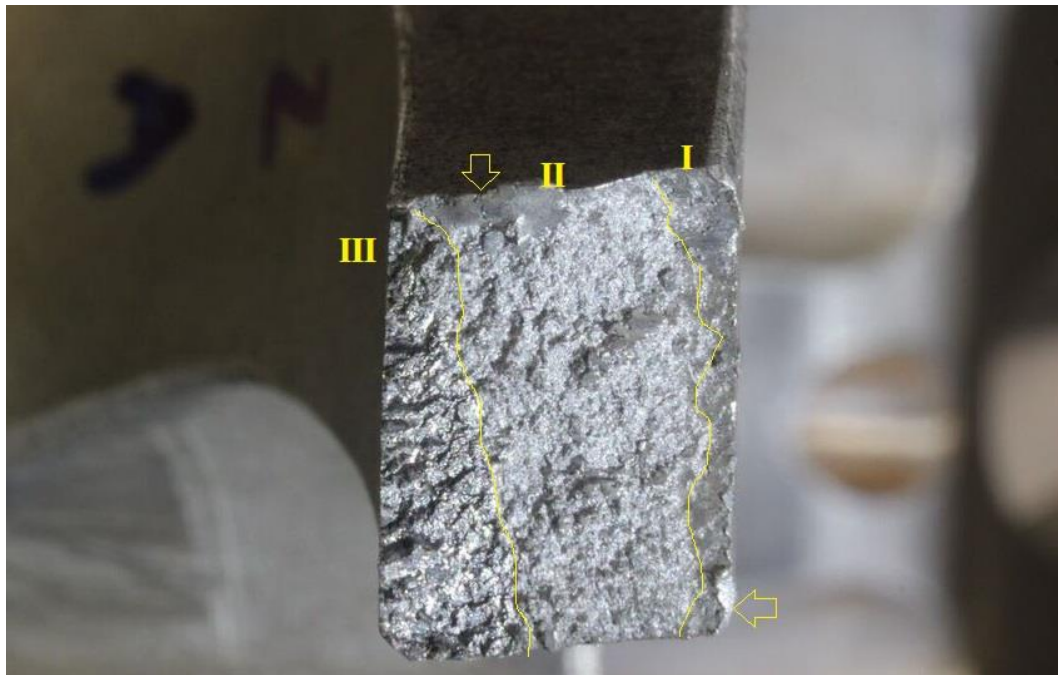


Figura 5: Fotografia do dente 2-A.

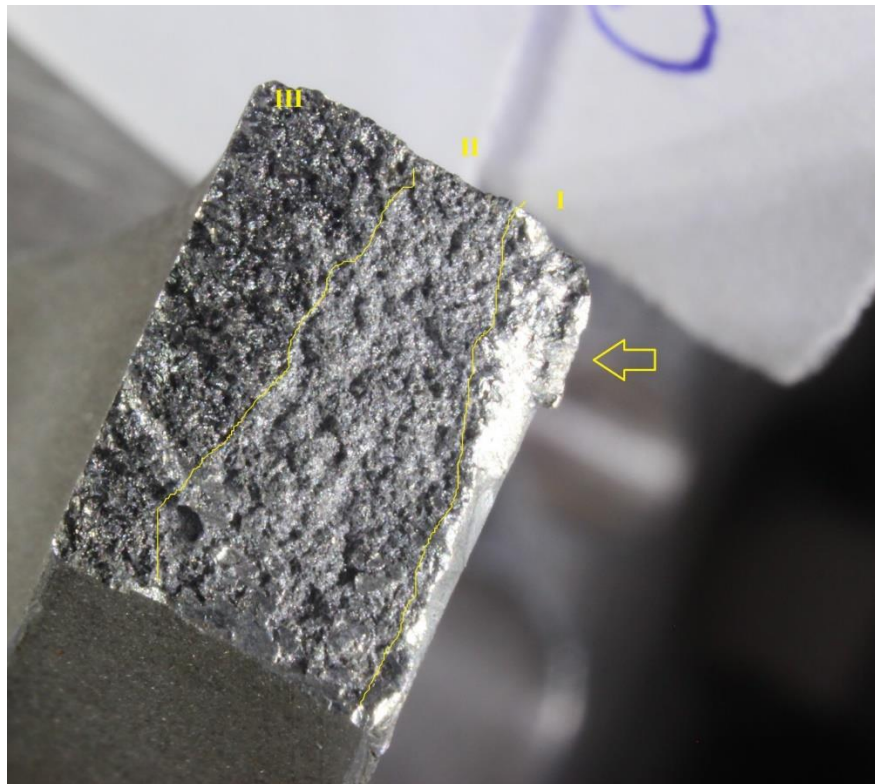


Figura 6: Fotografia do dente 4-B.

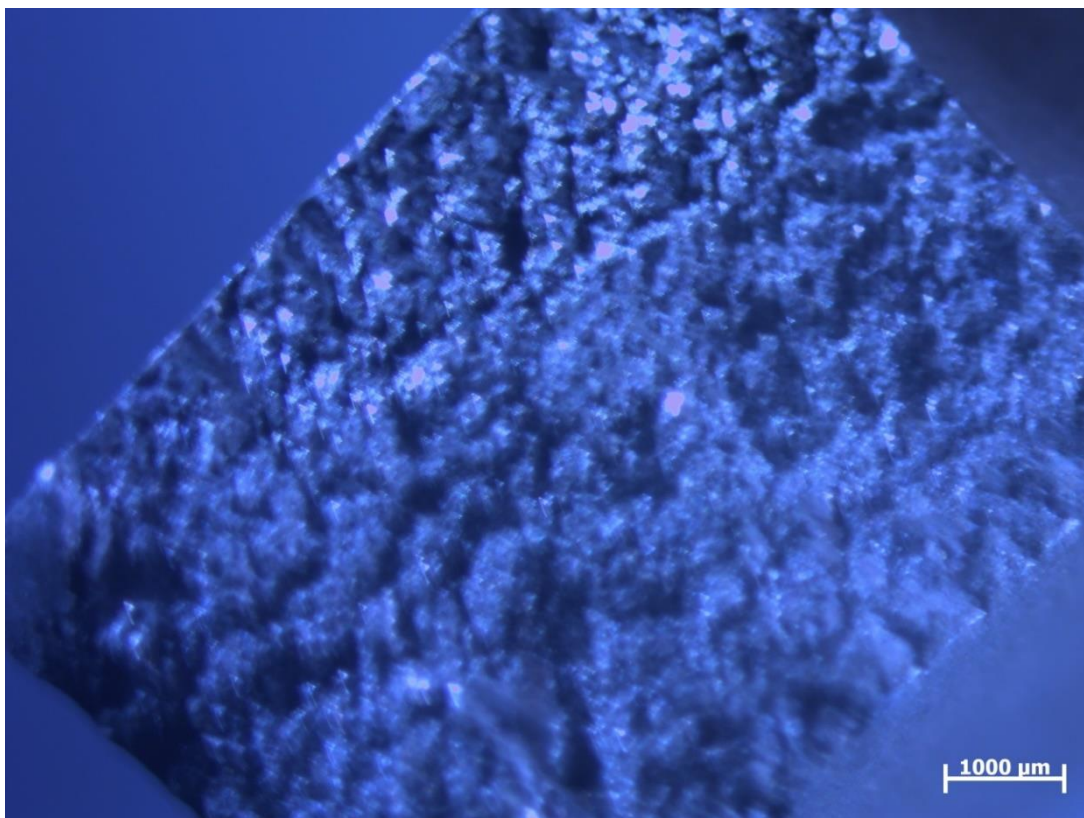


Figura 7: Estereoscopia do dente 2-A.

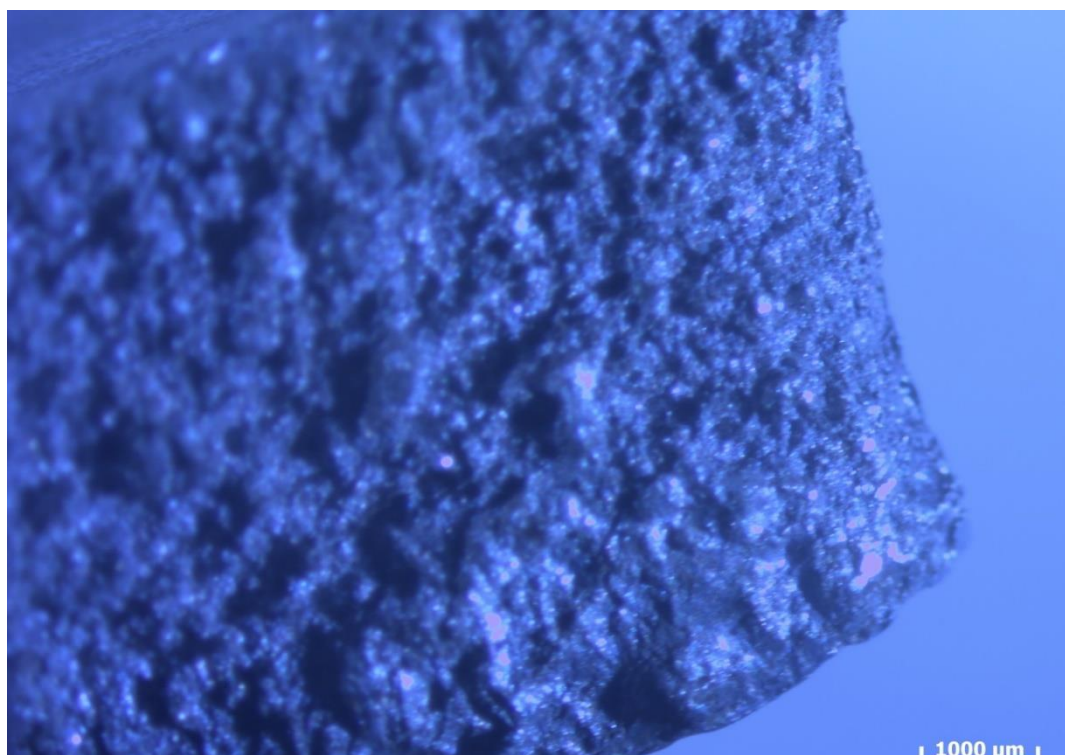


Figura 8: Estereoscopia do dente 4-B.

Através das estereoscópias, pode-se ver com maior nitidez a superfície da fratura e seu aspecto muito irregular, lembrando o formato de dendritas.

São perceptíveis três regiões distintas na superfície fotografada, a região I é totalmente opaca e apresenta pequenas porções de material deformado, indicadas pelas setas; a região III é totalmente irregular e mais espelhada que as demais, onde a peça fratura de maneira frágil; a região II apresenta características intermediárias com uma pequena área deformada. Observando a direção da fratura e das deformações, é provável que a falha tenha se originado na região III e propagado em direção à região I, sendo este o mesmo sentido dos esforços.

Pelo perfil da peça, deduz-se que esta trabalhava sob esforços de torção, tornando a falha por sobrecarga de tensão cisalhante uma possibilidade plausível.

Todos os dentes da peça fraturaram, mas para detectar a origem da falha, é necessário saber qual deles fraturou primeiro. Nota-se que o dente 5, em particular, possui aspecto diferenciado, como mostram as figuras abaixo, mais espelhado e regular, o que caracteriza uma falha frágil e catastrófica. A fratura do primeiro dente ocasionou a sobrecarga dos restantes, levando a falha de toda a peça.

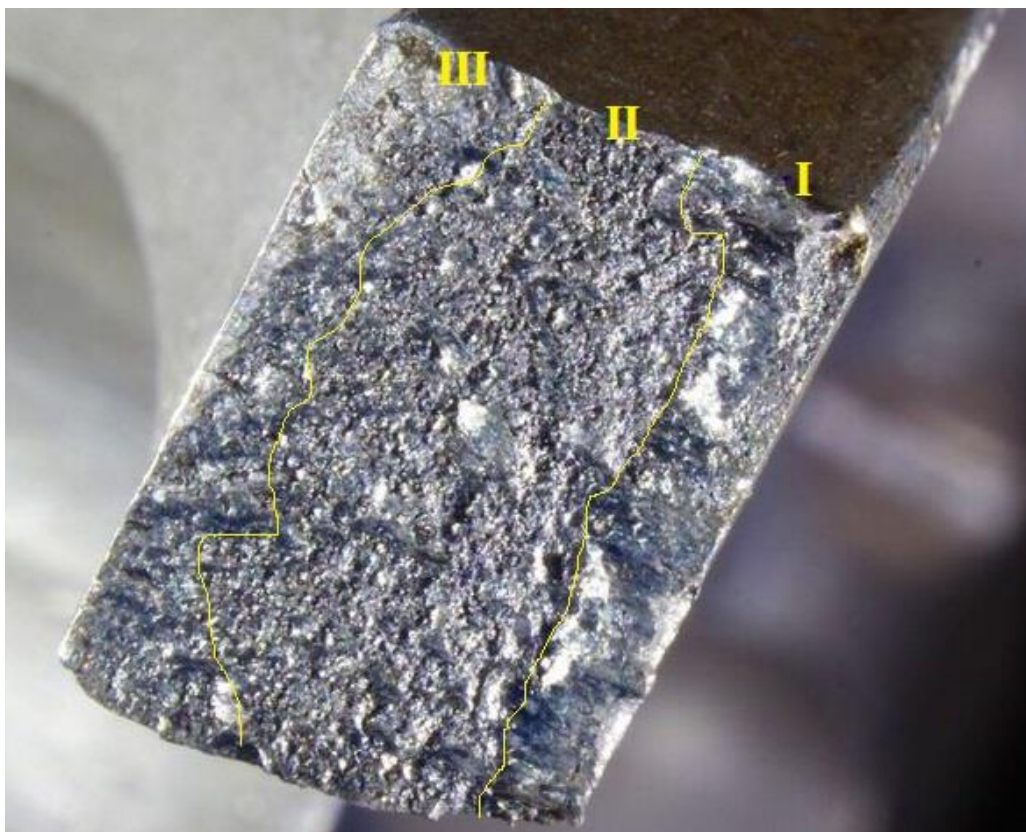


Figura 9: Fotografia do dente 5-A.

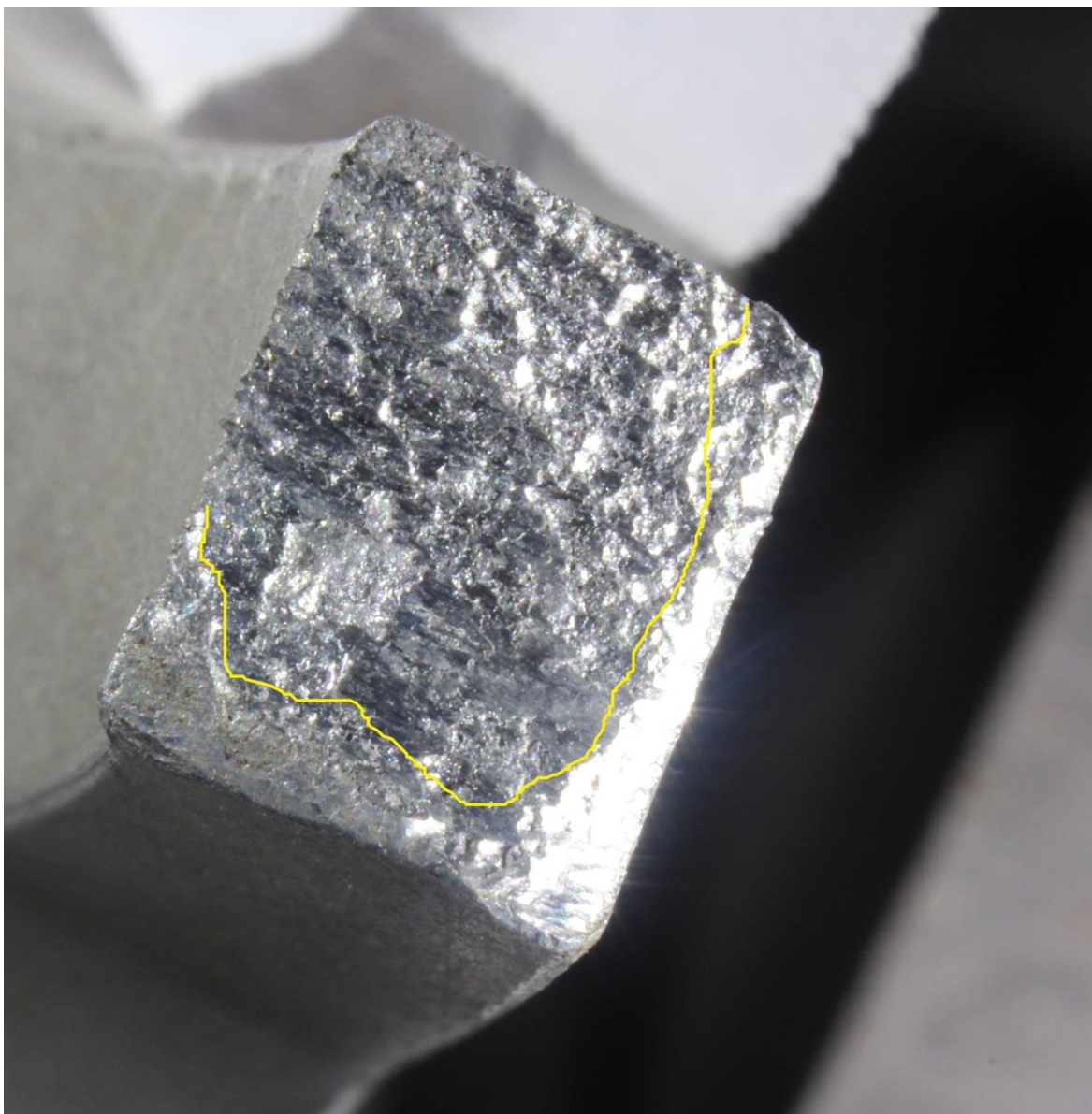


Figura 10: Fotografia do dente 5-B.

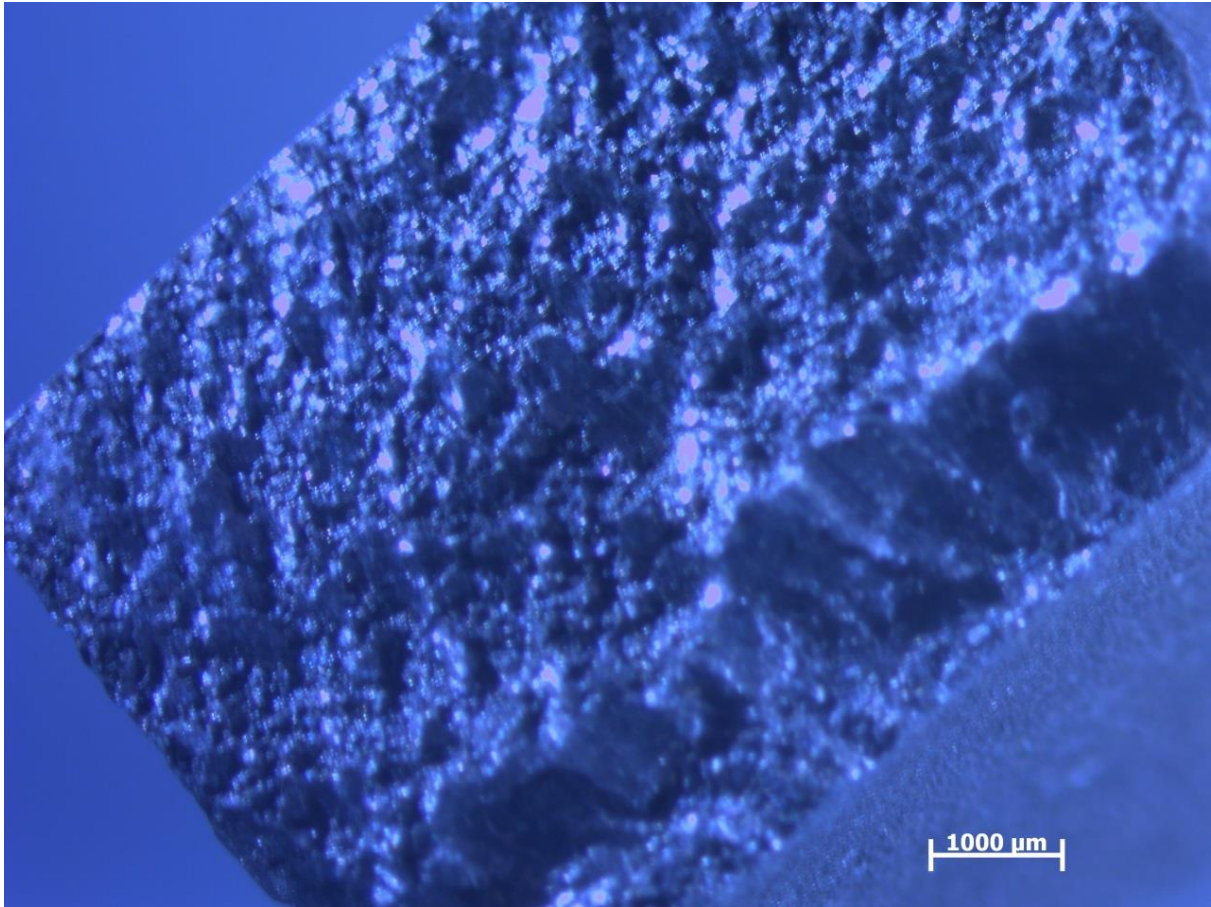


Figura 11: Estereoscopia do dente 5-A.

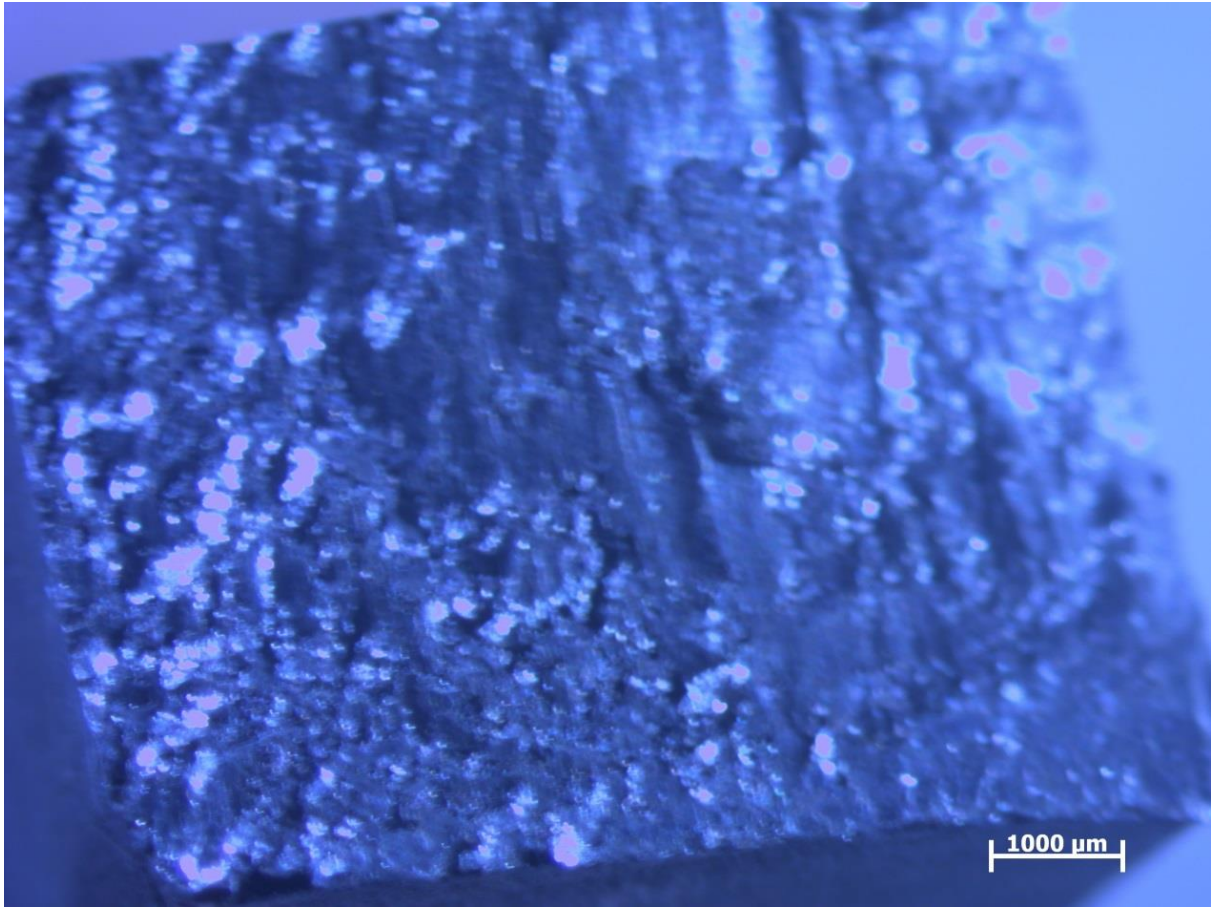


Figura 12: Estereoscopia do dente 5-B.

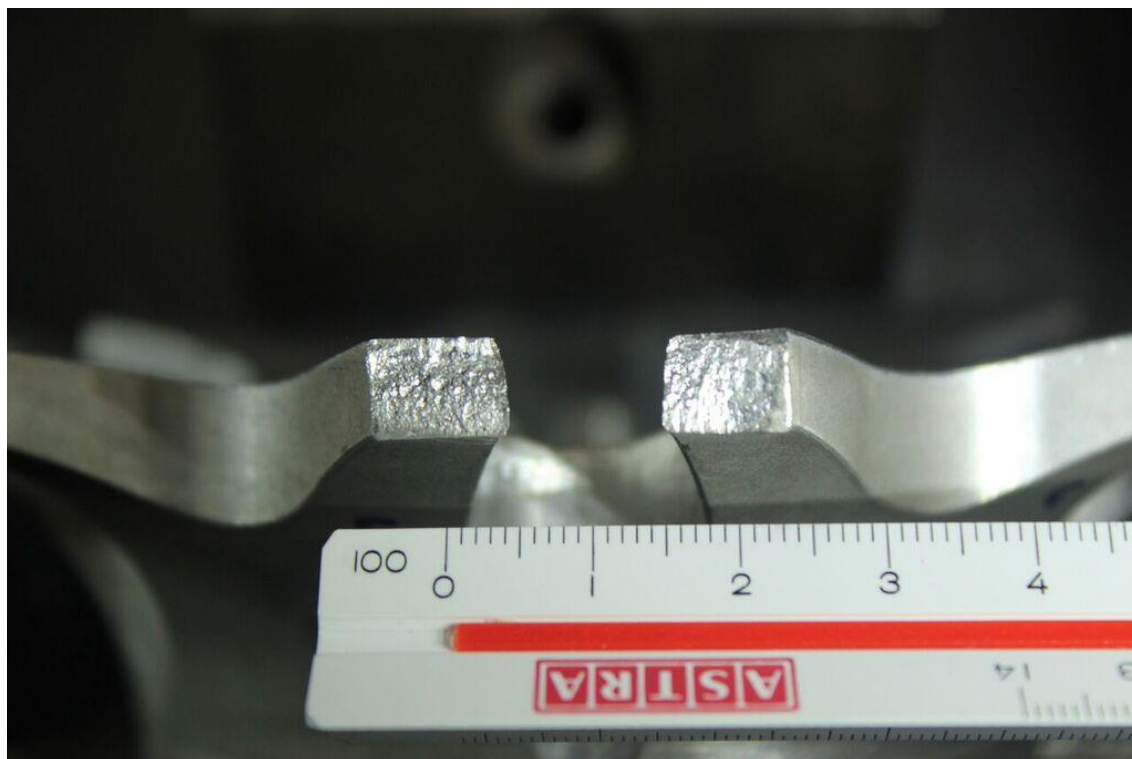


Figura 13: Fotografia do dente 5.

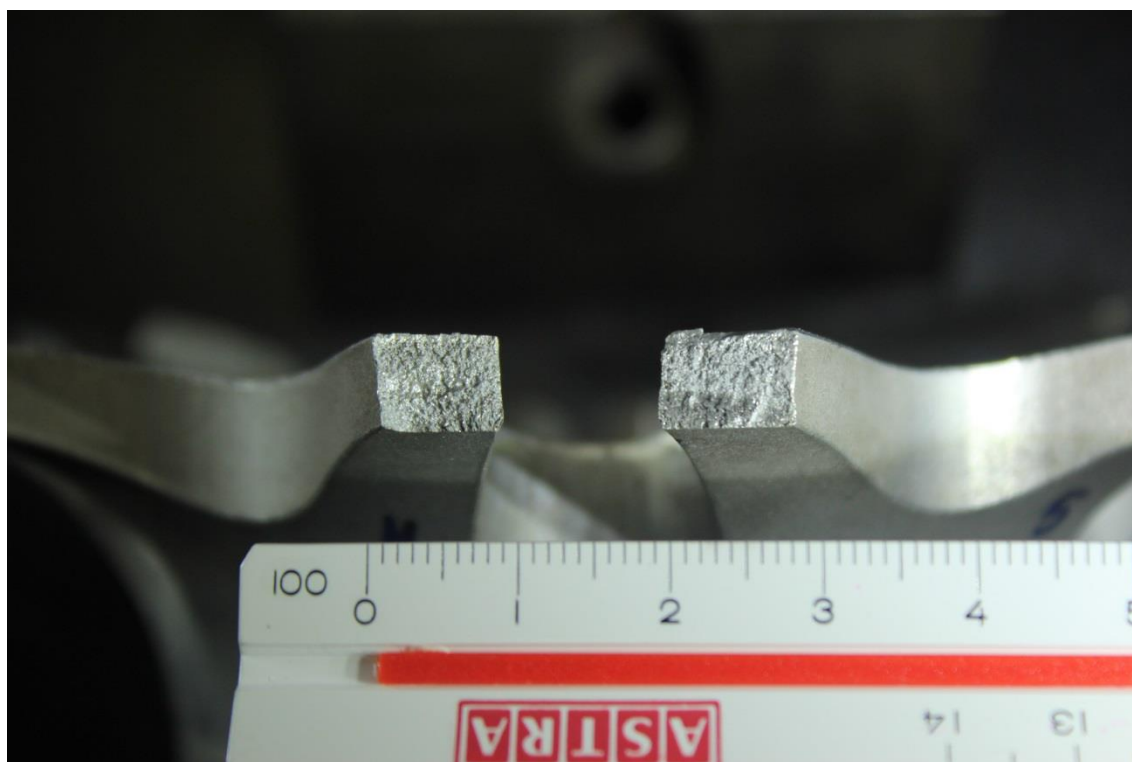


Figura 14: Fotografia do dente 6 para efeitos de comparação.

Ao comparar o dente 5 com o restante, fica evidente que sua superfície é mais lisa e brilhante, o que indica que a falha provavelmente teve origem no mesmo, mais precisamente no dente 5-B, no qual é difícil distinguir as diferentes regiões de fratura, apenas uma região mais polida e outra com certa rugosidade, enquanto os outros dentes exibem aspecto altamente irregular. É possível, então, que a fratura interdendrítica tenha ocorrido, mas a segregação não foi a causa que originou a falha.

3.3 – Análise Micrográfica

Foram obtidas imagens antes e posteriormente ao ataque. As imagens 15, 16 e 17 representam as imagens tiradas antes do ataque da amostra sem fratura. Ao passo que as imagens 18, 19, 20 e 21 tratam-se das imagens obtidas do corpo de prova com fratura também sem ataque.

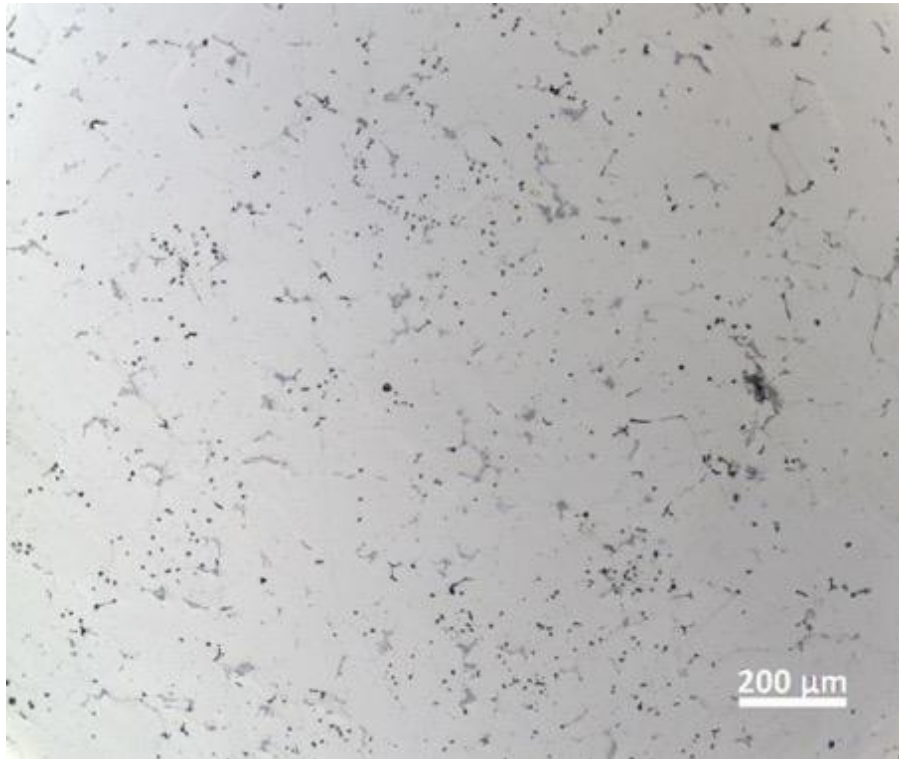


Figura 15: Imagem tirada da amostra sem fratura da região central da amostra sem ataque. Ampliação 10x. Destacam-se precipitados em toda extensão da amostra.

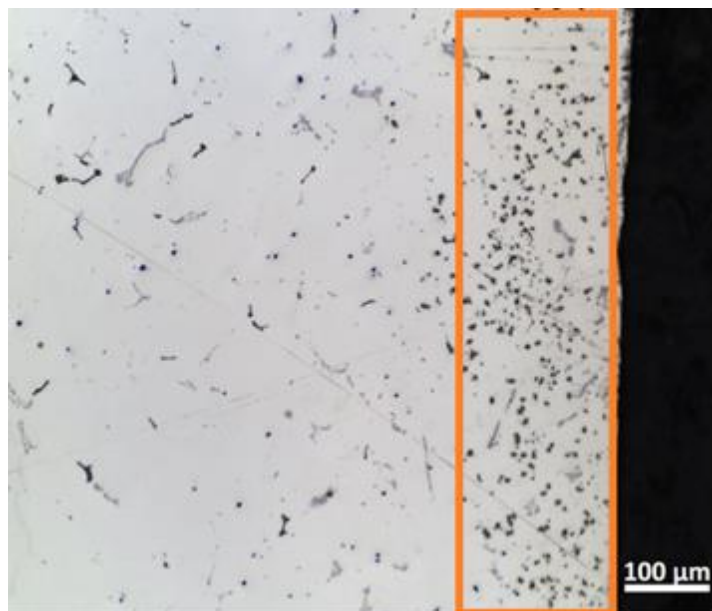


Figura 16: Imagem obtida da amostra sem fratura da região da extremidade da amostra sem ataque. Ampliação 20x. Em destaque, tem-se aglomerado de pontos mais escuros indicando precipitados.

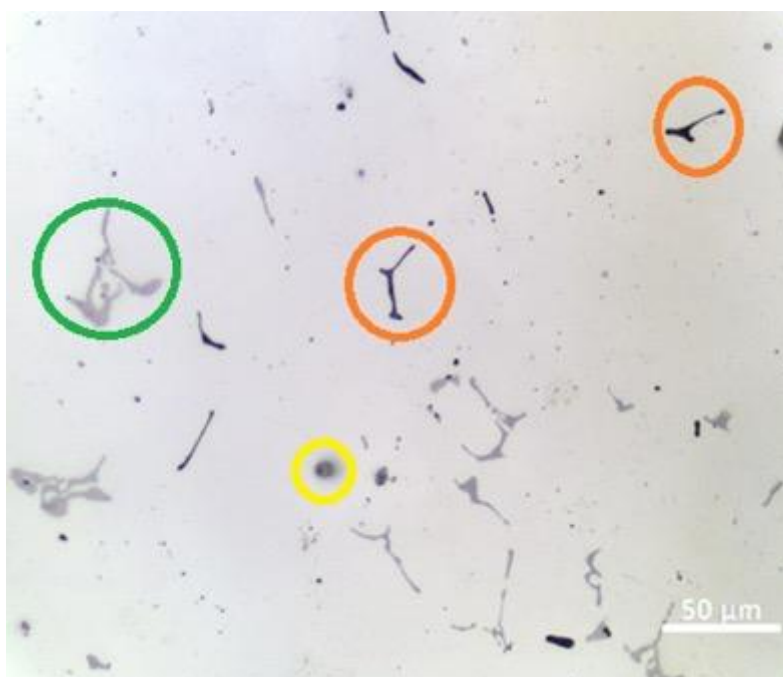


Figura 17: Imagem obtida da amostra sem fratura da região central da amostra sem ataque. Ampliação 50x. Em destaque, diferentes cores indicam diferentes precipitados.

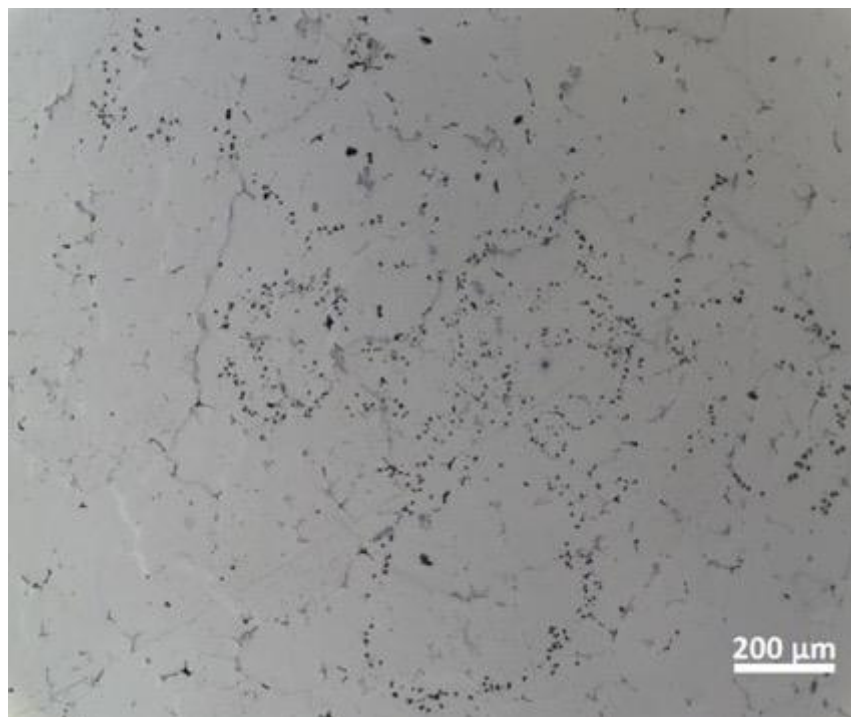


Figura 18: Imagem obtida da amostra com fratura da região central da amostra sem ataque. Ampliação 10x. Destacam-se precipitados em toda área.

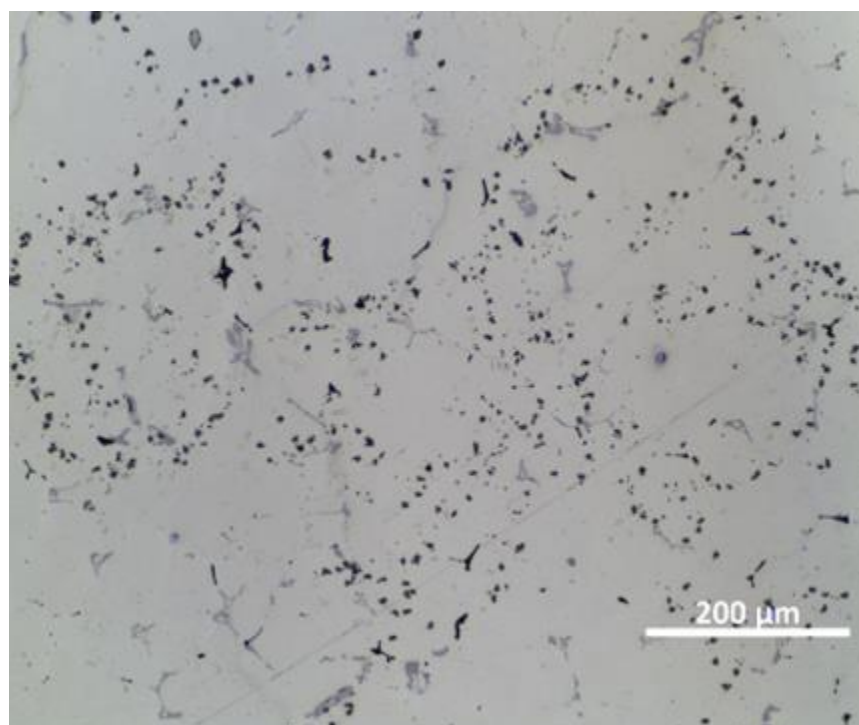


Figura 19: Imagem obtida da amostra com fratura da região central da amostra sem ataque. Ampliação 20x.

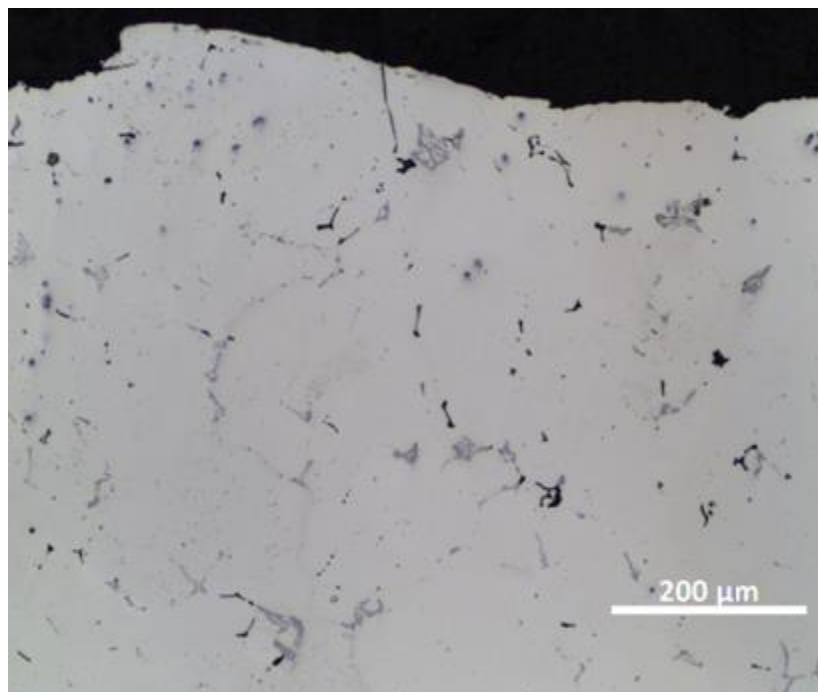


Figura 20: Imagem obtida próxima a fratura da amostra fraturada sem ataque. Ampliação 20x.

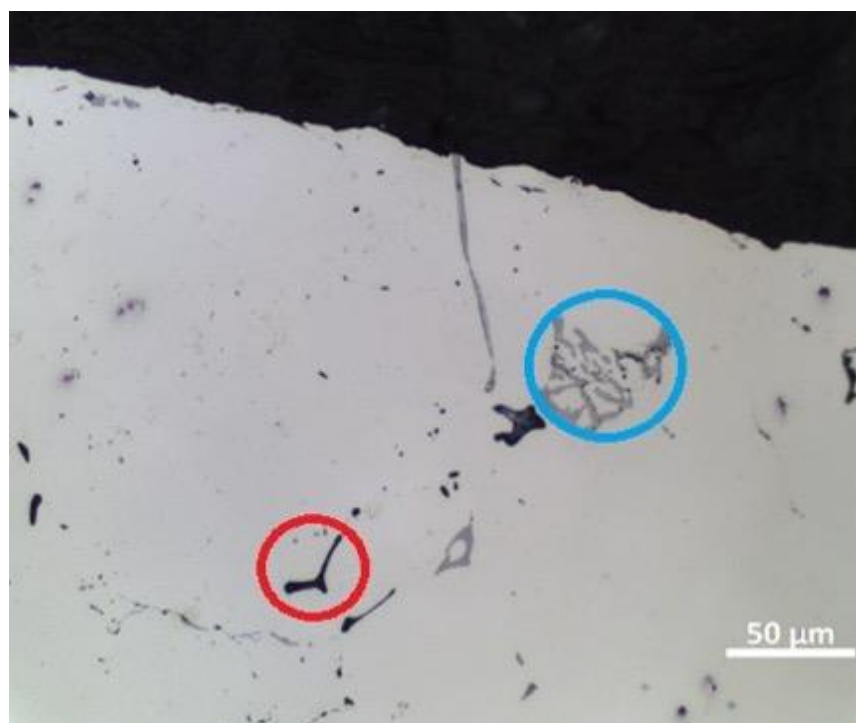


Figura 21: Imagem obtida da amostra com fratura da região próxima a fratura sem ataque com ampliação 50x. Em destaque, diferentes cores representam diferentes precipitados.

Notam-se precipitados de diferentes morfologias indicando diferentes estequiometrias. Em virtude de não ter sido realizado o ensaio de EDS não foi possível determinar a composição específica dos precipitados. Uma revisão da literatura de ligas da série 7XXX evidencia a formação de precipitados intermetálicos, tais como: MgZn_2 , Mg_2Si , $\text{Al}_{20}\text{Cu}_2\text{Mn}_3$, $\text{Al}_{12}\text{Mn}_3\text{Si}$, $\text{Al}_7\text{Cu}_2\text{Fe}$, Al_2Cu , Al_2CuMg , Al_3Fe , $\text{Al}_{12}\text{Mg}_2\text{Cr}$, $\text{Al}_{20}\text{Cu}_2\text{Mn}_3$, Al_6Mn , Al_3Ti , Al_6Zr , Mg_2Al_3 , $\text{Al}_{32}\text{Zn}_{49}$, e $\text{Mg}(\text{AlCu})$, porém, nem todas estas fases estão presentes para uma liga de composição e tratamento térmico definido. No caso da liga 7075, tem-se que os precipitados mais comuns encontrados tratam-se possivelmente do MgZn_2 e Al_2Cu .

Pelas imagens, observa-se ainda a presença de arranhões provenientes da preparação das amostras embutidas, bem como se notam pontos escurecidos destacado em amarelo na Figura 17, com formatos regulares arredondados, sendo indícios de precipitados secundários formados após a solidificação do material, presentes tanto na amostra sem fratura quanto com fratura.

As imagens 22, 23 e 24 apresentam as fotomicrografias obtidas da amostra sem fratura e com ataque. Ao passo que as imagens 25, 26, 27 e 28 apresentam as obtidas da amostra fraturada com ataque.

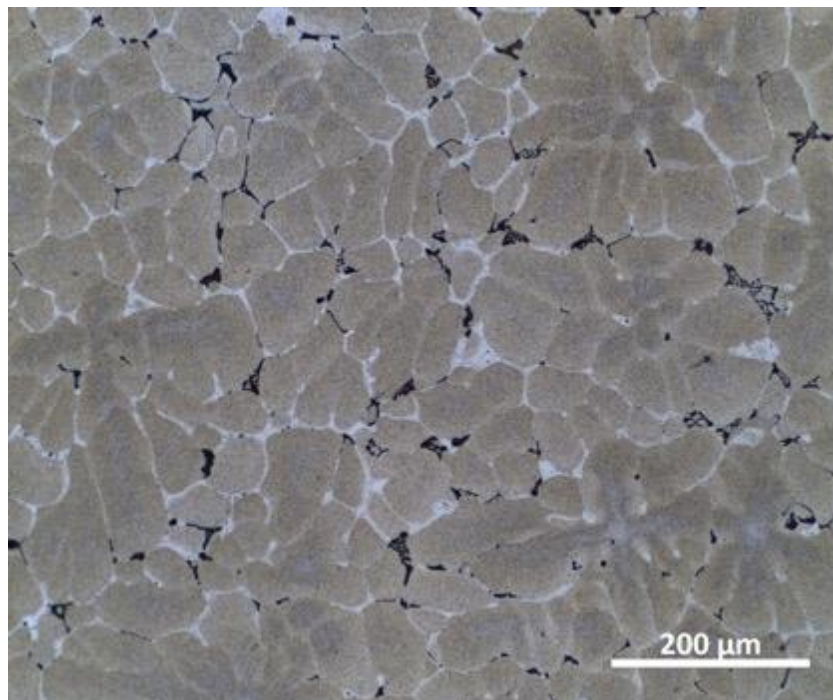


Figura 22: Imagem obtida da amostra com ataque da região central. Ampliação 20x.

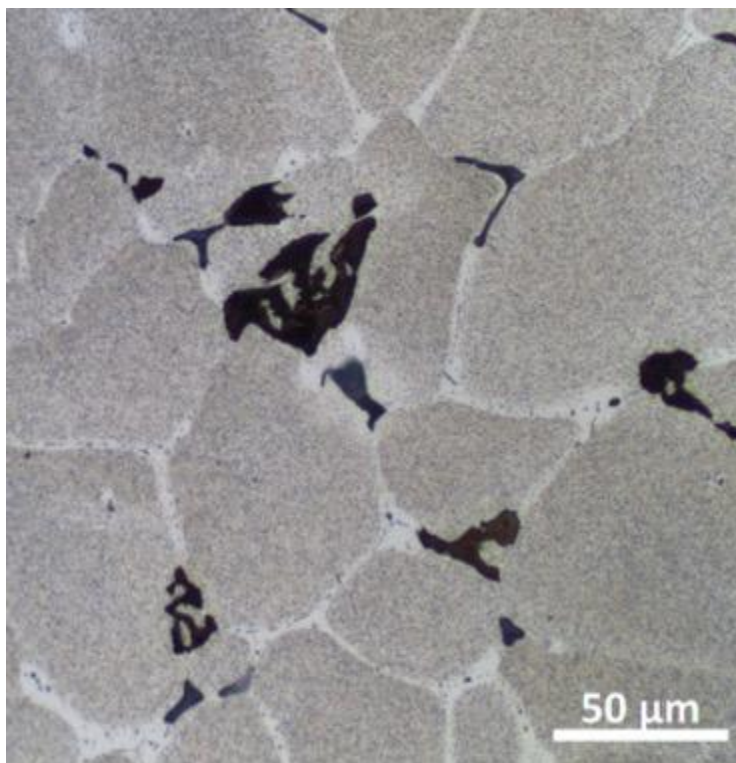


Figura 23: Imagem obtida da amostra com ataque da região central. Ampliação 50x.

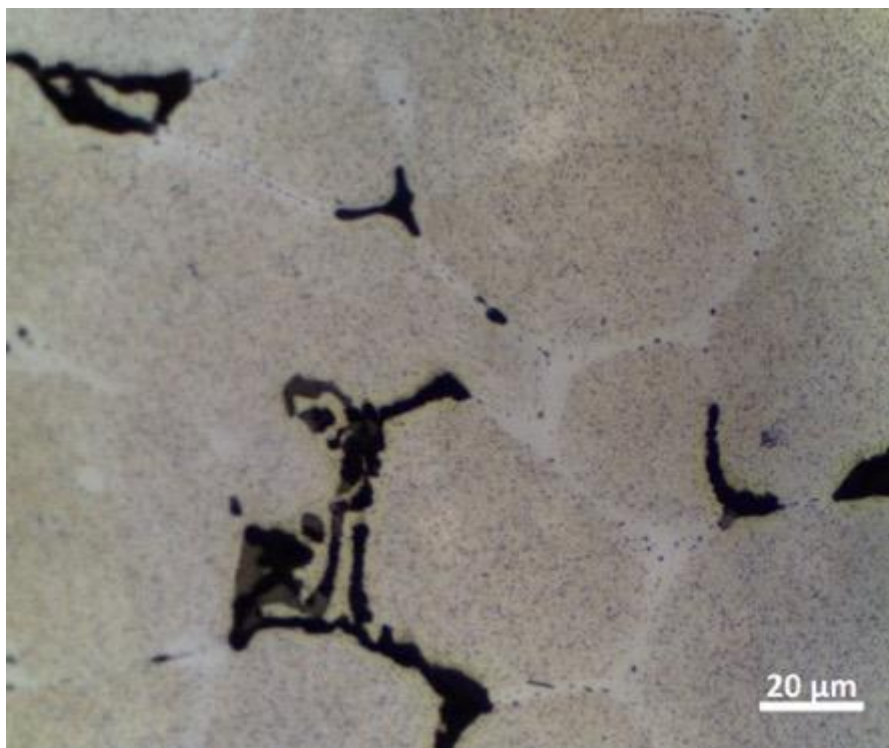


Figura 24: Imagem obtida da amostra com ataque da região central. Ampliação 100x.

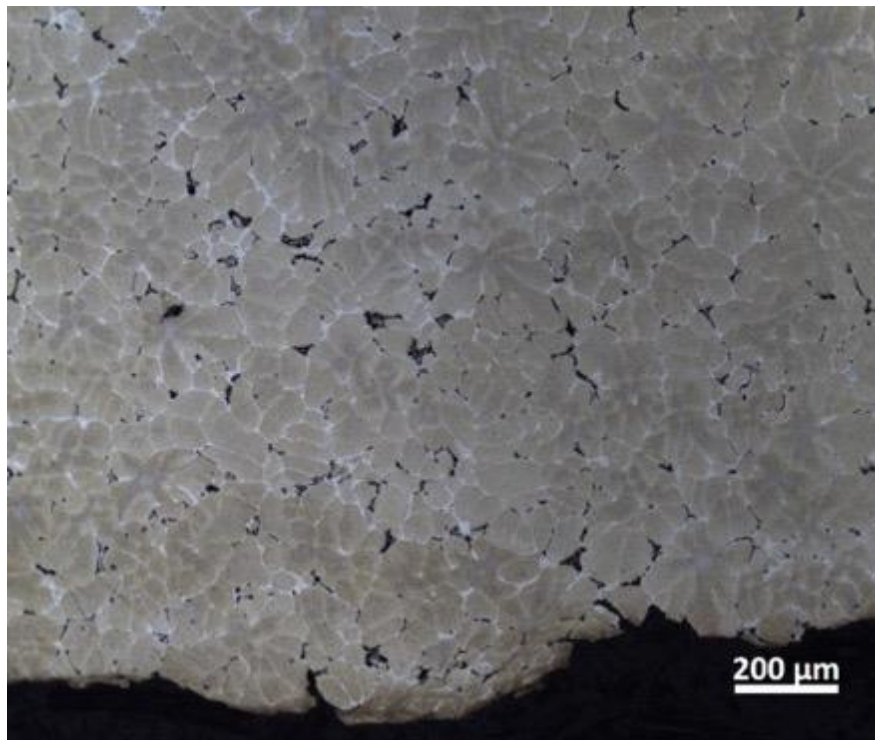


Figura 25: Imagem obtida da amostra fraturada próxima a região de fratura com ataque. Ampliação 10x.

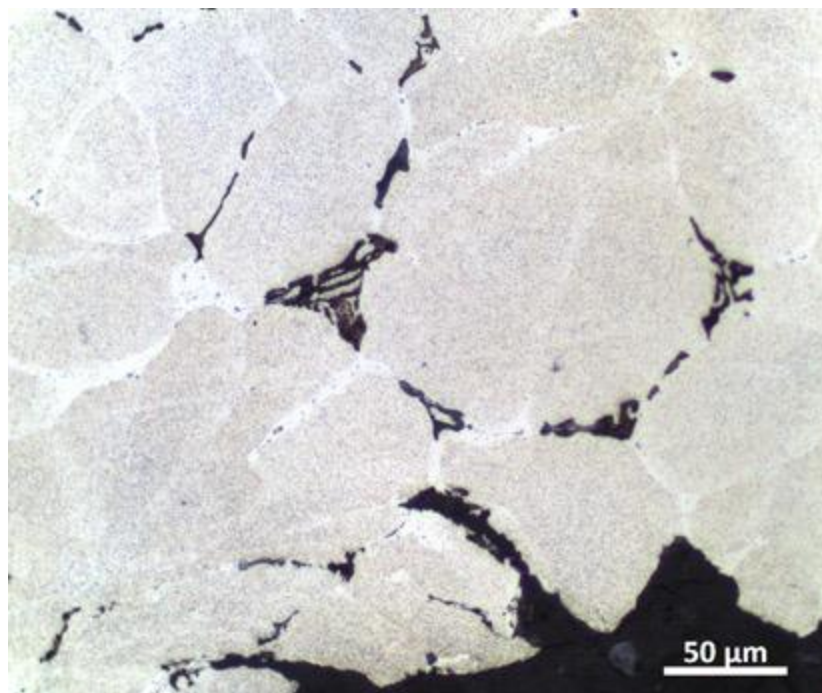


Figura 26: Imagem obtida da amostra fratura próxima a região de fratura com ataque. Ampliação 50x.

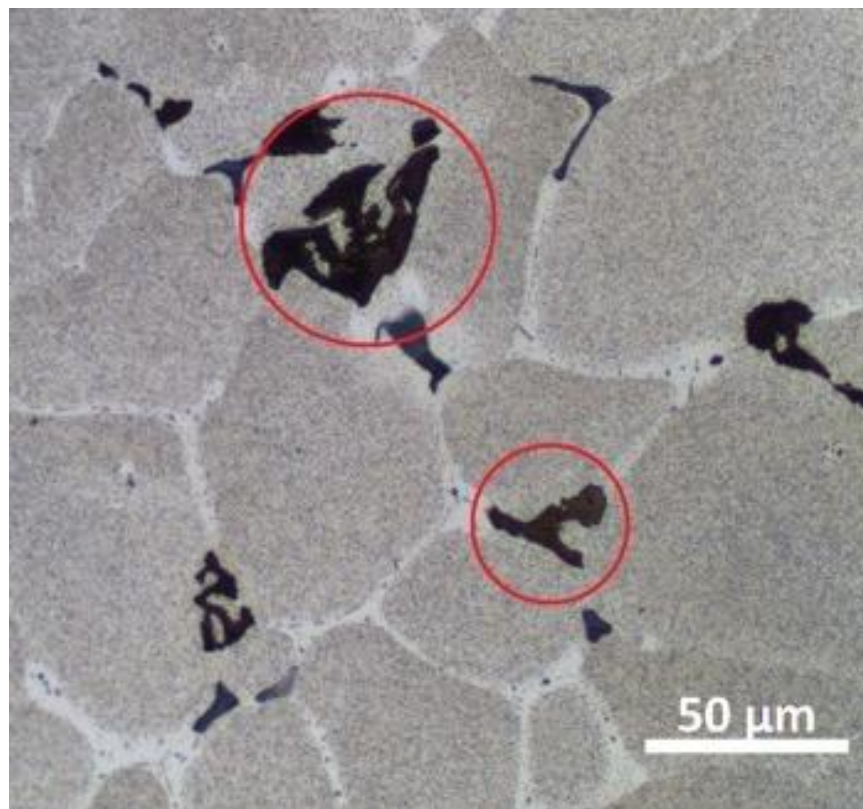


Figura 27: Imagem obtida da amostra fraturada da região central com ataque. Ampliação 50x.

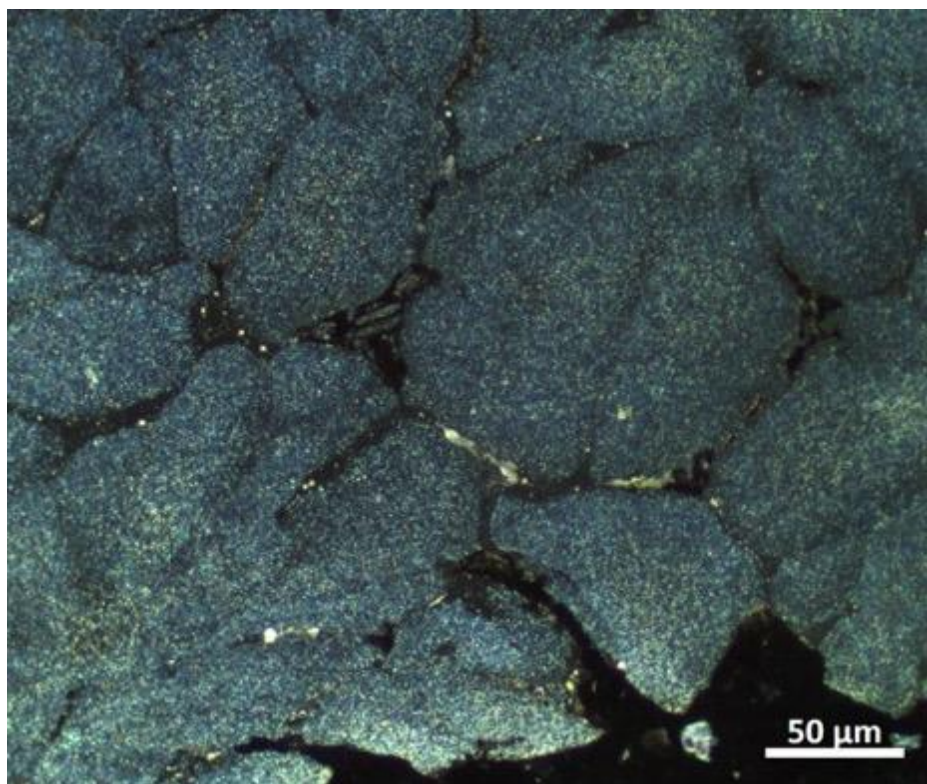


Figura 28: Imagem obtida com luz polarizada da amostra fraturada atacada na região central. Ampliação 50x.

Comparando-se ambas as amostras, nota-se que em ambos os casos os grãos do material não estavam em uma direção específica, indicando que o material não sofreu conformação em uma direção especificada tal como laminação. Novamente, os precipitados são observáveis, sendo estes presentes no contorno de grão e no interior dos mesmos, sendo, portanto, precipitados primários e secundários, respectivamente.

As imagens presentes na figura 29, 30 e 31 ilustram o contraste dos precipitados. As imagens foram utilizadas para fazer análises estatísticas para aferir a porcentagem de precipitados presentes. A análise foi realizada em todas as imagens das amostras fraturadas com e sem ataque e também com as imagens da amostra sem fratura para fim de comparação.



Figura 29: Imagem com contraste na amostra fraturada com ataque da região central. Ampliação 20x.

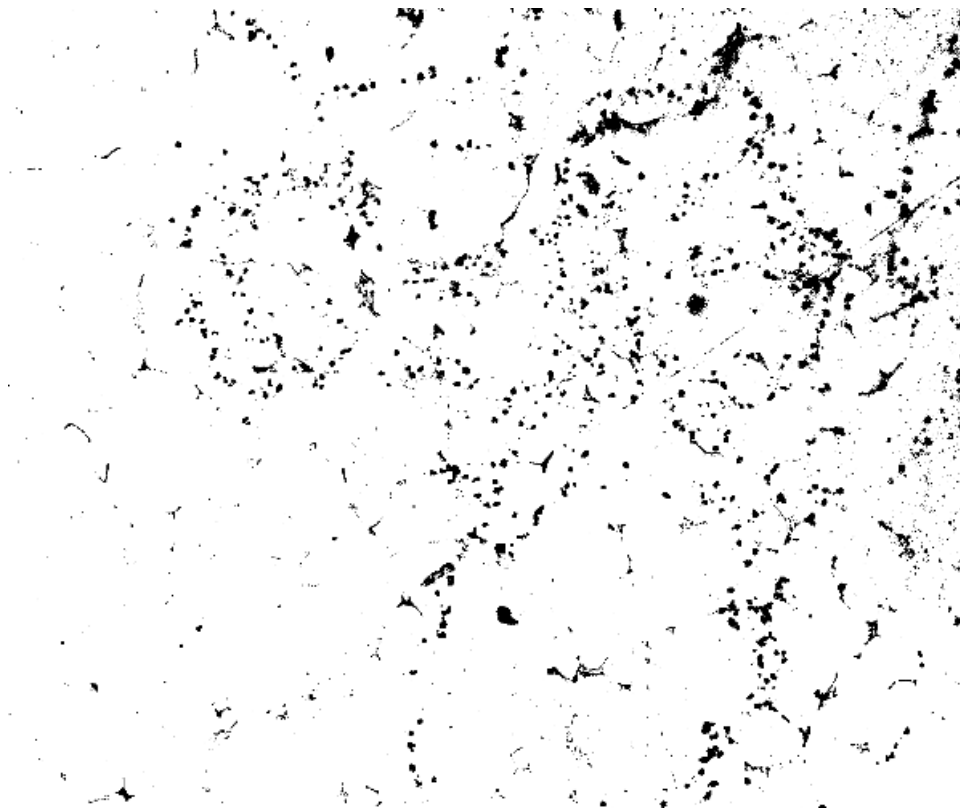


Figura 30: Imagem com contraste obtida na amostra fraturada sem ataque. Ampliação 10x.



Figura 31: Imagem obtida do corpo de prova sem fratura sem ataque. Ampliação 20x.

Comparando-se as porcentagens obtidas, tem-se que em média a porcentagem de precipitados no corpo de prova fraturado foi de 10,81% com um desvio padrão de $\pm 0,72$, ao passo que o corpo de prova base apresentou em média 11,22% de precipitados com um desvio padrão de $\pm 0,46$. Depreende-se, portanto, pelas imagens obtidas que o material em questão apresentou precipitados em toda a extensão estando presente relativamente em mesmas proporções tanto no material fraturado quanto no material base sem fratura.

As Figuras 32, 33 e 34 apresentam microestruturas obtidas da literatura da mesma liga em questão para ser possível a comparação destas.

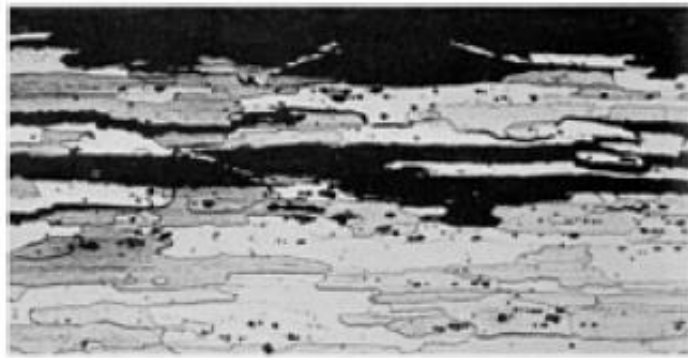


Figura 32: Corrosão intergranular na liga 7075-T6. Na qual os contornos de grãos foram atacados e separados. Ampliação 200x (ASM HANDBOOK).

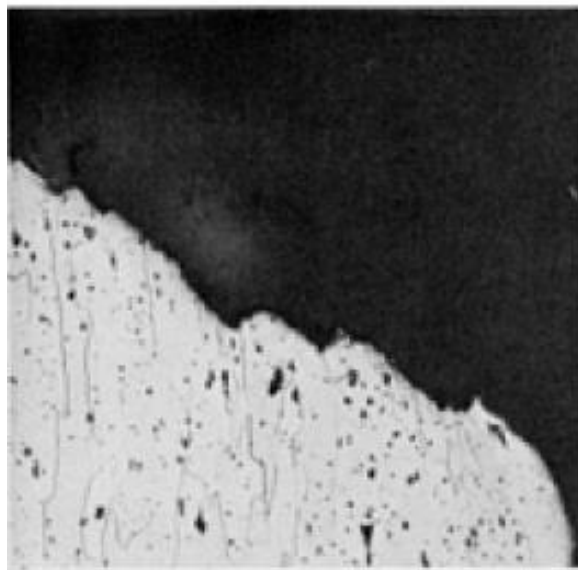


Figura 33: Típica fratura dúctil da liga 7075-T6. Mostrando os grãos deformados e empescoçamento da fratura. Ampliação 200x (ASM HANDBOOK).

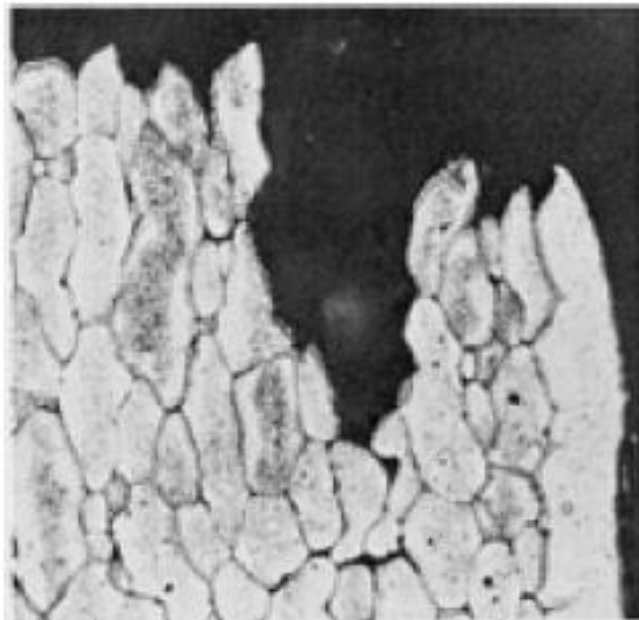


Figura 34: Típica fratura frágil da liga 7075-T6 devido ao superaquecimento causado por solução sólida se dissolvendo nos contornos de grão. Ampliação 200x (ASM HANDBOOK).

Pelas microestruturas da literatura, têm-se evidências de que não houve corrosão intergranular bem como fratura dúctil. No entanto, têm-se indícios de fratura interdendrítica no material, como pode ser vista nas figuras 4.3.11, 4.3.12 e 4.3.13.

3.4 – Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

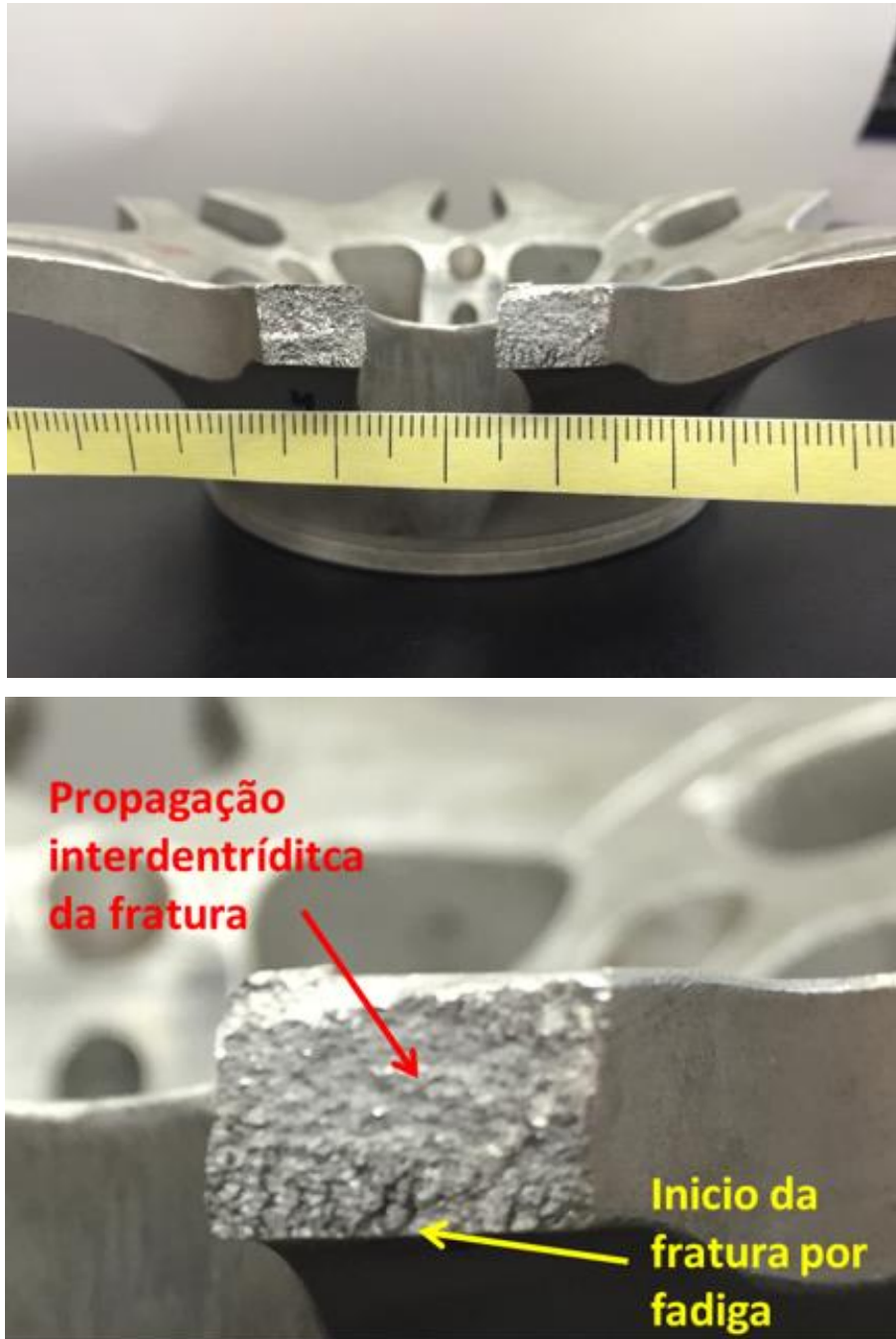


Figura 35: a) Foto da peça falhada; b) Ampliação da Foto 1a) mostrando o princípio de falha que ocorreu pela peça.

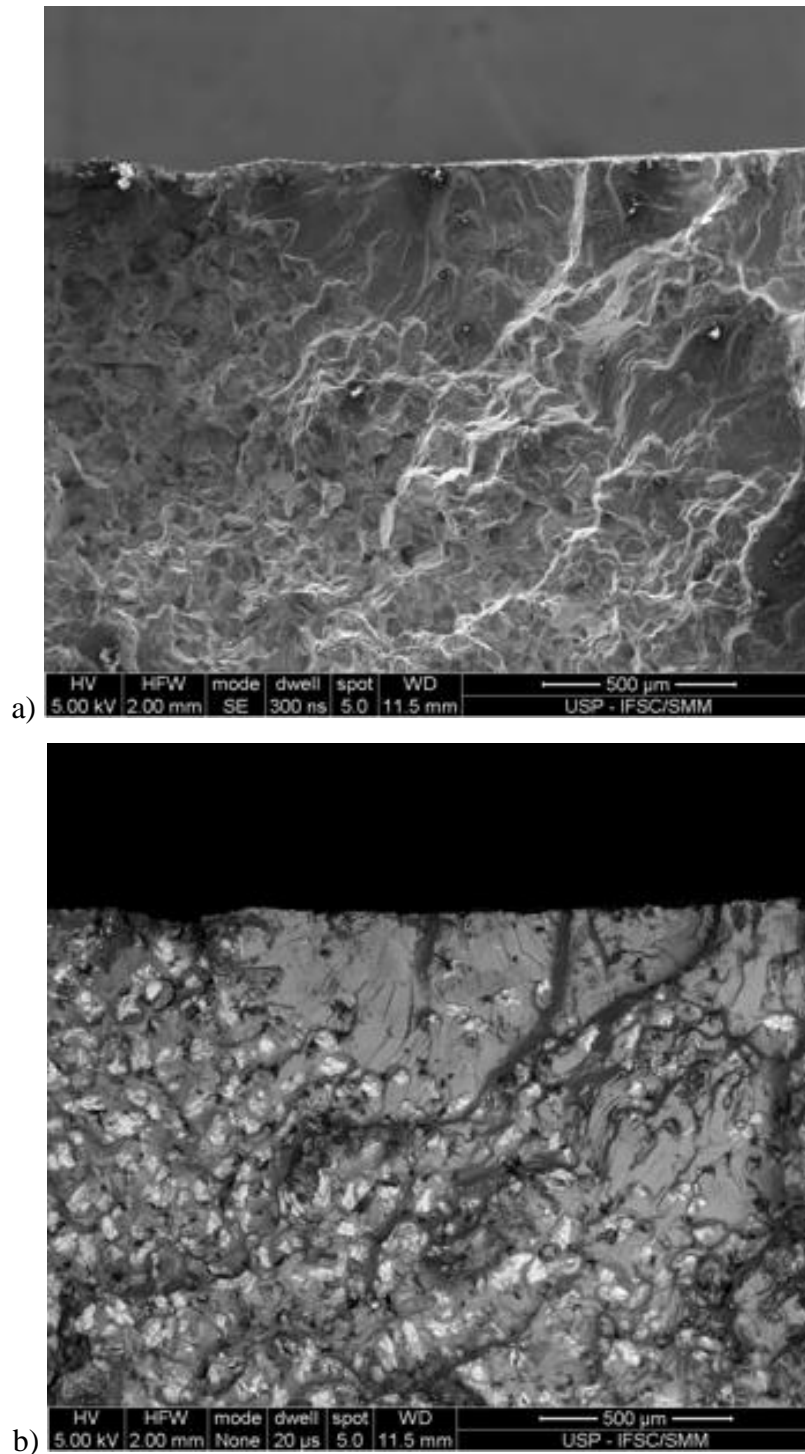


Figura 36: Imagem da nucleação da trinca: a) Imagem SE e b) Imagem BSE

Observou-se na *Figura 36a* que o início da trinca ocorreu por fadiga, e o que excitou sua nucleação foi a existência de um precipitado ou inclusão. A trinca se iniciou em uma região com menor concentração de precipitados, o que pode ser claramente visto na *Figura 36b*. A ausência

de precipitados gera uma queda na resistência do material, caracterizando esta área como a de uma propagação curta da trinca. Após esta região, a propagação da falha passa a ser interdendrítica, e nessa região é possível ver uma concentração maior de precipitados, que são pequenos pontos esbranquiçados na *Figura 36b*.

Além disso, nota-se uma alta concentração de precipitados/fases no material, microestrutura comum que se forma em peças fundidas. Mas como esses precipitados são relativamente grandes, isto significa que possivelmente a peça não foi tratada ou o tratamento não foi bem feito. Quando tratamento térmico é efetivo, os precipitados passam a ser muito finos, não sendo possível ver facilmente através de análise por MEV. Porém, para confirmar se o material foi tratado termicamente ou não, é necessário analisar a dureza.

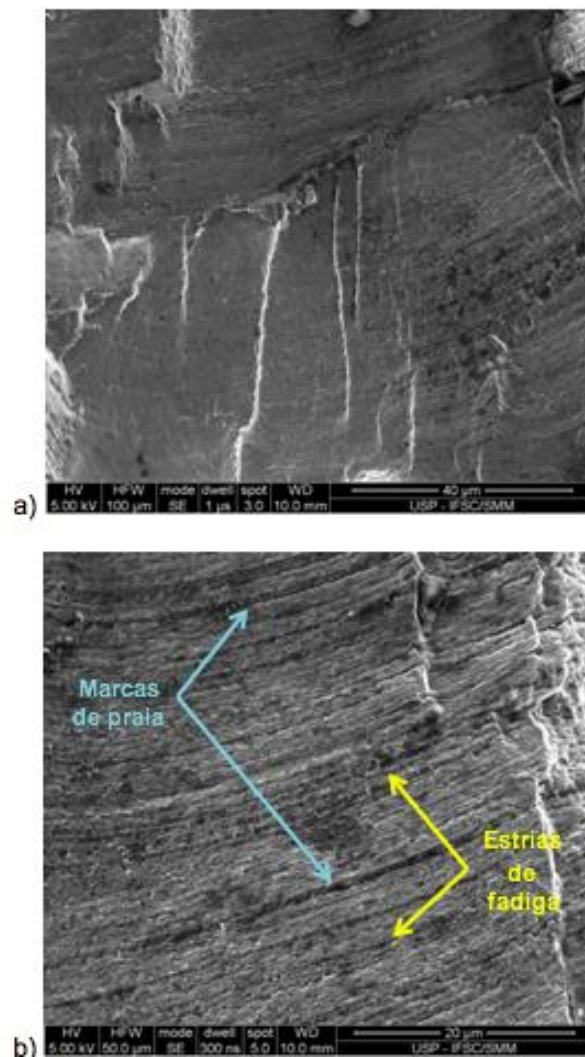


Figura 37 – a) Imagem das marcas de praia e estrias de fadiga; b) Ampliação da Imagem 3a) demarcando as marcas de praia e estrias de fadiga.

A Figura 37 representa um aumento da região de início da falha por fadiga observada na Figura 36, em que podem ser observadas marcas de praia e pequenas estrias de fadiga. É possível observar *block marks*, que consiste em milhares de estrias em um mesmo local, formando uma região localizada de deformação plástica,

Dessa forma, confirma-se que a trinca se iniciou por fadiga, sendo então o motivo principal da fratura. Provavelmente o limite de fadiga do material está muito baixo, o que poderá ser comprovado com a análise do K_{IC} . No entanto, não necessariamente significa que todos os braços da peça falharam por fadiga. Provavelmente alguns deles falharam por fadiga, aumentando a tensão nos demais e, devido ao material estar com baixa resistência, outras trincas podem ter iniciado em uma inclusão, por exemplo, e propagaram até falhar.

Nesta imagem observou-se a presença de *dimples*, fratura com coalescência de micro vazios, representando uma região que fraturou pelo mecanismo de deformação plástica. *Dimples* podem ser facilmente observados quando se tem planos de transição de trinca, pois ocorre o rasgamento (*tearing*) do material. Ao analisar a Figura 38b, é possível observar que dentro de cada *dimple* tem um precipitado.

A região que contém *dimples* provavelmente possui pouco precipitado e, dessa forma, maior tenacidade. Já as regiões com muitos precipitados é menos tenaz e, portando, nelas a fratura que ocorre é interdendrítica.

Além disso, observa-se uma região que aparenta ser um precipitado, mas na realidade trata-se de um vazio. O rasgamento gera uma trinca local, podendo haver um destacamento da inclusão ou precipitado em relação à matriz e a tendência é formar um vazio. O vazio observado é relativamente grande, possivelmente era um precipitado de alumínio-cobre ou um sulfeto. Porém, o correto seria fazer um EDX nesta região, pois seria possível ver os resquícios da inclusão.

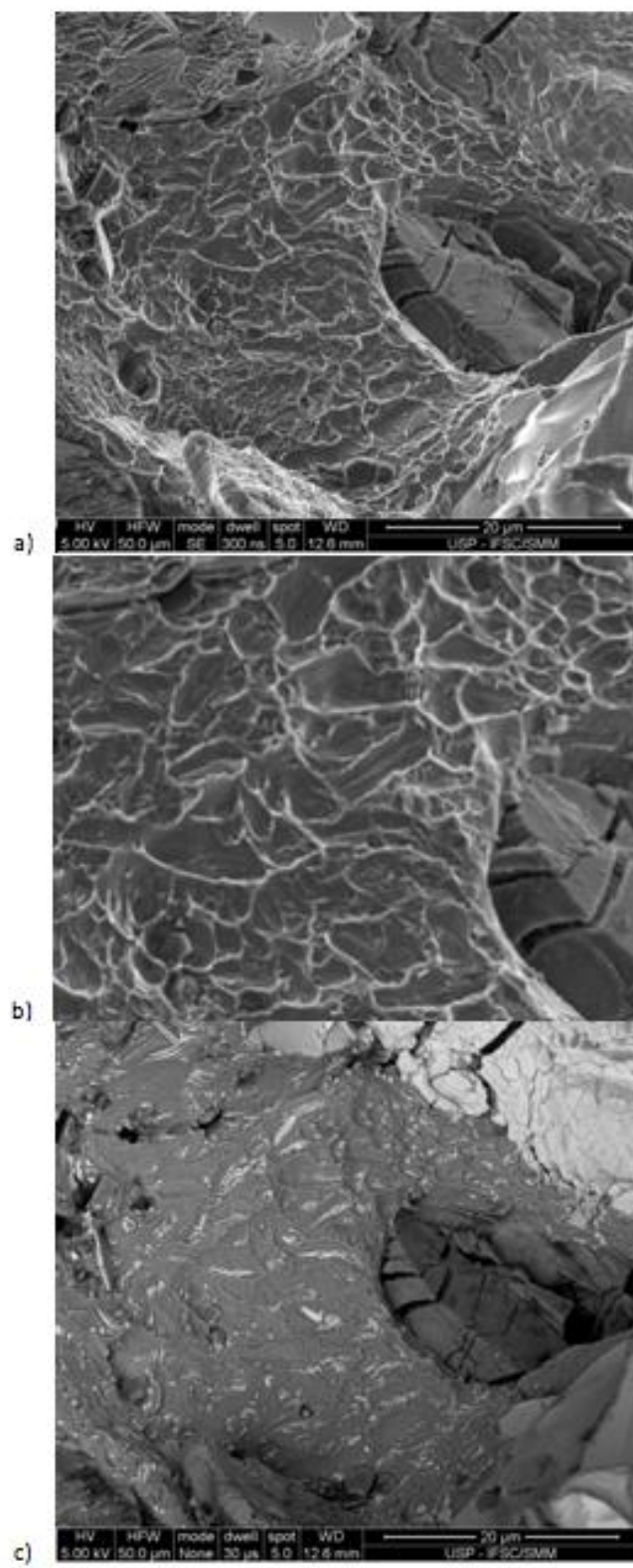


Figura .38 - Imagem do meio da peça mostrando dimples e vazios: a) Imagem SE, b) Aproximação da imagem SE e c) Imagem BSE

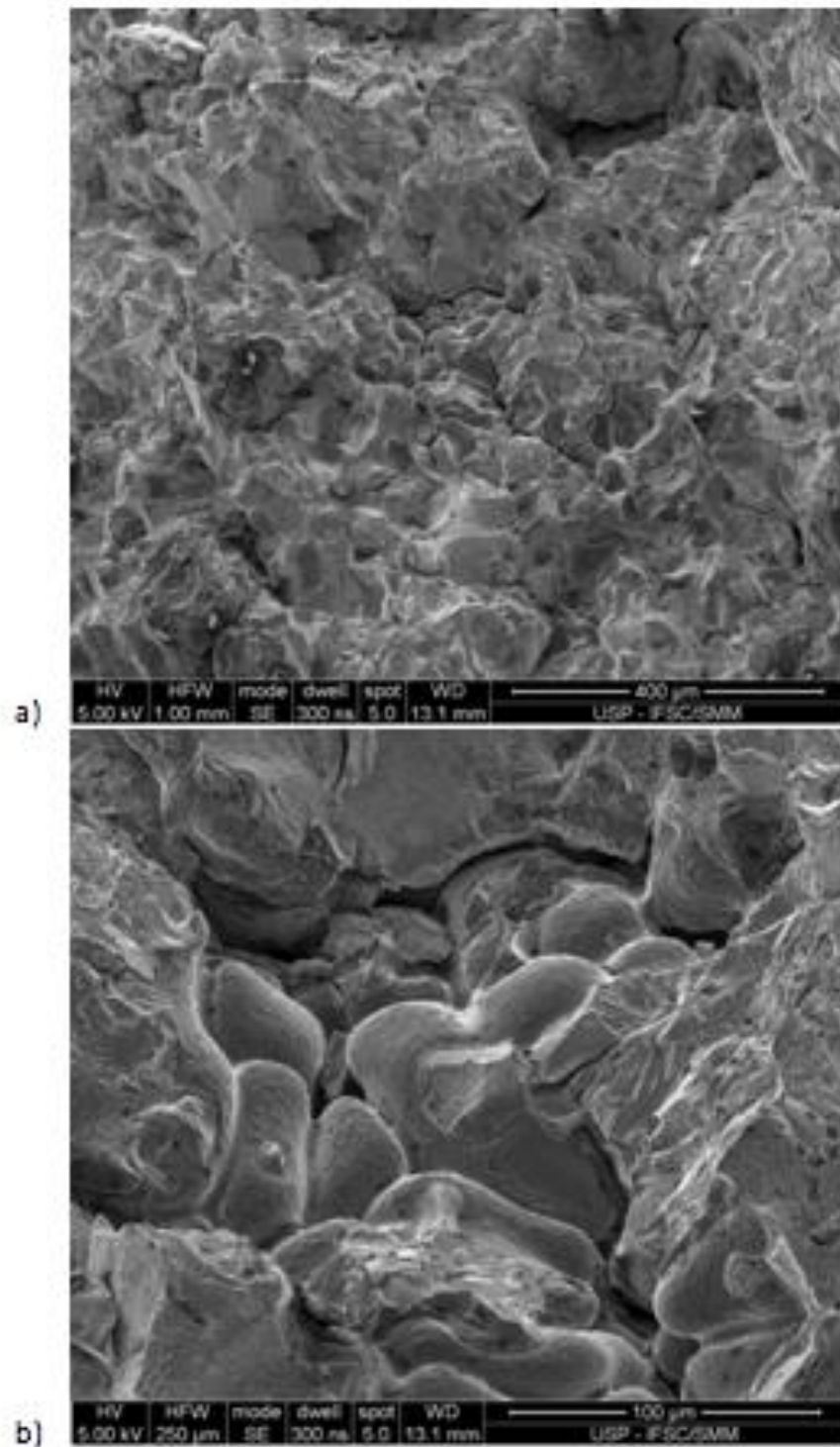


Figura .39 - Imagem da fratura interdendrítica: a) Imagem com menos aproximação e b) Imagem mais aproximada.

Na *Figura 39* observou-se regiões de grãos com formatos arredondados, característicos de fratura frágil interdendrítica, o que condiz com o fato da liga ter sido processada por fundição. Estrutura dendrítica é típica materiais brutos de fusão e, por ter grande concentração de vazios, as trincas tendem a se propagar através das dendritas. Essa estrutura pode ser destruída em processos de conformação e injeção. A partir dessa análise, espera-se que o material não tenha tenacidade à fratura, o que será confirmado pelo ensaio de K_{IC} .

A partir dessas imagens e da análise feita pelo MEV, conclui-se que a trinca iniciou por fadiga e se propagou por fratura interdendrítica, devido à região estar fragilizada.

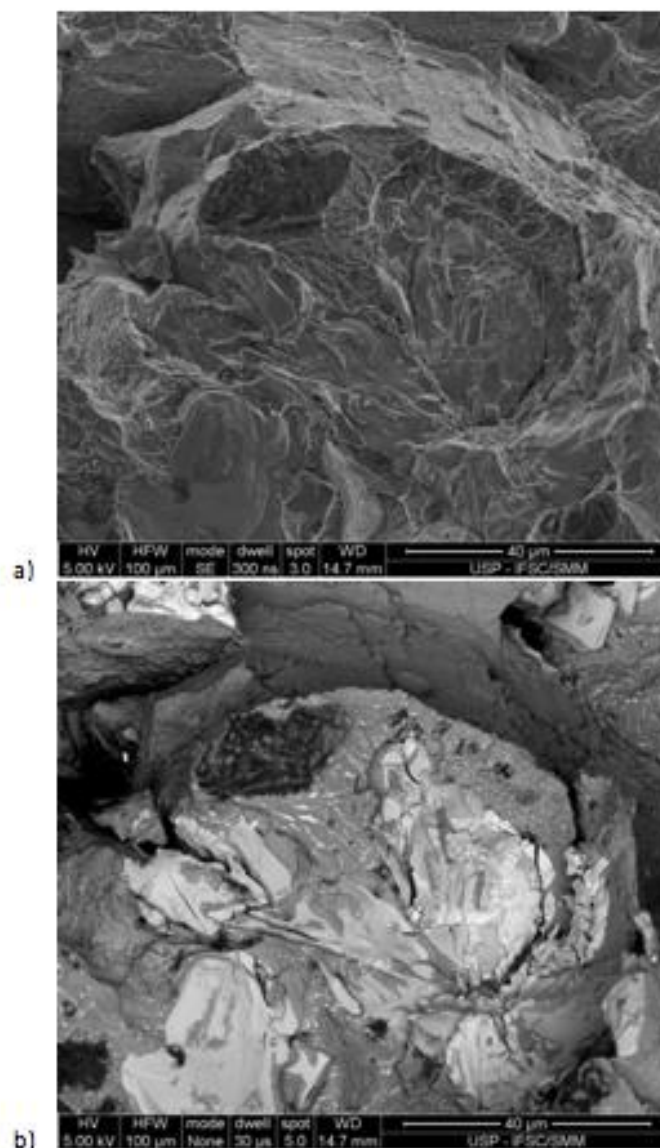


Figura 40 - Imagem de uma inclusão: a) Imagem SE e b) Imagem BSE.

Na *Figura 40* percebeu-se a possível presença de uma inclusão. A *Figura 40b* mostra diferentes cores, confirmando a possibilidade da presença de diferentes elementos no material. Portanto, devido a essa diferença de morfologia, foi necessário realizar uma análise EDX para avaliar os elementos presentes.

EDX

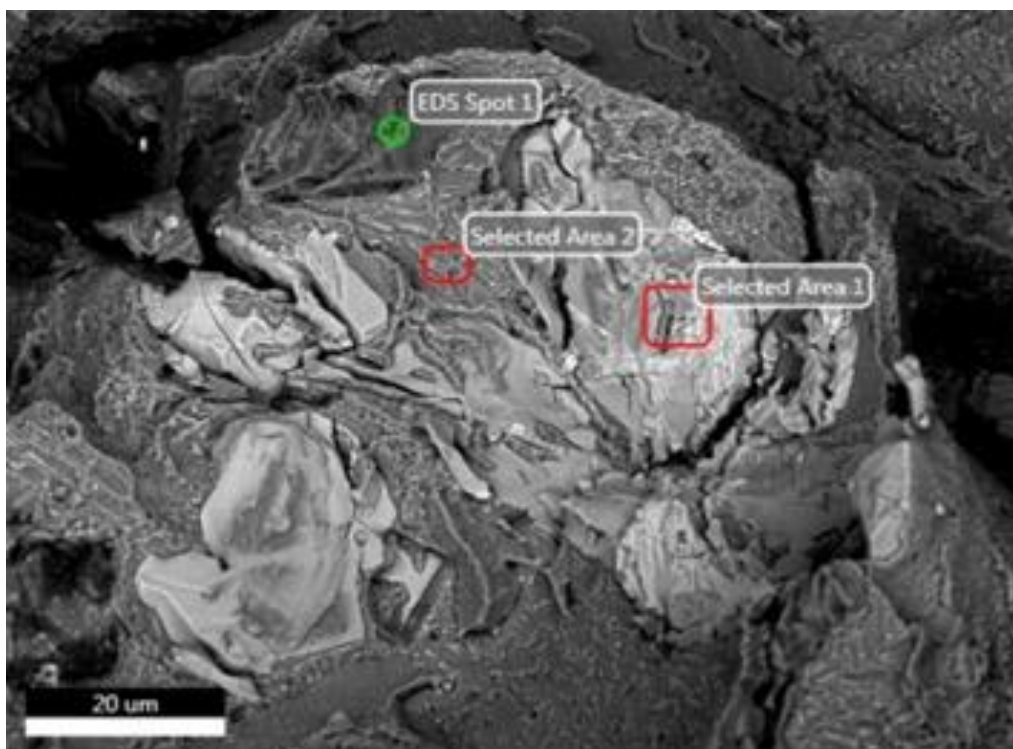
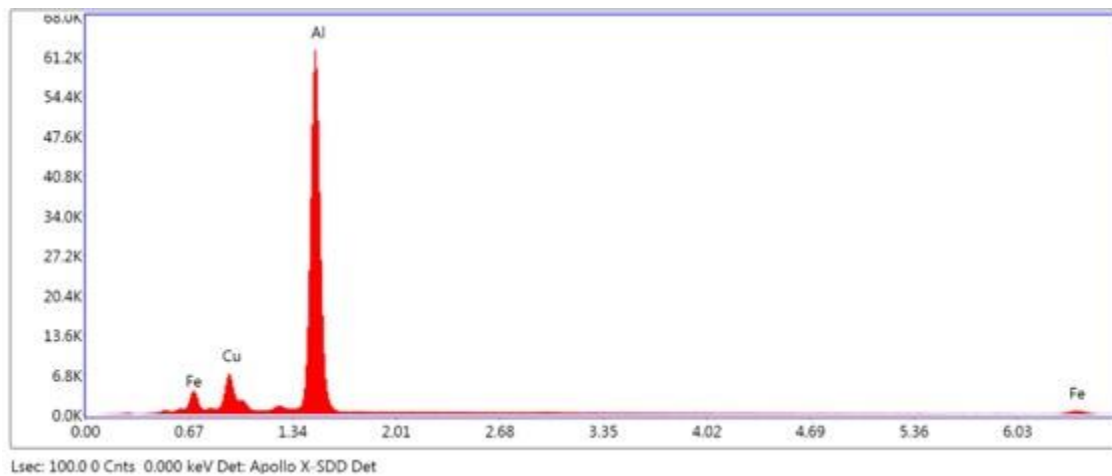
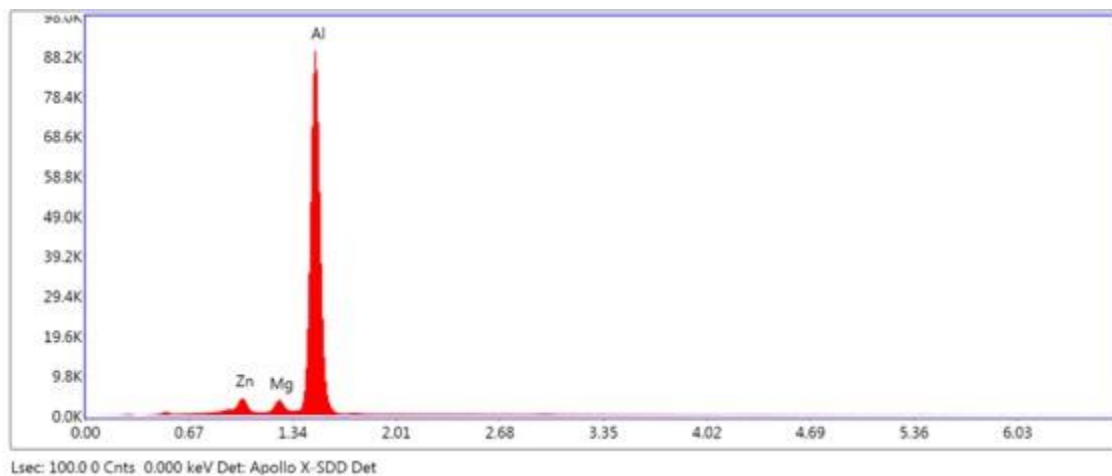


Figura 41: Imagem demarcando os pontos e áreas analisados por EDX.

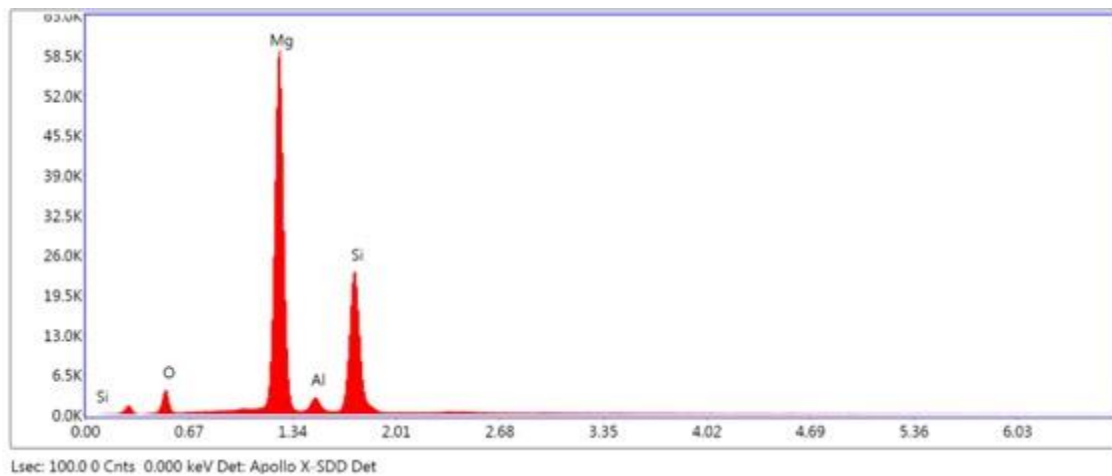
EDX – Área 1.



EDX- Área 2



EDX- Spot 1.



A análise por EDX foi feita na mesma região da amostra que a *Figura 40*. Esta análise mostrou que a região mais escura, chamada de “Spot 1” realmente é uma inclusão, composta majoritariamente por Magnésio e Silício. Este tipo de inclusão não metálica apresenta alta dureza e baixa tenacidade, influenciando negativamente as propriedades do material. Já as regiões chamadas de “área 1” e “área 2”, mesmo apresentando cores diferentes do restante da liga, são compostas por majoritariamente por Alumínio mas também por Cobre e Magnésio, respectivamente.

No início da investigação, foi dito que esta liga consistia em uma liga Alumínio-Zinco; no entanto, pouquíssima quantidade de Zinco foi observada e apenas na “área 2”, o que pode indicar um problema na composição química da Liga, que será confirmado ou não pela análise da Composição Química.

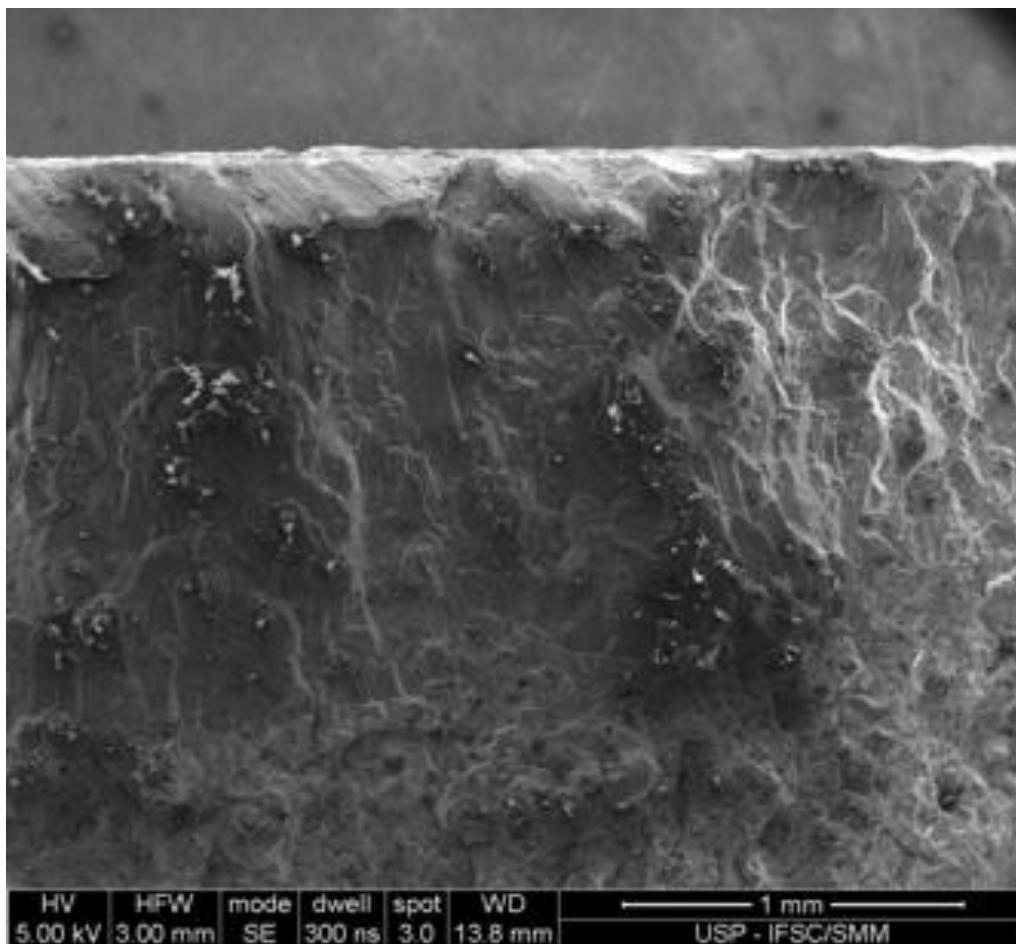


Figura 42: Imagem do final da fratura.

Esta imagem representa o final da fratura, podendo ver até a superfície da amostra. Porém nota-se uma região de difícil análise, provavelmente pela ocorrência de deformação plástica mecânica no final da fratura. Dessa forma a história da fratura foi prejudicada no final, dificultando a análise. É comum isto acontecer pois a peça não falhou repentinamente, gerando um alto stress na parte final, caracterizado nesta deformação plástica.

3.5 – Análise Química

Os resultados da análise de composição via EDS podem ser visualizados na Tabela 5:

Tabela 5: Composição química obtida via EDS

Elemento	Zn	Mg	Al	Si	Fe	Cu
% em massa	4,12	2,53	89,97	1,08	0,67	1,63
Erro %	4,59	3,57	2,48	8,51	11,51	12,07

As medidas obtidas mostraram grande divergência em relação às especificações da liga ASM 7075-T6 (Tabela 6):

Tabela 6 - Composição nominal da liga 7075-T6.

Elemento	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al	Outros
Liga 7075-T6	Máx. 0,4	Má x 0,5	1,2 - 2	Má x 0,3	2,1 - 2,9	0,18 - 0,28	5,1- 6,1	Máx. 0,2	87,1 - 91,4	Máx 0,5

A técnica de EDS utilizada não possui grande precisão, sendo melhor utilizada para resultados qualitativos, desta maneira, realizou-se medidas via espectrometria de absorção atômica, que possuem maior confiabilidade. O resultado desta análise pode ser observado na Tabela 7:

Tabela 7 - Comparação entre a composição nominal da liga ASM 7075-T6 e a amostra analisada

Elemento	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al	Outros
Liga 7075-T6	Máx. 0,4	Máx 0,5	1,2 - 2	Máx 0,3	2,1 - 2,9	0,18 - 0,28	5,1- 6,1	Máx. 0,2	87,1 - 91,4	Máx 0,5
Amostra	0,13	0,34	1,73	0,021	2,369	0,181	5,3	0,064	89,85	Máx 0,5

Pode-se notar que as amostras possuem composição dentro do intervalo especificado, apesar de o teor de Ti e Mn estarem consideravelmente abaixo do especificado. O Ti e o Mn são geralmente adicionados em ligas de Al para favorecer seu refino de grão e evitar a recristalização. Desta forma a falta de ambos pode levar a perdas de propriedades desejadas.

Ao analisar as composições das demais ligas de Al em busca de possíveis candidatos ao material das amostras, encontrou-se semelhança composicional apenas entre as ligas da série 7XXX (ligas que possuem Zn como principal elemento ligante). A Tabela 8 apresenta a composição química de algumas ligas compatíveis com os resultados, com pequenos desvios:

Tabela 8 - Possíveis candidatos para o material da flange.

Elemento	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al	Outros
Liga 7075-T6	Máx. 0,4	Máx 0,5	1,2 - 2	Máx 0,3	2,1 - 2,9	0,18 - 0,28	5,1- 6,1	Máx. 0,2	87,1 - 91,4	Máx 0,5
Liga 7050-A	Máx. 0,12	Máx 0,15	1,7 - 2,4	Máx 0,04	1,7 - 2,6	Máx. 0,04	5,7- 6,9	Máx. 0,06	balanço	-
Liga 7060	Máx. 0,15	Máx 0,2	1,8 - 2,6	Máx 0,2	1,3 - 2,1	0,15 - 0,25	6,1- 7,5	Máx. 0,05	balanço	-
Liga 7040	Máx. 0,1	Máx 0,13	1,5 - 2,3	Máx 0,04	1,7 - 2,4	Máx. 0,04	5,7- 6,7	Máx. 0,06	balanço	-
Amostra	0,13	0,34	1,73	0,021	2,369	0,181	5,3	0,064	89,85	Máx 0,5

3.6 - Ensaio de Tração

Os resultados obtidos no ensaio de tração, para os dois corpos de prova testados, estão apresentados nos Gráficos 5 e 6 e na Tabela 9.

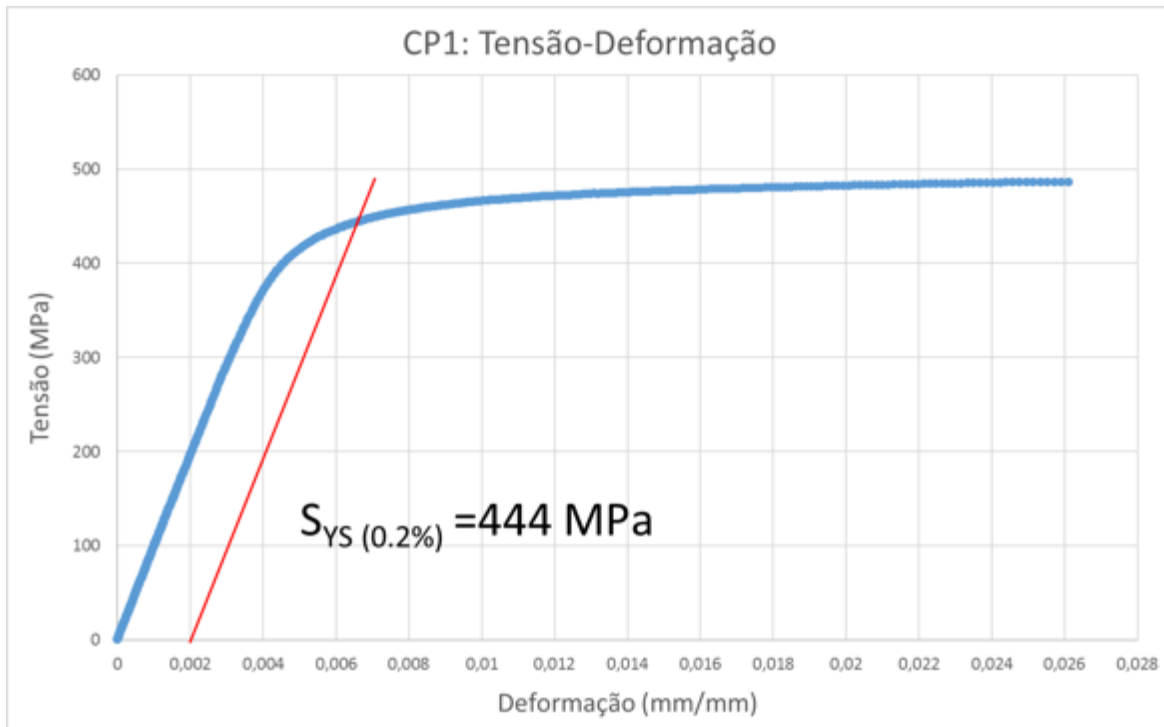


Gráfico 5: Tensão por Deformação para o corpo de prova CP 1.

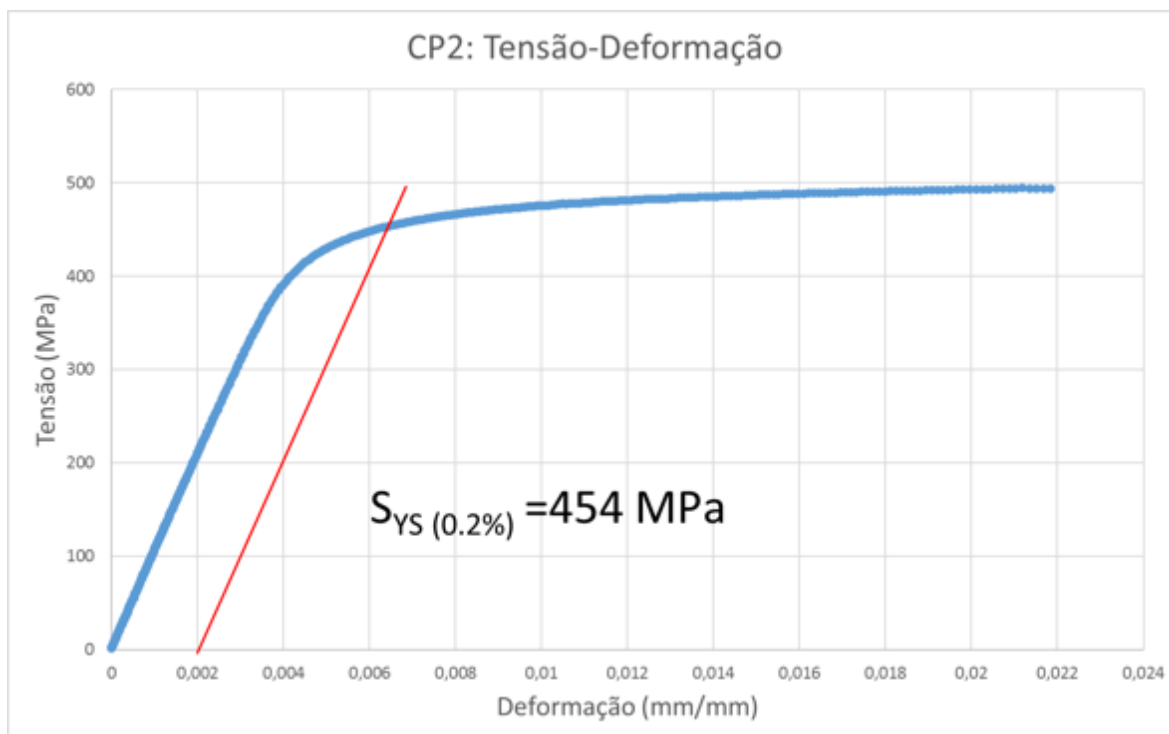


Gráfico 6: Tensão por Deformação para o copo de prova CP 1.

Tabela 9: Propriedades monotônicas, bem como suas médias, obtidas no ensaio de tração e o valor encontrado na literatura para a liga 7075-T6.

	Limite de Escoamento (MPa)	Resistência a Tração (MPa)	Alongamento (%)
CP1	444	486	5,7
CP2	454	494	7
Média	449	490	6,35
7075-T6 [3]	503	572	11

Como pode-se observar, a liga analisada possui limite de escoamento e resistência a tração ligeiramente menores, enquanto o alongamento se mostrou bem menor do que o valor de referência.

As imagens macroscópicas das fraturas dos corpos de prova 1 e 2 estão apresentadas nas **Figuras 45 e 46**, respectivamente.



Figura 43: Análise macroscópica da fratura do CP 1.

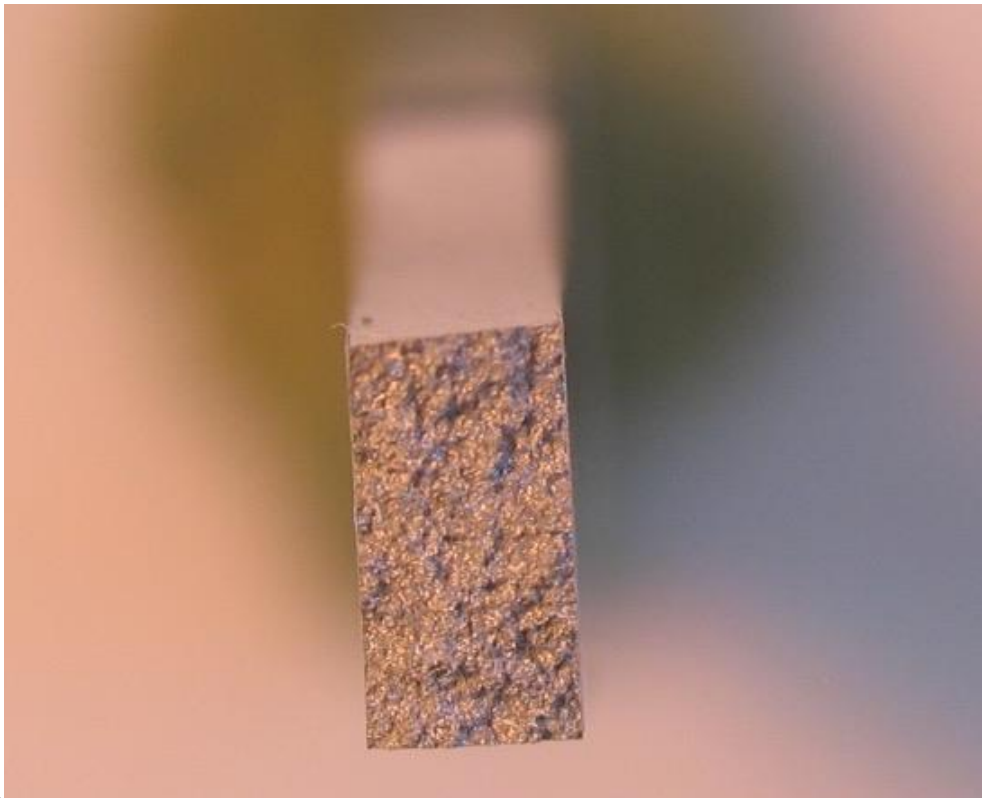


Figura 44: Análise macroscópica da fratura do CP 2.

Pode-se observar uma superfície de fratura lustrosa e brilhante, sem um aspecto de deformação plástica. Comparando com o alongamento típico de uma liga 7075-T6, nota-se que houve uma redução deste valor (11 % contra uma média de 6,35 %).

Para melhor identificar a superfície de fratura, uma microscopia eletrônica de varredura foi realizada, como pode se observar a seguir nas **Figuras 47, 48, 49, 50, 51, 52**.

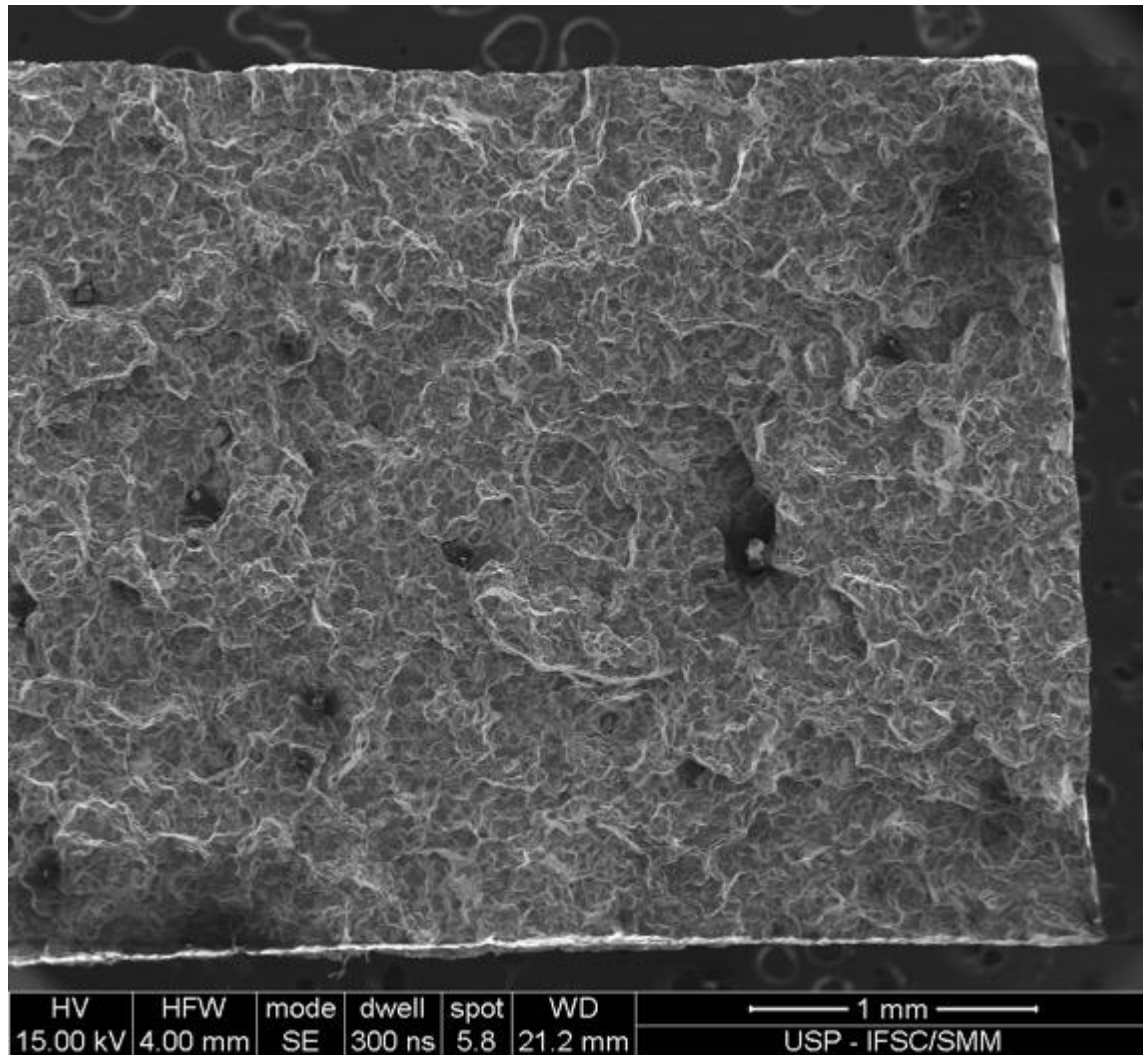


Figura 45: Análise microscópica da fratura.

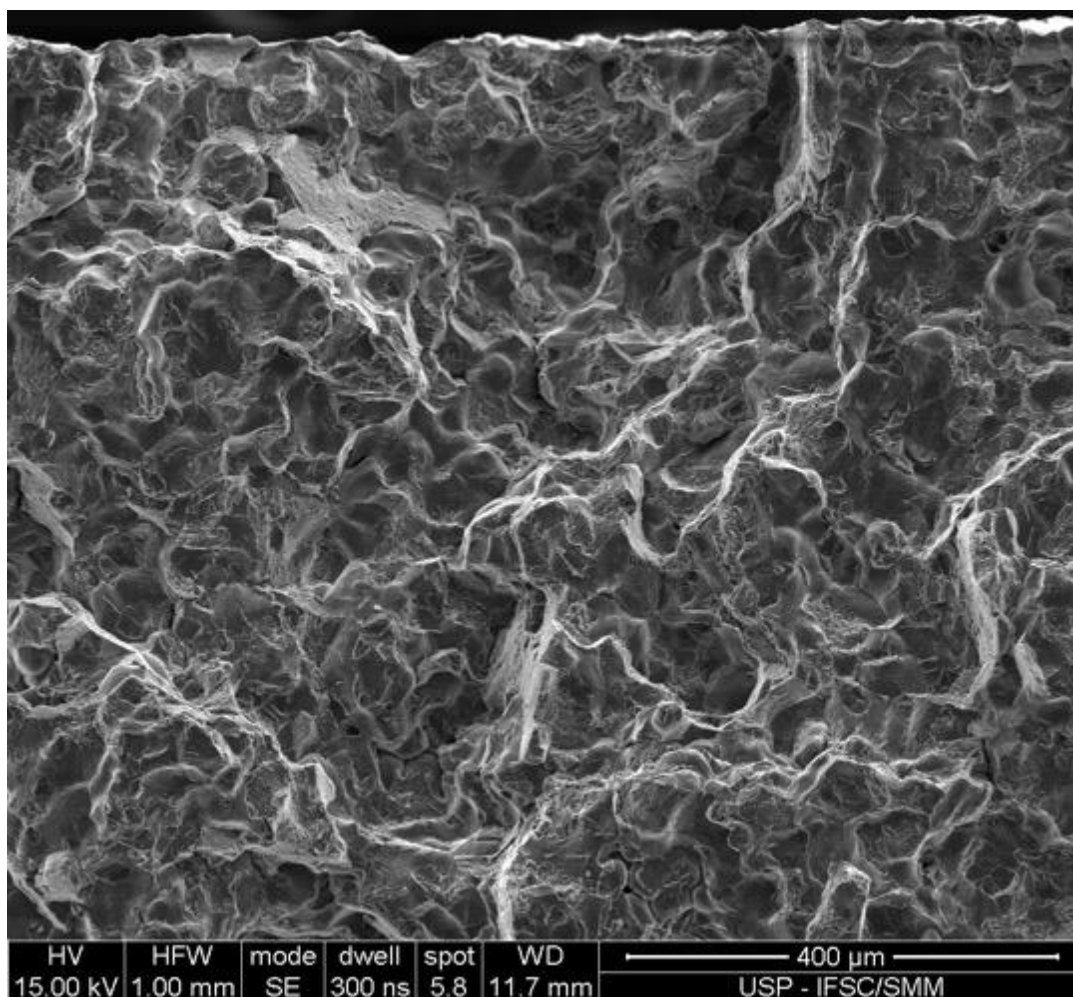


Figura 46: Análise microscópica da fratura.

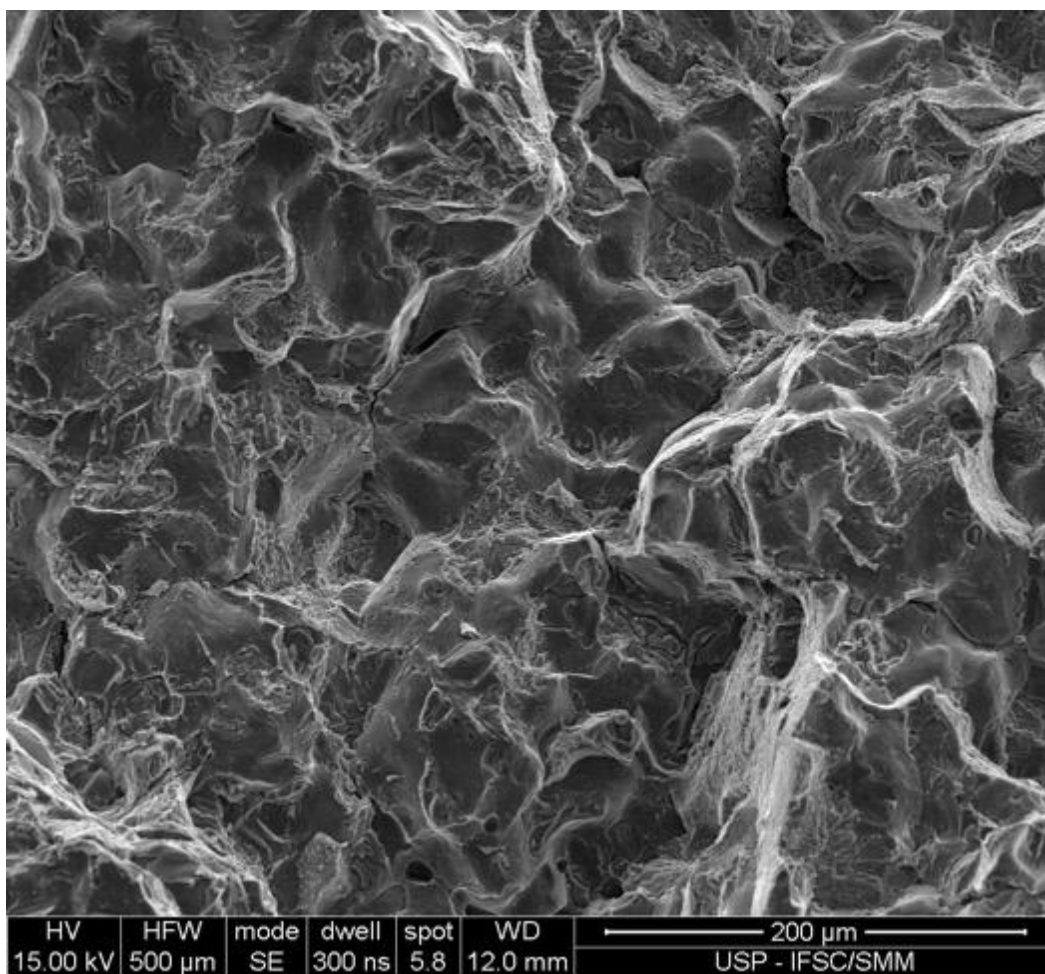


Figura 47: Análise microscópica da fratura.

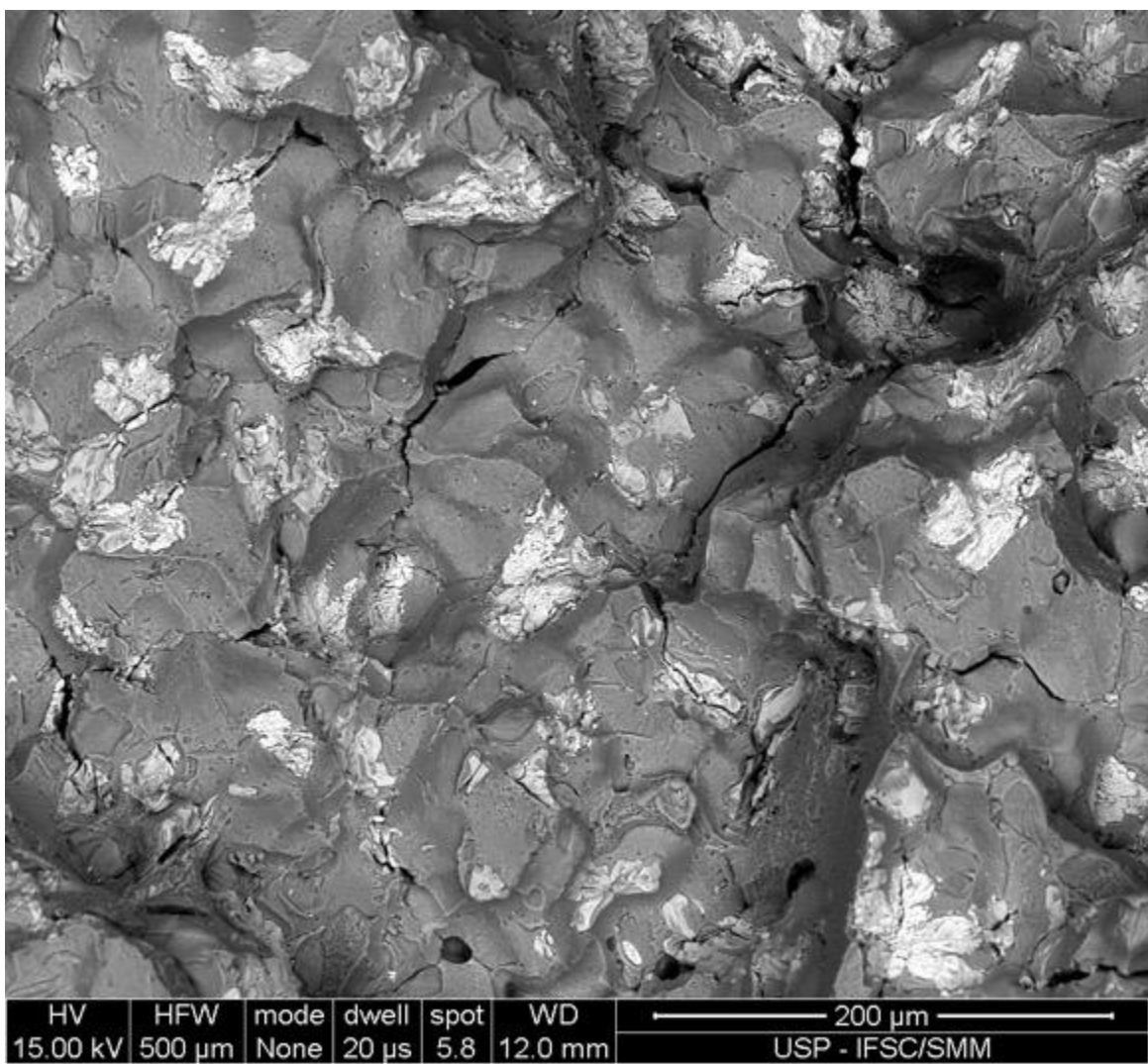


Figura 48: Análise microscópica da fratura.

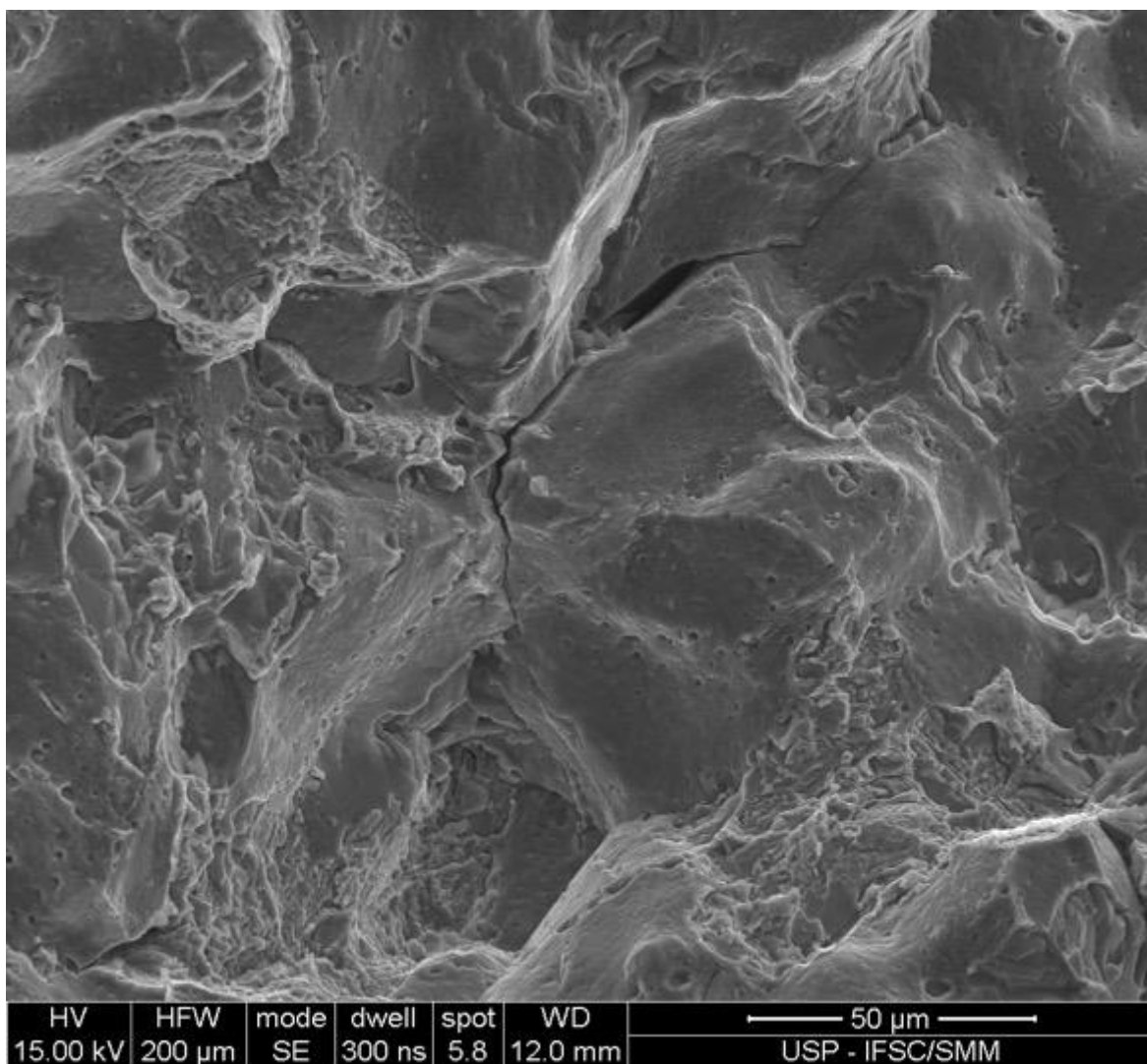


Figura 49: Análise microscópica da fratura.

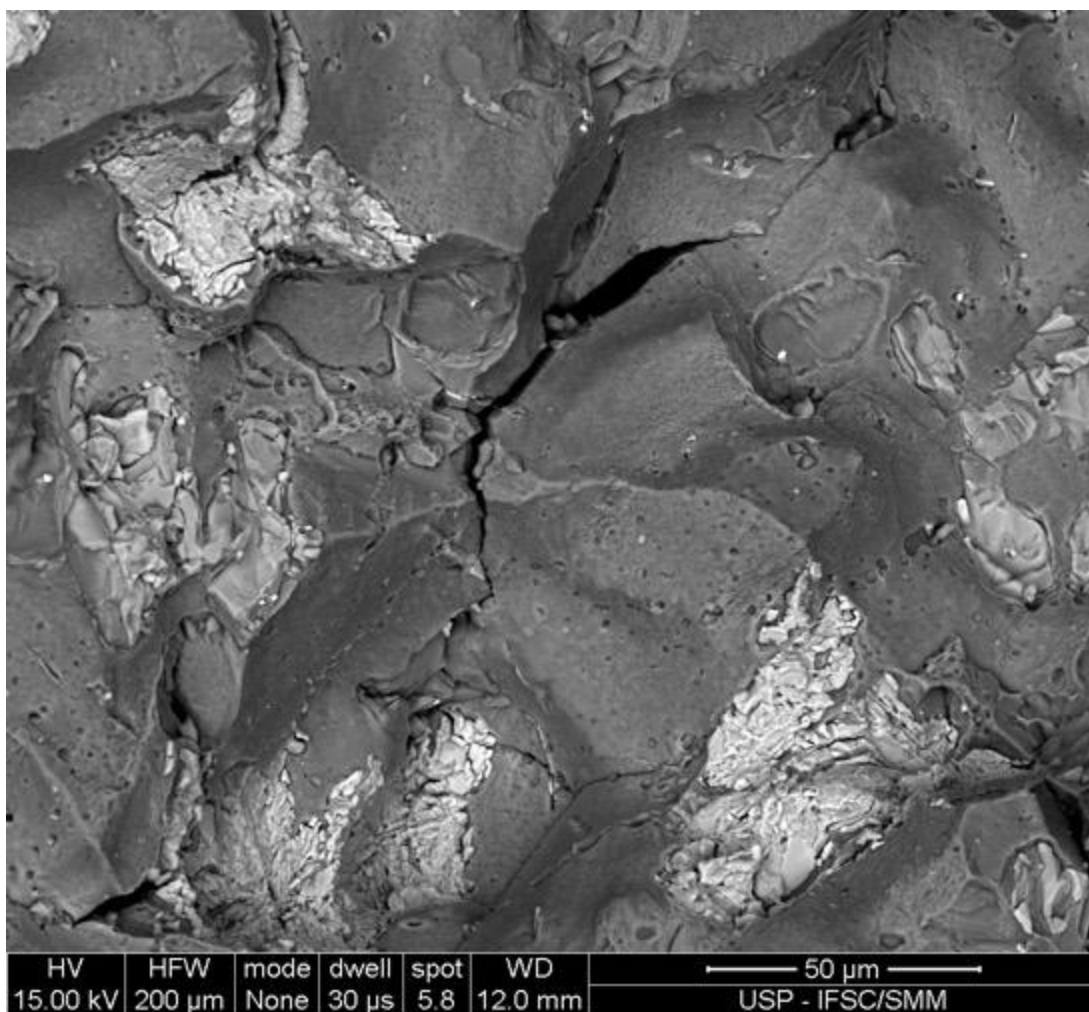


Figura 50: Análise microscópica da fratura.

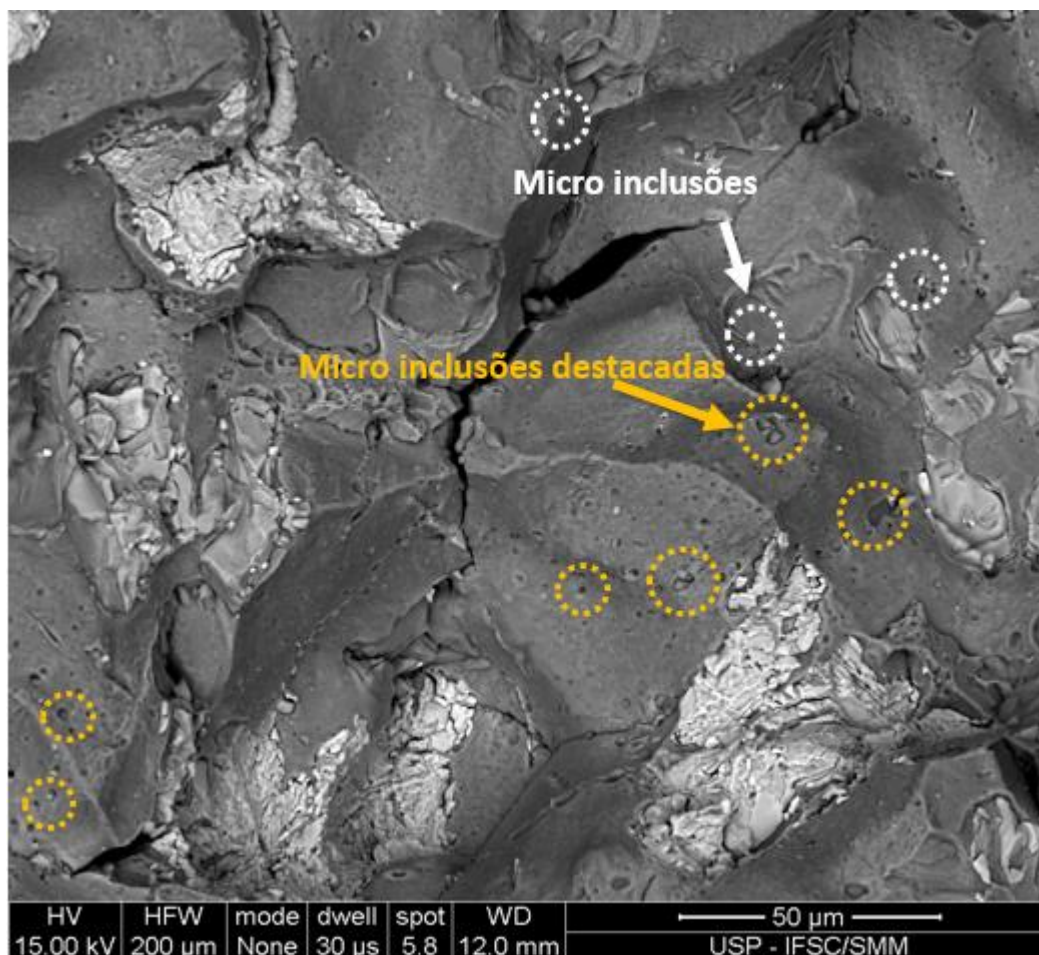


Figura 51: Análise microscópica da fratura.

Observa-se pela **Figura 46, 47 e 48** que não houve a formação de *dimples*, ou seja, microvazios característicos de uma fratura dúctil. Este fato é corroborado com a diminuição do alongamento. As **Figuras 52 e 53** demonstram a presença de micro inclusões. Estas são resultantes do tratamento térmico de envelhecimento, necessárias para o aumento de resistência mecânica da liga. Na **Figura 53** nota-se mais claramente que, no ensaio de tração, várias das micro inclusões foram destacadas. No entanto, ainda há algumas remanescentes na **Figura 53**.

Observando-se ainda a **Figura 49** e, para melhor visualização da fratura, a **Figura 51**, uma falha intergranular. Ainda, nota-se uma alta concentração de precipitados indesejáveis observados na **Figura 50**. Provavelmente a formação desses precipitados se deve a uma solidificação inadequada, causando uma fragilização da liga. Este fato é corroborado pela baixa tenacidade apresentada no ensaio de impacto Charpy.

3.7 - Ensaio de Impacto

Realizou-se ensaios de impacto Charpy-A com um martelo de 30J no equipamento Instron Wolpert - PW30. Também foi feita a análise fractográfica dos corpos de prova após o ensaio, utilizando um microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Os ensaios de impacto para os dois corpos-de-prova resultaram em 2J de energia absorvida, enquanto, segundo as propriedades do material, deveriam ser absorvidos 6,8J. Portanto o material apresentou tenacidade muito inferior a esperada. Por meio da análise macroscópica da fratura, figura 54, já é possível afirmar que o material fraturou de maneira frágil, uma vez que a superfície tem aspecto brilhante, sem nenhuma deformação macroscópica.

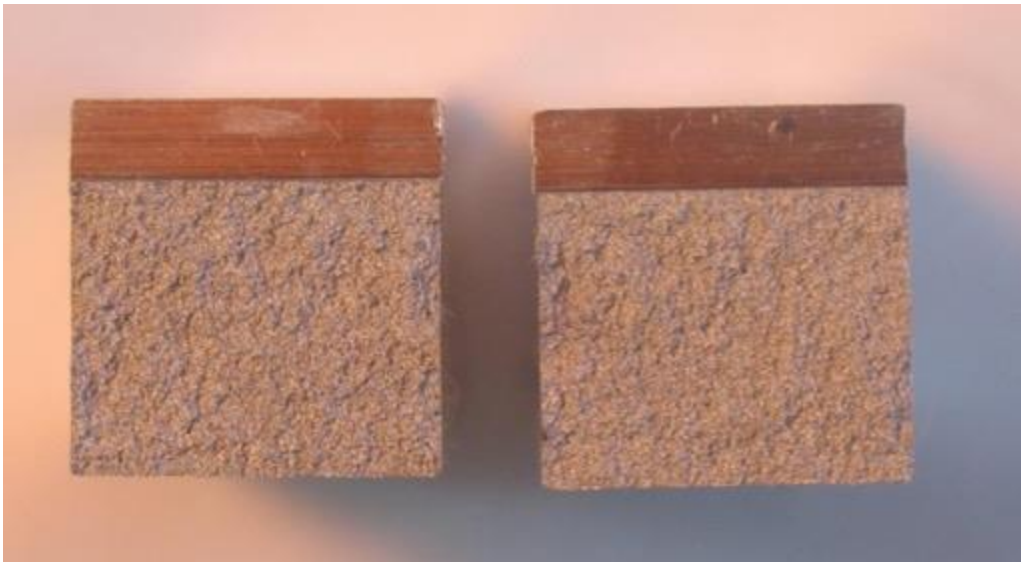


Figura 52: Superfície de fratura após o ensaio de impacto Charpy.

Os resultados da análise fractográfica mostram que a fratura do material foi em sua maioria intergranular (figura 55), expondo as superfícies facetadas dos grãos e com pequena presença de alvéolos sobre suas faces (figura 56). Tendo, portanto, comportamento frágil decorrente da fragilização dos contornos de grão, o que pode explicar a baixa tenacidade apresentada nos ensaios de impacto. Observou-se também a presença de precipitados frágeis no material, como evidenciado pela figura 56.

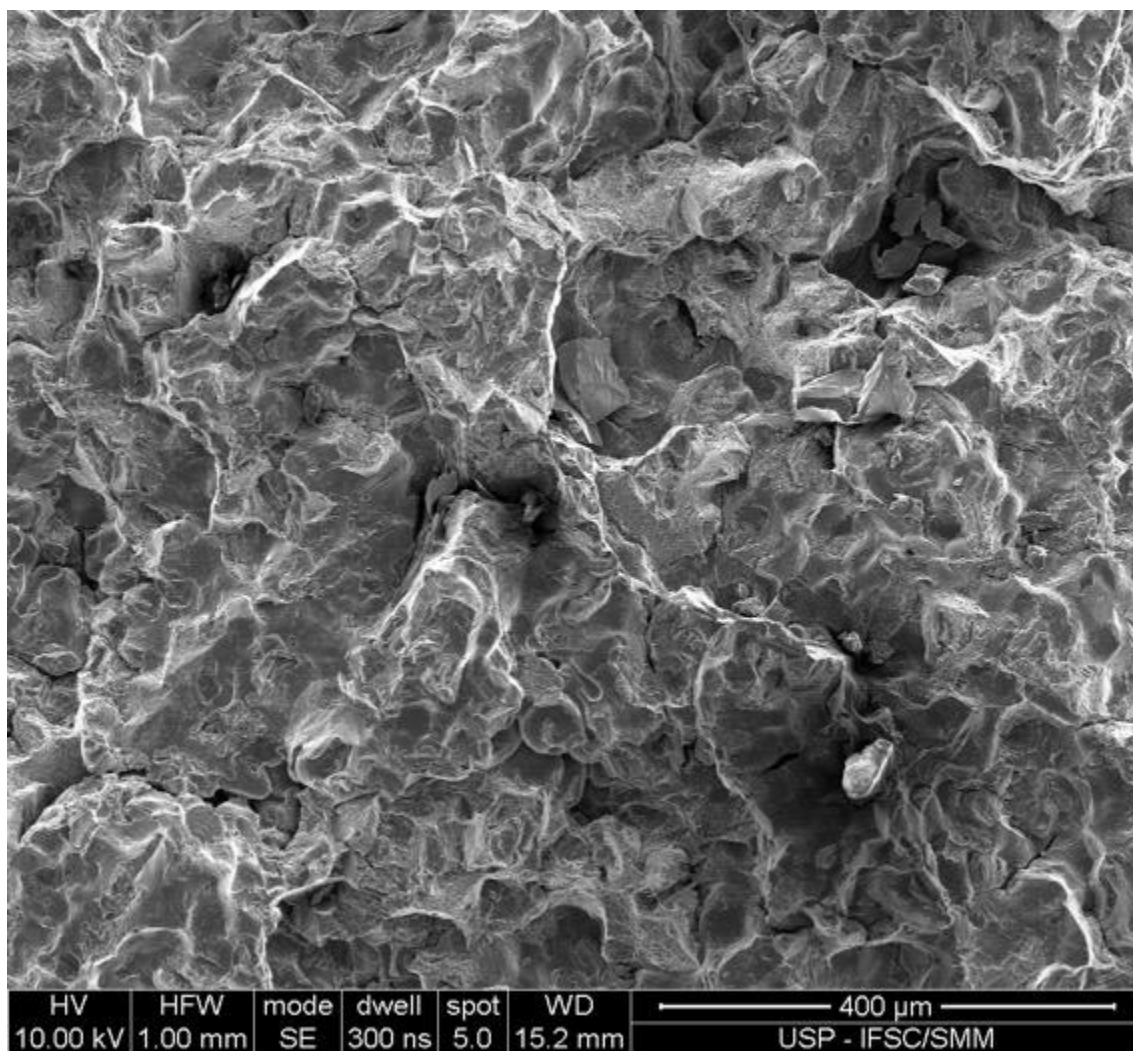


Figura 53: Fratura intergranular do corpo-de-prova Charpy após o ensaio. É possível observar as facetas dos grãos.

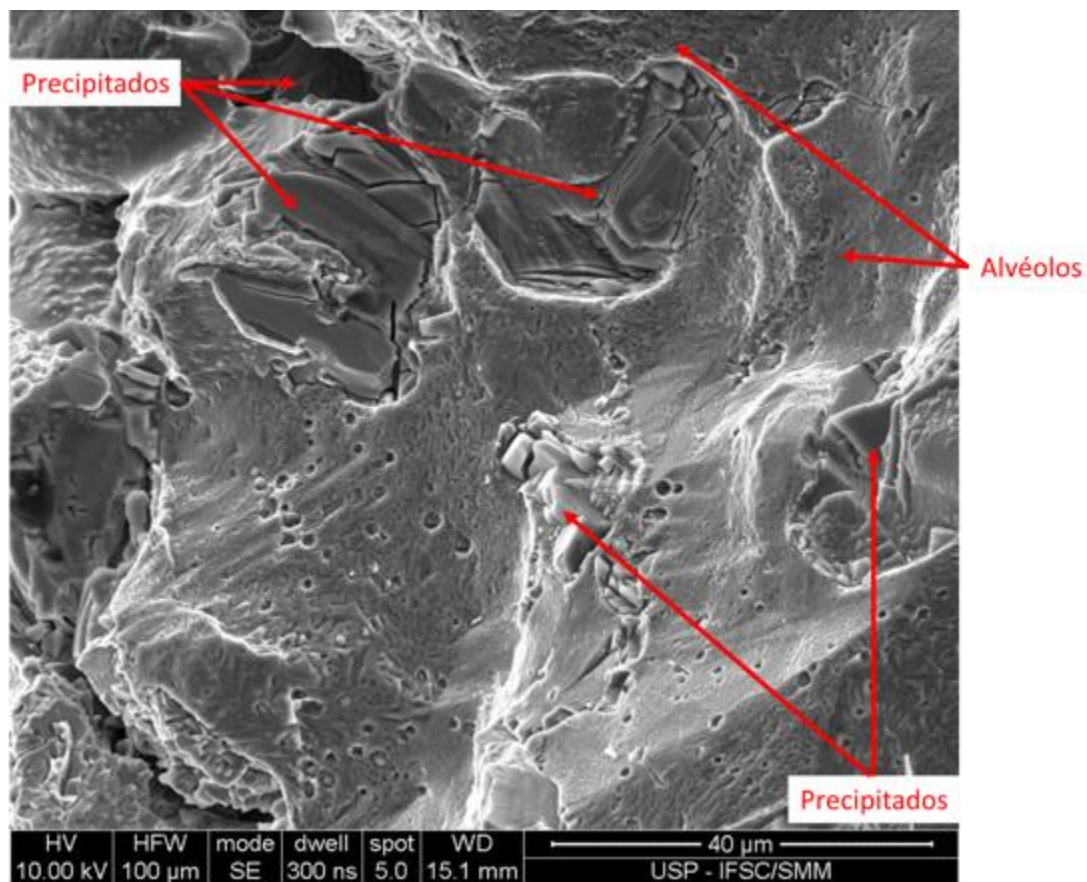


Figura 54: Precipitados e pequena fração de fratura dúctil (alvéolos) na superfície analisada.

Foi feita uma análise mais profunda a respeito dos precipitados encontrados na fratura analisada, a figura 57 mostra que esses estão distribuídos por todo o material, sendo a fase mais clara, seu tamanho médio foi de 73 μm com desvio-padrão de 21 μm . Além disso, quando analisados em um aumento maior (figura 58) verificou-se que há diferentes tipos de precipitados (uma vez que a coloração resultante do retroespalhamento de elétrons é diferente, o que implica em precipitados de diferente massa molar e portanto diferente composição), sua composição qualitativa é mostrada na figura 59, na qual pode-se notar que a matriz é formada por alumínio e zinco, os precipitados mais claros são formados por cobre e ferro e os mais escuros por silício e magnésio.

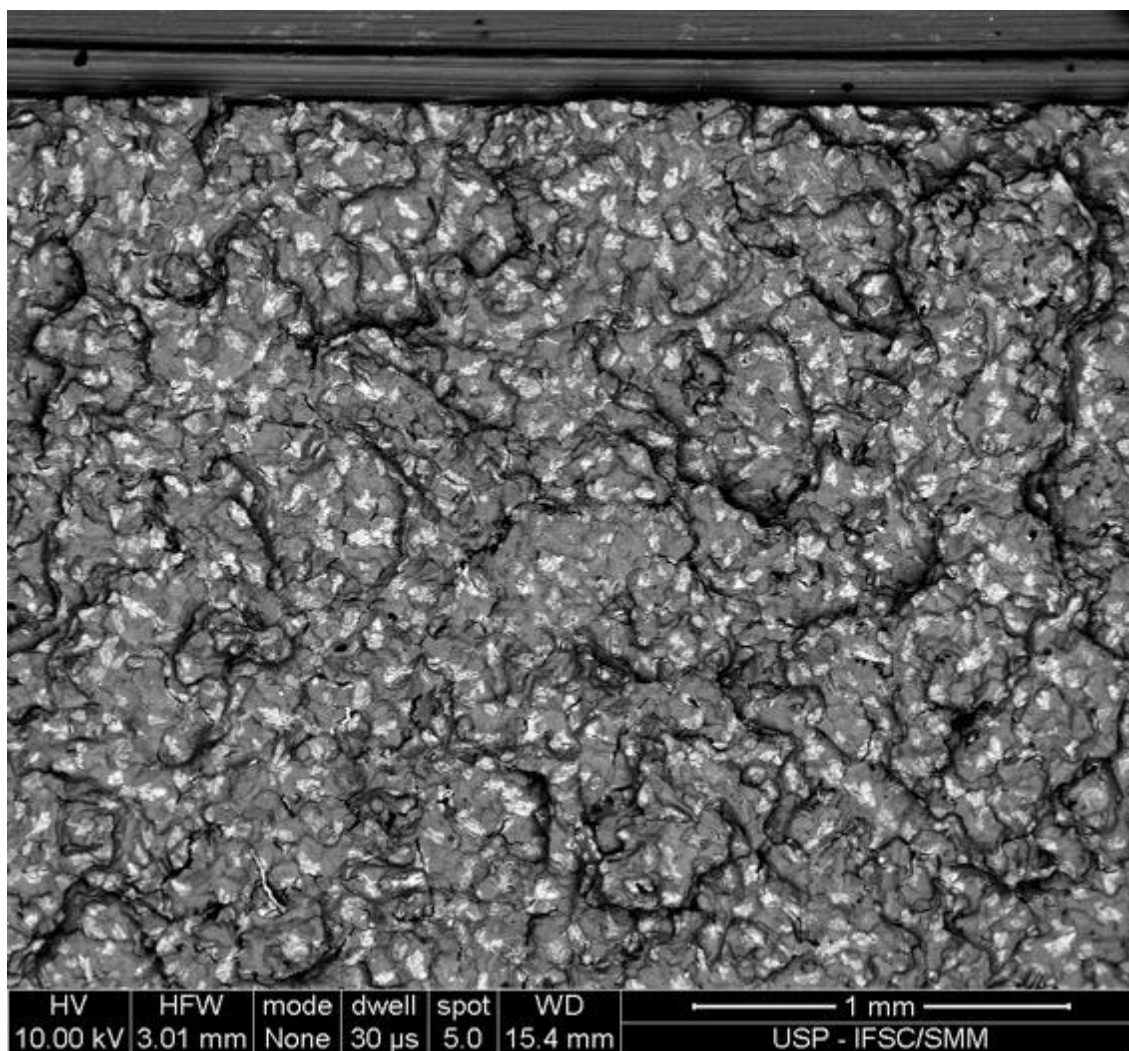


Figura 55: Distribuição de precipitados (fases mais claras) por toda superfície de fratura analisada.



Figura 56: Precipitados de diferentes composições.

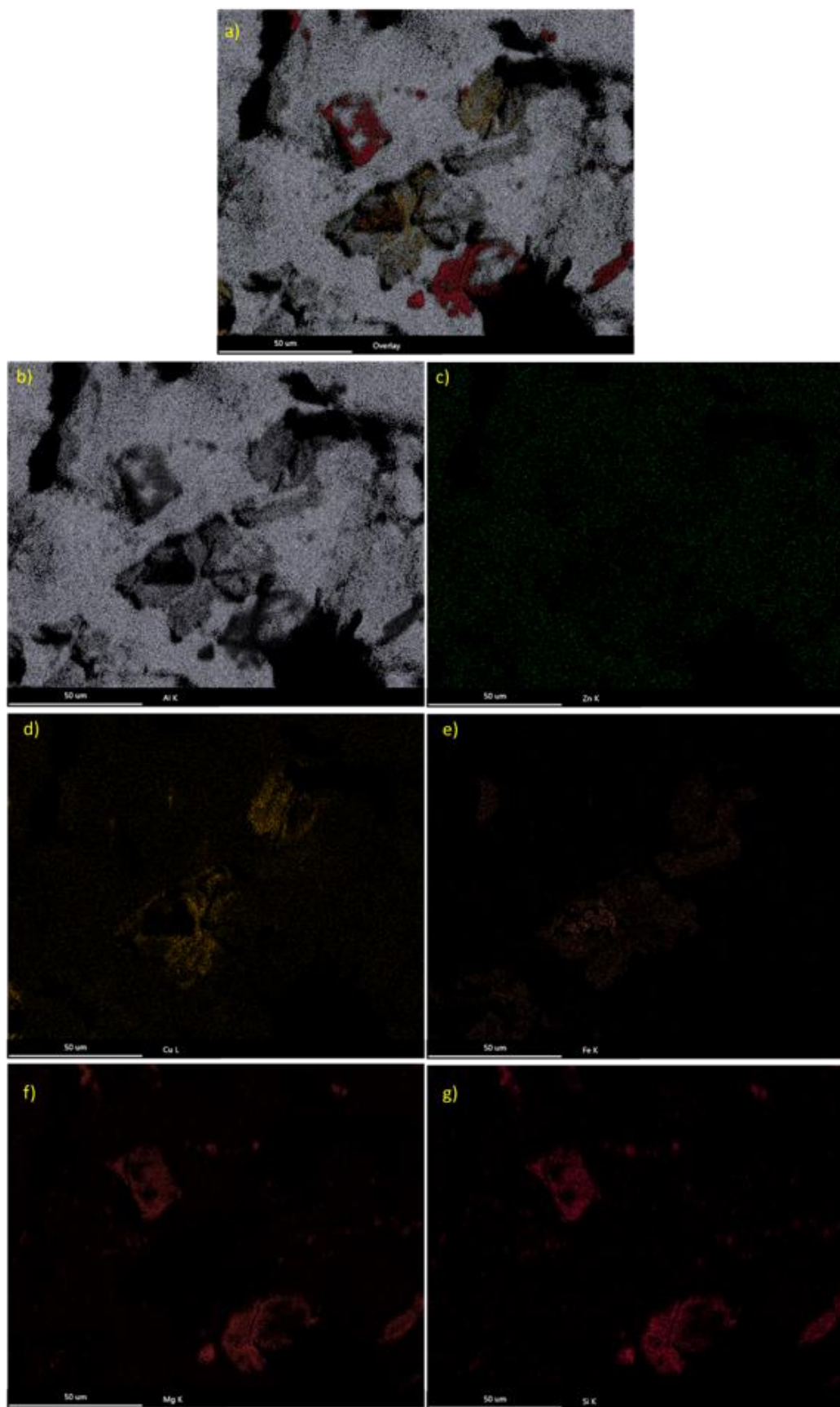


Figura 57: - Mapeamento químico. a) Visão geral da região mapeada. b) Alumínio, elemento que compõe a matriz. c) Zinco, elemento que em conjunto com o alumínio compõe a matriz. d) Cobre, componente de um dos tipos de precipitado (mais claros). e) Ferro, elemento

Também notou-se a presença de fratura interdendrítica em algumas regiões do corpo-de-prova, como evidenciado pela figura 60, na qual é possível observar uma dendrita, estrutura bruta de fusão. Isso pode ocorrer pelo fato de, durante a solidificação, as composições químicas do interior e do contorno das dendritas serem diferentes, levando a diferentes propriedades mecânicas.

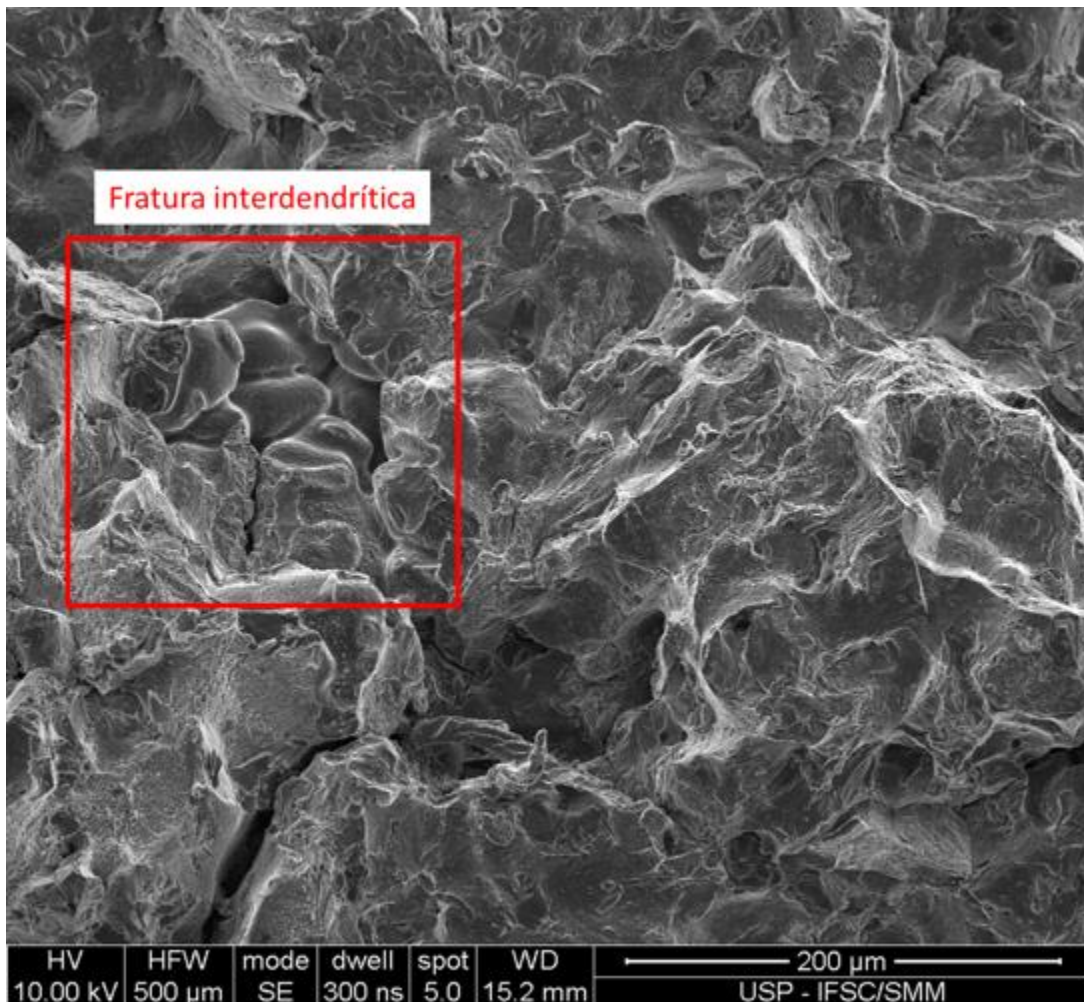


Figura 58: Região com fratura interdendrítica

Concluindo, a energia absorvida no ensaio de impacto foi inferior ao valor encontrado nas referências, evidenciando uma tenacidade bastante baixa do material. As imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura das superfícies de fratura também reforçam a fragilização do contorno de grão, mostrando as formas facetadas dos grãos e portanto, fratura intergranular. Por

essas imagens também é possível verificar a presença de diferentes inclusões, juntamente com regiões dendríticas, que podem levar a uma menor tenacidade, que implica na aceleração da trinca e em menores tamanhos críticos que podem levar a fatura catastrófica da peça analisada.

3.8 - Ensaio de Tenacidade a Fratura (K_{IC})

Os corpos de provas foram calculados segundo a norma E399 *Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{IC}* da ASTM. Para confecção destes corpos de prova, estes foram retirados de um bloco do material fornecido, teoricamente um 7075, usinado em uma fresadora para atingir as dimensões citadas acima (12,53 x 60 x 6,27 mm), em seguida foi feito um entalhe no meio dos corpos de prova, usando uma fresa Woodruff, ocupando 45% da altura dos corpos de provas, como pedido na Norma, para então ser lixado utilizando diversas lixas de granulometrias diferentes (220, 320, 600, 800, 1000 e 1200) e por último, para dar um bom acabamento, foi polido utilizando óxido de cromo. Após isso, o corpo de prova foi riscado 0,5 milímetros abaixo do entalhe efetuado, para abrir a trinca necessária para o teste.



Figura 59- Corpos de Provas Fraturados

O ensaio de K_{IC} foi realizado em uma máquina MTS Landmark e obtidos os seguintes parâmetros:

- a) Corpo de Prova 1
 - $P_Q = P_s = 1117,1 \text{ N}$;
 - $P_{m\acute{a}x} = 1139,66 \text{ N}$



Figura 60- Corpo de Prova 1 após o primeiro ensaio.

b) Corpo de Prova 2

- $P_Q = P_5 = 1225,41 \text{ N}$
- $P_{\text{máx}} = 1290,63 \text{ N}$



Figura 61 - Corpo de Prova 2 após a realização do ensaio.

Os parâmetros dos corpos de provas estão listados abaixo:

- Corpo de Prova 1

$$a_0 = 5,63 \text{ mm}$$

$$B = 6,18 \text{ mm}$$

$$W = 12,51 \text{ mm}$$

- Corpo de Prova 2

$$a_0 = 5,75 \text{ mm}$$

$$B = 6,16 \text{ mm}$$

$$W = 12,53 \text{ mm}$$

Os gráficos que serão descritos a seguir, foram obtidos através deste ensaio de K_{Ic} . Por meio destes gráficos é possível calcular o valor correspondente ao K_Q e assim, analisar se há a relação $K_Q = K_{Ic}$.

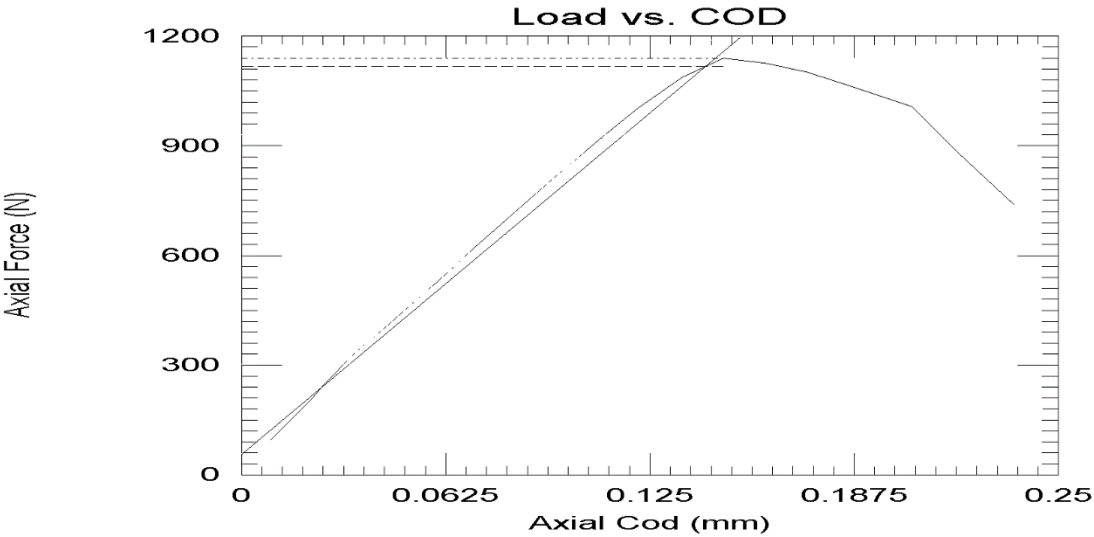


Figura 62- Gráfico do Carregamento pela Deflexão do primeiro corpo de prova.

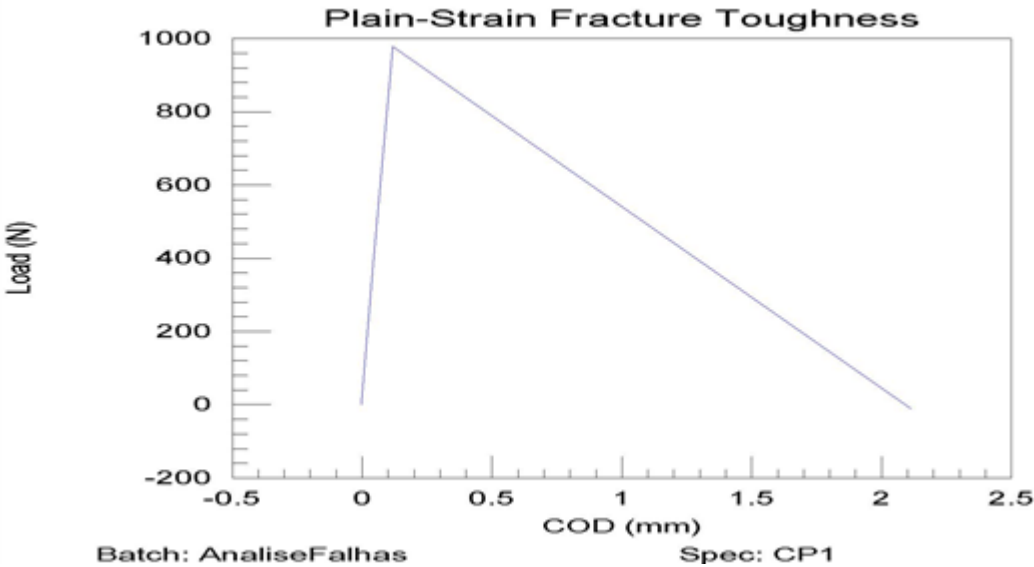


Figura 63 – Gráfico do Carregamento pela Tenacidade a Fratura do Plano do primeiro corpo de prova.

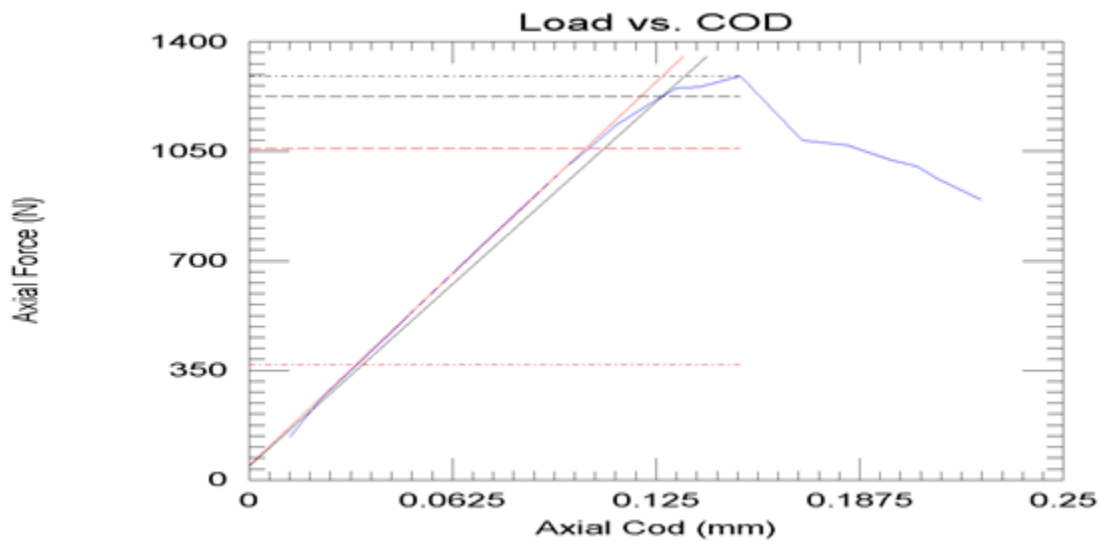


Figura 64- Gráfico do Carregamento pela Deflexão do segundo corpo de prova.

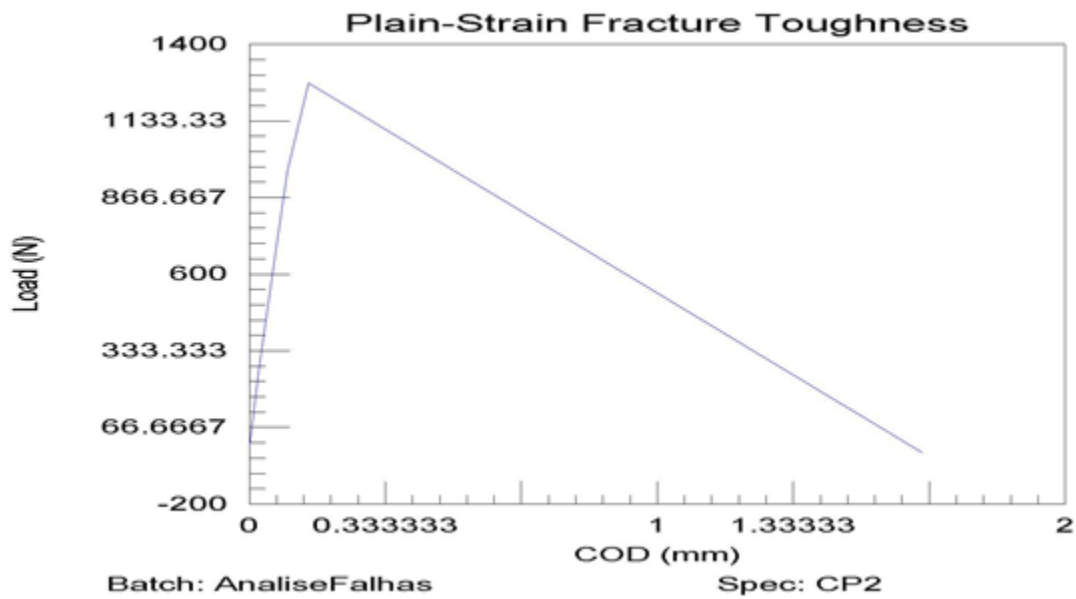


Figura 65 - Gráfico do Carregamento pela Tenacidade a Fratura do Plano do segundo corpo de prova.

Deve-se verificar, de início, se o ensaio é considerado válido para a Norma ASTM. Para isso, tem-se a seguinte condição:

$$P_{\text{máx}}/P_Q < 1,10$$

1. Corpo de Prova 1

- $P_{\text{máx}}/P_Q = 1139,66/1117,1 = 1,0202 < 1,10$

Para este caso, o ensaio é válido.

2. Corpo de Prova 2

- $P_{\text{máx}}/P_Q = 1290,63/1225,41 = 1,0532 < 1,10$

Para este caso, o ensaio é válido.

Para o próximo passo, se faz necessário determinar um valor válido de K_{IC} . Para isso, é necessário primeiro calcular o valor condicional, K_Q . O valor de K_Q para os CP1 e CP2 foi determinado após os ensaios, sendo:

1. Corpo de Prova 1

- $K_Q = 18,5559 \text{ MPa} \cdot (\text{m})^{1/2}$

2. Corpo e Prova 2

- $K_Q = 20,3151 \text{ MPa} \cdot (\text{m})^{1/2}$

A seguir, procede-se o cálculo do seguinte fator:

$2,5 \cdot (K_Q/\sigma_{YS})^2$, sendo σ_{YS} a tensão limite de escoamento. Portanto, o valor deste fator é dado por:

- CP1: 3,40227 mm
- CP2: 4,07796 mm

Este fator é necessário para verificar a veracidade das seguintes condições:

1. Corpo de Prova 1

- $a_0 > 2,5 \cdot (K_Q/\sigma_Y)^2$, onde $5,63 > 3,40227$
- $B > 2,5 \cdot (K_Q/\sigma_Y)^2$, onde $6,18 > 3,40227$
- $(W - a_0) > 2,5 \cdot (K_Q/\sigma_Y)^2$, onde $6,88 > 3,40227$

Conclusão: Todas as condições foram atendidas para o CP1.

2. Corpo de Prova 2

- $a_0 > 2,5 \cdot (K_Q/\sigma_Y)^2$, onde $5,75 > 4,07796$
- $B > 2,5 \cdot (K_Q/\sigma_Y)^2$, onde $6,16 > 4,07796$
- $(W - a_0) > 2,5 \cdot (K_Q/\sigma_Y)^2$, onde $6,78 > 4,07796$

Conclusão: Todas as condições foram atendidas para o CP2.

Como os requisitos foram todos satisfeitos, pode-se concluir que $K_Q = K_{IC}$, sendo o teste válido dentro da norma ASTM E399.

Todos os parâmetros foram determinados, portanto, permite-se concluir que o valor de K_Q determinado pode ser usado para estimar a tenacidade à fratura dos materiais ensaiados.

De acordo com o valor teórico do K_{Ic} para o alumínio 7075 T6 ($25 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), pode-se dizer que o resultado do ensaio ficou longe do teórico, sendo de $18,5559 \text{ MPa}\cdot(\text{m})^{1/2}$ para o corpo de prova 1 e $20,3151 \text{ MPa}\cdot(\text{m})^{1/2}$ para o corpo de prova 2.

Através de todos estes dados estabelecidos, conclui-se que o material em questão não correspondeu com o valor teórico. O valor calculado com os resultados do ensaio foi de $18,5559 \text{ MPa}\cdot(\text{m})^{1/2}$ para o K_{Ic} do corpo de prova 1 e de $20,3151 \text{ MPa}\cdot(\text{m})^{1/2}$ para o corpo de prova 2; já o valor teórico para o K_{Ic} do alumínio 7075 T6 é de $25 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, sendo assim, pode-se dizer que o material obteve uma resistência a fratura sob trinca muito baixa e insatisfatória.

3.9 – Análise de Dureza

Para uma análise relativa a dureza para este trabalho, foi realizado um ensaio de dureza do tipo Rockwell B (HRB) em três peças diferentes embutidas em um mesmo corpo de prova, submetido a um carregamento de 100kgf.

O corpo de prova embutido com estas três peças distintas está retratado na figura 68, seguinte. Através deste corpo de prova, foram realizados de três a quatro ensaios, para que por fim, fosse possível obter uma média. Estes dados estão retratados na tabela a seguir:

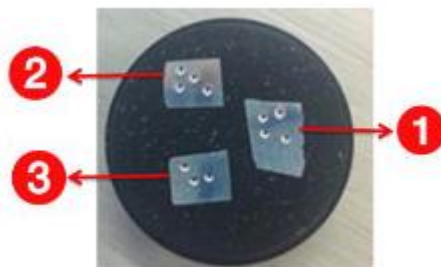


Figura 66 – Corpo de prova embutido com três peças distintas.

Tabela 10 - Valores das Durezas (HRB) e suas médias obtidos.

CP	1	2	3
durezas(hrb)	63,3	63,1	66,9
	62,9	67,9	68,7
	68,2	67,9	68,6
	descartada	67,9	
média	64,8	66,7	68,1

4 – Conclusão

Durante as análises de micrografia e do MEV foi possível localizar precipitados, vazios e inclusões que ocasionaram uma fragilização do material, especialmente nos contornos de grão, provavelmente ocasionada pelo tratamento de envelhecimento, conclusão suportada pela ruptura interdendrítica do material. A análise macrográfica permitiu avaliar o início da falha pela fratura frágil do dente número 5, região na qual já haviam sido observadas tensões elevadas na simulação em CAE, que ocasionou a falha consequente dos outros dentes devido à sobrecarga do sistema. A fratura teve início devido à fragilização do material, que promoveu valores de resistência menores que os teóricos.

5 – Recomendações

- Verificação da conformidade das propriedades do material recebido com as utilizadas em projeto, por meio da realização de ensaios mecânicos, possibilitando simulações com valores mais próximos do real.
- Quantificação das alterações rápidas de carregamento, como derrapagens e passagem sobre zebras afim de especificar um valor de tenacidade para a aplicação.
- Utilização de material com histórico de processamento diferente ou que não necessite de envelhecimento para fornecer as propriedades requeridas, evitando a fragilização dos contornos de grão.