



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CENTRO TECNOLÓGICO

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

RENAN VALTER MAGNOL

**SOBRE O COMPORTAMENTO EM ABRASÃO DE CERÂMICOS E
METAIS DUROS E SUA CORRELAÇÃO COM A DUREZA E A
TENACIDADE À FRATURA**

Vitória, ES

2023



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CENTRO TECNOLÓGICO

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

RENAN VALTER MAGNOL

**SOBRE O COMPORTAMENTO EM ABRASÃO DE CERÂMICOS E
METAIS DUROS E SUA CORRELAÇÃO COM A DUREZA E A
TENACIDADE À FRATURA**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Cherlio Scandian.

Vitória, ES

2023

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

M198s Magnol, Renan Valter, 1991-
Sobre o comportamento em abrasão de cerâmicos e metais
duros e sua correlação com a dureza e a tenacidade à fratura /
Renan Valter Magnol. - 2023.
179 f. : il.

Orientador: Cherlio Scandian.
Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Tribologia. 2. Atrito. 3. Desgaste mecânico. 4. Material
cerâmico. I. Scandian, Cherlio. II. Universidade Federal do
Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 621



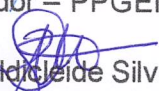
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
CENTRO TECNOLÓGICO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

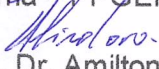
SOBRE O COMPORTAMENTO EM ABRASÃO DE CERÂMICOS E METAIS DUROS E SUA CORRELAÇÃO COM A DUREZA E A TENACIDADE À FRATURA

RENAN VALTER MAGNOL

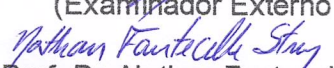
COMISSÃO EXAMINADORA


Prof. Dr. Cherlio Scandian
(Orientador – PPGEM/UFES)


Profª. Drª. Valdeleide Silva e Mello
(Examinadora Interna – PPGEM/UFES)


Prof. Dr. Amilton Sinatora
(Examinador Externo – USP)


Prof. Dr. José Daniel Biasoli de Mello
(Examinador Externo – UFU)


Prof. Dr. Nathan Fantecelle Strey
(Examinador Externo – DEM/UFES)

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica da Universidade Federal do
Espírito Santo como parte dos requisitos necessários à
obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica

Vitória/ES, 19 de dezembro de 2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a Nossa Senhora Aparecida, por me darem forças;

Ao meu orientador, Prof. Dr. Cherlio Scandian, pela amizade e pelos 9 anos de ensinamentos acadêmicos e filosóficos;

Aos Professores Doutores, José Daniel Biasoli de Mello e Amilton Sinatora, pela disposição e pelas discussões esclarecedoras;

Ao Prof. Dr. Nathan, pelas orientações e longuíssima amizade;

A Dr^a. Valdicleide Silva e Mello pelo companheirismo e amizade;

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFES, especialmente a Andréia pela disposição e simpatia;

Ao pessoal do LFS-USP, especialmente ao Thiago Gatti e ao Raphael Ferreira;

Aos meus grandes amigos e alunos de iniciação científica que colaboraram muito para a realização deste trabalho, Paulo Victor Vieira Pinto (PV) e Arthur Frasson Pretti (Bonitão);

Aos meus amigos do TRICORRMAT, especialmente Carlinhos, Rubão e Manu;

A todos os meus amigos;

Aos meus pais, Amarildo e Aparecida, à minha irmã, Mimi e aos meus familiares pelo apoio incondicional;

A CAPES pelo apoio financeiro;

Ao meu grande amor, Aline, por todo o apoio, amor e companheirismo durante esta longa caminhada.

RESUMO

O desgaste abrasivo é responsável por grandes perdas econômicas e energéticas globais, sendo que, um grupo de materiais, de alta tenacidade e dureza, conhecido como metais duros é comumente empregado para em situações onde esse tipo de desgaste é dominante. Contudo, esses materiais são de elevado custo e sua susceptibilidade à corrosão é vastamente reportada na literatura, inclusive, neste trabalho, foi mostrado que esses materiais não só estão sujeitos à degradação originária da corrosão, mas também, que um líquido ativo com a superfície (corrosivo) pode facilitar a fratura frágil. Já os materiais cerâmicos, o quais já apresentaram relativo sucesso em aplicações abrasivas, têm menor custo, possuem alta dureza e resistência à corrosão, apesar de tenacidade à fratura menor, quando comparados aos metais duros. Dessa forma, a fim de realizar um estudo sistemático desses materiais quando em desgaste abrasivo, materiais cerâmicos e amostras de metal duro com diferentes percentuais de cobalto foram caracterizados em relação à densidade, dureza, microestrutura e tenacidade à fratura via indentação e, também, tribologicamente, por meio de ensaios de mono e multieventos abrasivos, sendo os resultados dos ensaios correlacionados com a dureza, tenacidade e a quantidade clássica de Evans e Wilshaw ($H^{1/2} K_C^{3/4}$) utilizada para prever o comportamento de materiais cerâmicos sob o tipo de desgaste em questão. Como resultado, os materiais cerâmicos apresentaram melhor desempenho em situações de moderada severidade, o oposto ocorreu com os metais duros que, considerando sua maior susceptibilidade à corrosão e custo, a substituição desses materiais por cerâmicos nessas situações pode ser viável. Os ensaios de riscamento com indentador Vickers e os ensaios tipo roda de borracha apresentaram correlações razoáveis com a tenacidade à fratura via indentação e com a quantidade $H^{1/2} K_C^{3/4}$. Já quanto a dureza, esta não apresentou qualquer correlação com volume de matéria removida em nenhum dos ensaios aqui estudados. Alta dispersão dos dados foi observada, sendo assim, previsões de comportamento para materiais com propriedades mecânicas próximas se tornam difíceis de serem realizadas.

Palavras-chave: cerâmicos de engenharia, metal duro, desgaste abrasivo, ensaio roda de borracha horizontal a seco, ensaio de riscamento, múltiplas indentações, tenacidade à fratura via indentação.

ABSTRACT

Abrasive wear is responsible for large global economic and energy losses, whereas a group of materials, with high toughness and hardness, known as hard metals, is commonly used in situations where this type of wear is dominant. However, these materials are expensive and their susceptibility to corrosion is widely reported in the literature, moreover, in this work, it was shown that these materials are not only subject to degradation due to corrosion, but also that an active liquid with the surface (corrosive) can facilitate brittle fracture. Ceramic materials, which have already shown relative success in abrasive applications, are more cheap, have high hardness and corrosion resistance, despite lower fracture toughness, when compared to hard metals. Thus, in order to carry out a systematic study of these materials when undergoing abrasive wear, ceramic materials and hard metal samples with different percentages of cobalt were characterized in relation to density, hardness, microstructure and fracture toughness via indentation and also tribologically, through mono and multi-event abrasive tests, with test results being correlated with hardness, toughness and the classic Evans and Wilshaw quantity ($H^{1/2} K_C^{3/4}$) used to predict the behavior of ceramic materials under this type of wear. As a result, ceramic materials performed better in mild situations, the opposite occurred with hard metals which, considering their greater susceptibility to corrosion and cost, replacing these materials with ceramics in these situations may be viable. The Vickers indenter scratch tests and the dry sand/rubber wheel tests showed reasonable correlations with the fracture toughness via indentation and with the quantity $H^{1/2} K_C^{3/4}$. As for hardness, it did not show any correlation with the volume of material removed in any of the tests studied. High data dispersion was observed, therefore, behavior predictions for materials with similar mechanical properties become difficult to make.

Keywords: engineering ceramics, hardmetal, abrasive wear, dry sand/rubber wheel, scratch test, multiple indentations, indentation fracture toughness.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
H	Dureza
K_{Ic}	Tenacidade à fratura
E	Módulo de elasticidade
pH	Potencial Hidrogeniônico
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
R^2	Coeficiente de determinação
SQT	Soma dos Quadrados Total
SQE	Soma dos Quadrados dos Erros
ρ	Densidade
IQR	Amplitude interquartil
Q_1	Primeiro quartil
Q_3	Terceiro quartil

L_{sup}	Limite superior
L_{inf}	Limite inferior
$\bar{X}$	Média
ZTA	Alumina tenacificada com Zircônia
K_{Ic}	Tenacidade à fratura
K_C	Tenacidade à fratura via indentação
H_V	Dureza Vickers
a	Metade da diagonal da impressão
c	Comprimento da trinca
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ISE	<i>Indentation Size Effect</i>
PSR	<i>Proportional Specimen Resistance Model</i>
RISE	<i>Reverse Indentation Size Effect</i>
n	Expoente da Lei de Meyer

LCSM	Laboratório de Caracterização de Superfície e Materiais
DS	Grau de superposição
SW	Largura da indentação
DI	Distância entre indentações
β	Zona plástica relativa
b	Raio da zona plástica
a	Raio da indentação
p	Pressão de contato
ν	Coeficiente de Poisson
d	Diagonal da indentação
2ψ	Ângulo entre as faces do indentador
N_p	Número de abrasivos no contato
W	Fluxo de abrasivos
x	Comprimento do contato

v	Velocidade de deslizamento relativa
mp	Massa de uma partícula abrasiva
AFS	<i>American Foundry Society</i>
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
TRICORRMAT	Laboratório de Tribologia, Corrosão e Materiais

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Desgaste a dois (A) e três corpos (B). Fonte: Zum Gahr (1987).....	26
Figura 2. Micromecanismos presentes de desgaste abrasivo: (a) microsulcamento; (b) microcorte; (c) microfadiga; (d) microtrincamento. Fonte: Zum Gahr (1987).	27
Figura 3. Tipos de trincas formadas durante o deslizamento de materiais cerâmicos. Fonte: Kato (1990). Nota: Adaptado pelo autor.	29
Figura 4. Processo de propagação da trinca no nitreto de silício. A: trincamento inicial. B: propagação da trinca. C: remoção da partícula de desgaste em forma de flocos (<i>flake-like</i>). D: Superfície de desgaste após a remoção da partícula. Fonte: Kato (1990). Nota: Adaptado pelo autor.	30
Figura 5. <i>Flake-formation</i> em menor magnificação no carbeto de silício. Fonte: Kato (1990). Nota: Adaptado pelo autor.	30
Figura 6. (a) Correlação entre a resistência ao desgaste na abrasão a dois corpos e a quantidade $K_{IC}^{3/4}H^{1/2}$ para vários materiais cerâmicos (EVANS e WILSHAW, 1976 <i>apud</i> HUTCHINGS, 2017). (b) Resistência ao desgaste abrasivo relativa em função da dureza Vickers para diversos cerâmicos de engenharia, avaliada no ensaio pino-lixo (ZUM GAHR, 1987). Nota: Adaptado pelo autor.....	31
Figura 7. Ângulo de contato para todos os materiais e condições. Fonte: Autor.....	33
Figura 8. Redução da tenacidade à fratura via indentação devido à presença de meios líquidos ativos com a superfície. Fonte: Autor.....	34
Figura 9. Comparação entre a severidade da fratura nos riscos com indentador Vickers na presença de meios líquidos (pH 2, 6 e 10) e a seco. Fonte: (MAGNOL, et. al, 2021). Nota: Adaptado pelo autor.....	35
Figura 10. Variação de y em relação a x. (a) dados onde toda a variação é explicada, (b) dados para os quais a maior parte da variação é explicada, (c) dados para os quais pouca variação é explicada. Fonte: (DEVORE, 2014). Nota: Adaptado pelo autor...	38
Figura 11. Comparação entre as correlações entre a dureza (H), a tenacidade à fratura (K_{IC}) e as quantidades: " $K_{IC}^{3/4}H^{1/2}$ ", " $H^2.K_{IC}.E^{-5/4}$ " e a resistência ao desgaste (inverso do volume perdido) para os ensaios roda de borracha encontrados na literatura. Fonte: Gee (1999); Medvedovski (2001) e Medvedovski (2006). Nota: Adaptado pelo autor.	39

Figura 12. Primeira classificação dos cerâmicos segundo o índice de mérito (dureza). Fonte: (CES Edupack Granta Design Versão educativa, 2019). Nota: Adaptado pelo autor.	40
Figura 13. Resistência qualitativa em meios ácidos dos compósitos e cerâmicos. Fonte: (CES Edupack Granta Design Versão educativa, 2019). Nota: Adaptado pelo autor.	41
Figura 14. Resistência qualitativa em meios alcalinos dos compósitos e cerâmicos. Fonte: (CES Edupack Granta Design Versão educativa, 2019). Nota: Adaptado pelo autor.	41
Figura 15. Influência do pH no desgaste de diversos tipos de metal duro (WC-Co) para o ensaio roda de borracha. Fonte: (GANT, GEE e MAY, 2004). Nota: Adaptado pelo autor.	42
Figura 16. Classificação final dos cerâmicos. Fonte: (CES Edupack Granta Design Versão educativa, 2019). Nota: Adaptado pelo autor.	43
Figura 17. Gráfico tipo <i>boxplot</i> das amostras de CR_B4C, EG_ZTA e CT_ZTA. Onde as linhas no intervalo são os valores máximo e mínimo encontrados. A fronteira inferior e a superior da caixa representam respectivamente o 1° e o 3° quartil, a linha central representa a mediana, o “X” a média e o ponto os <i>outliers</i> . Fonte: autor.	46
Figura 18. Comparação entre a dureza medida na MC_ZTA e a dureza estimada pelas equações de Meyer (A) e do PSR modificado (B). Fonte: autor.	54
Figura 19. Correlação entre dureza medida e dureza calculada pelas equações de Meyer (A) e do PSR modificado (B), para a amostra MC_ZTA. Fonte: autor.	55
Figura 20. Micrografia eletrônica de varredura (MEV) das amostras de metal duro com 6 e 11% de cobalto após ataque com nital 2% e Murakami. Fonte: (MAGNOL <i>et al.</i> , 2021). Nota: Adaptado pelo autor.	57
Figura 21. Micrografia óptica (MO) da amostra MC_SiC após ataque. Fonte: (VANELLI, 2019). Nota: Adaptado pelo autor.	58
Figura 22. MEV das amostras de alumina com 96% de pureza após ataque com ácido fosfórico. Fonte: autor.	59
Figura 23. MEV das amostras de alumina com 99% de pureza após ataque com ácido fosfórico. Fonte: autor.	60
Figura 24. Desenho esquemático da unidade de esclerometria retilínea. Fonte: (CETR, 2009; MAGNOL, 2018).	62

Figura 25. Desenho esquemático apresentando a metodologia dos ensaios de indentações múltiplas lineares variando o grau de superposição. Onde, IW = largura da indentação, DI = distância entre indentações e DS = grau de superposição. Fonte: autor.	63
Figura 26. Desenho esquemático apresentando a metodologia dos ensaios de indentações múltiplas em área variando o grau de superposição. Fonte: autor.	64
Figura 27. Análise tridimensional da superfície da amostra HI_WC6Co – Grau de superposição de -100%. Fonte: autor.	65
Figura 28. Análise tridimensional da superfície da amostra MC_SiC – Graus de superposição de -200% e -100%. Fonte: autor.	66
Figura 29. Medição do volume no grau de superposição de 50% da amostra HI_WC7Co. Fonte: autor.	67
Figura 30. HI_WC6Co – 50 N - Alteração da direção e sentido das trincas radiais (setas brancas) a partir de -100%. Fonte: autor.	68
Figura 31. Graus de superposição (-75% e -50%) em três diferentes cargas normais (15, 25 e 50 N) na amostra HI_WC6Co. Fonte: autor.	69
Figura 32. Graus de superposição (-500%, -200%, -100% e -75%) em diferentes cargas normais (15 e 50 N) na amostra MC_Qtz. A ampliação é menor nos ensaios sob carga de 50 N afim de possibilitar a visualização de uma maior quantidade de graus de superposição. Fonte: autor.	69
Figura 33. Ensaios de múltiplas indentações colineares e em área no carbetto de silício (MC_SiC). Nota: A ampliação é menor na imagem das múltiplas indentações em área afim de possibilitar a visualização de uma maior quantidade de graus de superposição. Fonte: autor.	70
Figura 34. Comportamento da amostra HI_WC6Co nos ensaios de múltiplas indentações em área sob carga de 50 N. Fonte: autor.	71
Figura 35. MC_ZrO2 - 50 N - Comportamento plástico e supressão do trincamento na indentação central, similar a amostra de metal duro. Fonte: autor.	72
Figura 36. MC_Qtz – 50 N – Supressão do trincamento e trincamento moderado (quando comparado à MC_SiC) no quartzo.	72
Figura 37 – Esquema apresentando a zona plástica abaixo da indentação na amostra de carbetto de tungstênio com 6% de cobalto no grau de superposição de -100%. Fonte: autor.	74

Figura 38. Comportamento da amostra HI_WC11Co nos ensaios de múltiplas indentações em área sob carga de 50 N. Fonte: autor.	75
Figura 39. MC_TiO ₂ – 50N – Trincamento além da região dos ensaios a partir de -200%. Fonte: autor.	75
Figura 40. MC_Al96 – 50 N - Trincamento moderado na alumina com 96% de pureza. Fonte: autor.	76
Figura 41. Trincamento contido à região dos ensaios no grau de superposição de -100% na amostra DC_AL99. Fonte: autor.	76
Figura 42. MC_ZTA – 50 N – Destacamento de material restrito a região das indentações (setas vermelhas). Fonte: autor.	77
Figura 43. Comportamento do carbetto de boro (CR_B4C), durante os graus de superposição de -200% e -100%. Fonte: autor.	78
Figura 44. Comparação entre os resultados quantitativos dos ensaios de múltiplas indentações colineares e em área. Fonte: autor.	79
Figura 45. Variação do volume com o grau de superposição para todos os materiais estudados nos ensaios de múltiplas indentações em área. Fonte: autor.	80
Figura 46. Log do volume do dano total nos ensaios de múltiplas indentações em área. Fonte: autor.	81
Figura 47. Correlação entre a tenacidade, a dureza, a quantidade $H^{1/2}K_C^{3/4}$ e o inverso do volume do dano dos materiais estudados, inclusive os metais duros. Fonte: autor.	82
Figura 48. Log do volume do dano no grau de superposição de -100% nos ensaios de múltiplas indentações em área. Fonte: autor.	83
Figura 49. Log do volume do dano nos graus de superposição de 0% e 75% nos ensaios de múltiplas indentações em área. Fonte: autor.	84
Figura 50. MEV de riscos com indentador Rockwell. (A) SiC-TiB ₂ apresentando trincamento de longo alcance sob carga normal de 80 N. (B) SiSiC apresentando trincamento de curto alcance sob carga normal de 30 N. (C) SiC apresentando fratura frágil catastrófica sob carga de 80 N. (D) Si ₃ Ni ₄ -SiC apresentando comportamento dúctil sob carga de 60N. Fonte: (Axén, Kahlman e Hutchings, 1997). Nota: Adaptado pelo autor.	87
Figura 51. Micrografia óptica de riscos com indentador Rockwell em diferentes tipos de zircônia. (A) comportamento puramente dúctil. (B) sulcamento com trincamento em	

forma de escamas no interior. Fonte: (KUN LEE <i>et al.</i> , 2000). Nota: Adaptado pelo autor.	87
Figura 52. Área da seção transversal média do fundo do risco (vermelho) e dos <i>ridges</i> (verde) na amostra HI_WC6Co. Fonte: autor.	89
Figura 53. Atrito e mecanismos de desgaste na amostra HI_WC6Co com indentador Rockwell. Fonte: autor.	90
Figura 54. Aumento da deformação plástica com aumento do percentual de cobalto nas amostras de metal duro. Fonte: autor.	91
Figura 55. Resposta ao riscamento das ZTA's nas maiores cargas. Fonte: autor. ...	92
Figura 56. Comportamento típico das ZTA's exemplificado pela EG_ZTA. Fonte: autor.	93
Figura 57. Resposta ao riscamento das aluminas com 96% de pureza nas maiores cargas. Fonte: autor.	94
Figura 58. Resposta ao risco, em cargas intermediárias, das aluminas com 99% de pureza. Fonte: autor.	95
Figura 59. Fraturas intergranulares (setas vermelhas) e transgranulares (setas brancas) na MC_AL99. Fonte: autor.	96
Figura 60. Similaridades entre as amostras de quartzo e carbetos de silício nos ensaios com indentador Rockwell no início do risco (esquerda) e no final (direita). Fonte: autor.	97
Figura 61. Comportamento da titânia e do carbetos de boro nas maiores cargas com indentador Rockwell. Fonte: autor.	97
Figura 62. Volume perdido médio e desvio padrão após os ensaios de riscamento com indentador Rockwell C. Fonte: autor.	98
Figura 63. Análise do volume perdido em cada etapa do risco (2 a 33,7N – 33,7 a 66,7 N – 66,7 a 102 N) com indentador Rockwell. Fonte: autor.	99
Figura 64. Correlação entre a tenacidade, a dureza, a quantidade $H^{1/2}K_C^{3/4}$ e o inverso do volume perdido dos materiais estudados, exceto os metais duros. Fonte: autor.	100
Figura 65. Comparação entre ensaios com indentador Rockwell e Vickers no mesmo material, DC_AL99. A carga normal nesse trecho do risco com indentador Rockwell era, aproximadamente, 70 N, já no Vickers, em torno de 0,5 N.	102
Figura 66. Deformação plástica na zircônia mesmo nas maiores cargas com indentador Vickers.	103

Figura 67. Volume perdido médio e desvio padrão após os ensaios de riscamento com indentador Vickers. Fonte: autor.	103
Figura 68. Análise do volume perdido em cada etapa do risco (0,2 a 1,8 N – 1,8 a 3,5 N – 3,5 a 5,2 N) com indentador Vickers. Fonte: autor.	104
Figura 69. Correlação entre a tenacidade, a dureza, a quantidade $H^{1/2}K_c^{3/4}$ e o inverso do volume perdido dos materiais estudados, exceto os metais duros. Fonte: autor.	105
Figura 70. Representação esquemática do equipamento para ensaios roda de borracha. Fonte: (ASTM G65-16 (2021)). Nota: adaptado pelo autor.	107
Figura 71. Representação esquemática do equipamento para ensaios tipo roda de borracha modificado. Fonte: (STEVENSON, A. N. J.; HUTCHINGS, 1996). Nota: Adaptado pelo autor.	108
Figura 72. Superfície desgastada na alumina (Vitox) após ensaio tipo roda de borracha a seco (ASTM G65). Fonte: (GEE, 1999). Nota: adaptado pelo autor.	109
Figura 73. Remoção do metal ligante em amostras de metal duto com granulometria grosseira (esquerda) e fina (direita) em ensaios tipo roda de borracha a seco. Fonte: (GEE, GANT e ROEBUCK, 2007). Nota: adaptado pelo autor.....	109
Figura 74. Desenho esquemático do abrasômetro roda de borracha horizontal utilizado. Fonte: (PAIVA, 2021). Nota: adaptado pelo autor.....	110
Figura 75. Variação da taxa de desgaste com a carga normal (esquerda) e com a velocidade tangencial da roda (direita). Fonte: (Stevenson e Hutchings, 1996). Nota: Adaptado pelo autor.	113
Figura 76. Volume perdido médio e desvio padrão após os ensaios roda de borracha horizontal segundo o procedimento B na norma ASTM G5. Fonte: autor.....	115
Figura 77. MEV – Riscamento nas amostras de metal dura em baixas magnificações (100X) e destacamento frágil em maiores ampliações (5000X). Fonte: autor.....	116
Figura 78. MEV – Riscamento e destacamento frágil de matéria nas ZTA's em menores aumentos (100X). Fonte: autor.....	117
Figura 79. MEV – Aspecto frágil das ZTA's em maiores magnificações (2000X). Fonte: autor.	118
Figura 80. MEV – Riscamento plástico nas zircônias em 100 e em 2000X. As setas vermelhas foram posicionadas no centro dos riscos e indicam o sentido destes. Fonte: autor.	120

Figura 81. MEV – Microriscamento bem definido nas aluminas no aumento de 100x, a exceção da MC_AL99. Fonte: autor.....	122
Figura 82. MEV – Destacamento de matéria nas aluminas e regiões facetas (setas vermelhas) na MC_AL99. Fonte: autor.	123
Figura 83. MEV – Trincamento intergranular e possível <i>Flake formation</i> na MC_AL99. Fonte: autor.....	124
Figura 84. MEV – Riscamento na CT_AL96 e remoção de material generalizada na EG_AL96 e MC_AL96. Aumento: 100X. Fonte: autor.....	126
Figura 85. Destacamento de material de maneira frágil resultando em regiões facetadas na CT_AL96 e MC_AL96 e ausências dessas regiões mais frágeis na EG_AL96. Fonte: autor.	126
Figura 86. MEV – Dominância de mecanismos frágeis no carbetto de boro em várias magnificações. Fonte: autor.	128
Figura 87. MEV - Sulcamento plástico no carbetto de boro (CR_B ₄ C) apesar de comportamento majoritariamente frágil. Fonte: autor.....	129
Figura 88. Correlação entre a tenacidade, a dureza, a quantidade $H^{1/2}Kc^{3/4}$ e o inverso do volume perdido dos materiais puramente cerâmicos. Fonte: autor.	130
Figura 89. Correlação entre a tenacidade, a dureza, a quantidade $H^{1/2}Kc^{3/4}$ e o inverso do volume perdido dos materiais puramente cerâmicos, exceto a MC_ZTA. Fonte: autor.	131
Figura 90. Correlação entre a tenacidade, a dureza, a quantidade $H^{1/2}Kc^{3/4}$ e o inverso do volume perdido dos materiais estudados, inclusive os metais duros. Fonte: autor.	131
Figura 91. Correlações entre os resultados do ensaio roda de borracha horizontal e os ensaios de riscamento e múltiplas indentações apenas para materiais puramente cerâmicos. Fonte: autor.....	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades mecânicas e volume perdido nos ensaios de abrasão tipo roda de borracha (ASTM G65). Fonte: autor.....	37
Tabela 2. Nomenclatura utilizada e material das amostras ensaiadas. As siglas (HI, MC, CT, DC, EG e CR) representam os diferentes fabricantes. Fonte: autor.	44
Tabela 3. Medidas de densidade das amostras. Fonte: Autor, *Gatti (2023), ** Strey (2015).....	47
Tabela 4. Valores de tenacidade obtidos e comparação com valores encontrados na literatura. Fonte: autor, *Vaneli (2019).....	49
Tabela 5. Dureza dos materiais estudados (média e desvio padrão) em cinco cargas normais: 25, 50, 100, 200 e 1000 gf. Fonte: Autor, * Strey (2015), **Vanelli (2019). Obs ¹ : Referente a carga normal de 500 gf.	52
Tabela 6. Valores de correlação R^2 entre a dureza medida e as durezas estimadas pela equação de Meyer e do PSR modificado. Fonte: autor.	56
Tabela 7. Resumo dos valores de R^2 das correlações com propriedades relevantes ao comportamento tribológico nos ensaios de múltiplas indentações em área. Fonte: autor.	85
Tabela 8. Resumo dos valores de R^2 das correlações com propriedades relevantes ao comportamento tribológico nos ensaios com indentador Rockwell. Fonte: autor.	100
Tabela 9. Principais resultados obtidos nos ensaios de esclerometria linear com o indentador de diamante Rockwell C. Fonte: autor.....	101
Tabela 10. Resumo dos valores de R^2 das correlações com propriedades relevantes ao comportamento tribológico nos ensaios com indentador Vickers. Fonte: autor..	105
Tabela 11. Principais resultados obtidos nos ensaios de esclerometria linear com o indentador de diamante Vickers. Fonte: autor.....	106
Tabela 12. Resultados obtidos em laboratório e comparação com a norma ASTM G65. Fonte: autor.	111
Tabela 13. Cargas por partícula estimadas pela equação de Stevenson e Hutchings (1996). Fonte: autor.....	114
Tabela 14. Volume perdido e propriedades relevantes das ZTA's. *Durezas estimadas para a carga por partícula calculada. Fonte: autor.	118

Tabela 15. Volume perdido e propriedades relevantes das Zircônias. Fonte: autor.	121
Tabela 16. Volume perdido e propriedades relevantes das Aluminas com 99% de pureza. Fonte: autor.	125
Tabela 17. Volume perdido e propriedades relevantes das Aluminas com 96% de pureza. Fonte: autor.	127
Tabela 18. Resumo das correlações entre o inverso do volume perdido ou do dano total e as propriedades H , K_C e $H^{1/2}K_C^{3/4}$. Fonte: autor.	133
Tabela 19. Tenacidade à fratura via indentação, utilizando a equação de Evans e Charles (1976), dureza e respectiva carga normal ensaiada.	144
Tabela 20. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra MC_ZTA. Fonte: Autor.	149
Tabela 21. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra EG_ZTA. Fonte: Autor.	150
Tabela 22. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra CT_ZTA. Fonte: Autor.	152
Tabela 23. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra DC_ZTA. Fonte: Autor.	153
Tabela 24. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra CT_ZrO2. Fonte: Autor.	154
Tabela 25. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra MC_ZrO2. Fonte: Autor.	156
Tabela 26. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra DC_ZrO2. Fonte: Autor.	157
Tabela 27. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra EG_AL99. Fonte: Autor.	158
Tabela 28. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra CT_AL99. Fonte: Autor.	160
Tabela 29. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra DC_AL99. Fonte: Autor.	161
Tabela 30. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra MC_AL99. Fonte: Autor.	162
Tabela 31. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra CT_AL96. Fonte: Autor.	164

Tabela 32. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra EG_AL96. Fonte: Autor.	165
Tabela 33. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra MC_AL96. Fonte: Autor.	166
Tabela 34. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra CR_B4C. Fonte: Autor.	167
Tabela 35. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra MC_SiC. Fonte: Autor.	169
Tabela 36. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra MC_SiC. Fonte: Autor.	170
Tabela 37. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra MC_TiO2. Fonte: Autor.	171
Tabela 38. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra HI_WC6Co. Fonte: Autor.	172
Tabela 39. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra HI_WC7Co. Fonte: Autor.	174
Tabela 40. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra HI_WC10Co. Fonte: Autor.	174
Tabela 41. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra HI_WC11Co. Fonte: Autor.	175
Tabela 42. Dados adicionais do ensaio roda de borracha: Massa antes e depois dos ensaios (cinco medições e média) e massa de areia recolhida pelo suporte (areia que passou pelo contato). Fonte: Autor.	177

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	24
2. DESGASTE ABRASIVO	26
2.1 DESGASTE ABRASIVO DE MATERIAIS CERÂMICOS.....	27
2.2 DESGASTE ABRASIVO NO METAL DURO (WC-CO).....	31
2.2.1 Influência de meios líquidos ativos no desgaste abrasivo e fratura do metal duro	32
3. SELEÇÃO DE MATERIAIS	36
4. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	44
4.1 NOMENCLATURA	44
4.2 DENSIDADE	45
4.2.1 Método.....	45
4.2.2 Resultados	46
4.3 TENACIDADE À FRATURA VIA INDENTAÇÃO.....	47
4.3.1 Método.....	48
4.3.2 Resultados	49
4.4 DUREZA	50
4.4.1 Lei de Meyer.....	50
4.4.2 PSR modificado	51
4.4.3 Método e Resultados.....	52
4.5 ANÁLISE MICROESTRUTURAL	56
5. ENSAIOS ABRASIVOS	61
5.1 ENSAIOS DE MÚLTIPLAS INDENTAÇÕES INSTRUMENTADO	61
5.1.1 Experimentos.....	61
5.1.1.1 Múltiplas indentações colineares	63

5.1.1.2	Múltiplas indentações em área.....	64
5.1.1.3	Avaliação do volume das indentações	64
5.1.2	Mecanismos de desgaste: múltiplas indentações colineares	67
5.1.3	Mecanismos de desgaste: múltiplas indentações em área	70
5.1.4	Múltiplas indentações: resultados quantitativos	78
5.2	ENSAIOS DE ESCLEROMETRIA LINEAR (ENSAIOS DE RISCAMENTO)	85
5.2.1	Experimentos	88
5.2.2	Ensaio com indentador Rockwell C: volume perdido, mecanismos de desgaste e atrito.....	89
5.2.3	Ensaio com indentador Vickers: volume perdido, mecanismos de desgaste e atrito.....	102
5.3	ENSAIOS COM O ABRASÔMETRO RODA DE BORRACHA HORIZONTAL	106
5.3.1	Experimentos	110
5.3.1.1	Ajustagem e calibração do abrasômetro roda de borracha.....	110
5.3.1.2	Validação do abrasômetro	111
5.3.1.3	Procedimento experimental.....	113
5.3.2	Resultados dos ensaios e mecanismos de desgaste	115
5.4	CONSIDERAÇÕES GERAIS E CORRELAÇÕES ENTRE ENSAIOS	132
6.	CONCLUSÕES	135
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	136
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137
	APÊNDICE A – DADOS DE TENACIDADE À FRATURA VIA INDENTAÇÃO MEDIDOS.....	144
	APÊNDICE B – DADOS DE DUREZA VICKERS MEDIDOS	149
	APÊNDICE C – DADOS ADICIONAIS DO ENSAIO RODA DE BORRACHA.....	177

1. INTRODUÇÃO

Desde o pioneiro relatório de Peter Jost em 1966, onde foi postulado que as perdas econômicas devido aos fenômenos tribológicos somavam 515 milhões de libras, o equivalente a 0,5% do PIB da Inglaterra, está claro que os prejuízos devido ao atrito e o desgaste são de grande impacto econômico e não podem ser negligenciados (DOWSON, 1979). Holmberg et al. (2017), em um estudo mais atualizado, ratifica que apenas as perdas devido ao desgaste implicam um prejuízo global de 680 bilhões de euros anualmente. Nesse mesmo trabalho, é apontado que na indústria que mais consome energia, a indústria mineral, as perdas econômicas por desgaste superam as perdas por atrito.

Está claro na literatura que o mecanismo de desgaste dominante na indústria mineral é o abrasivo. Nela, empregam-se diversos tipos de materiais para mitigar os danos relativos a esse tipo de desgaste (ZUM GAHR, 1987; SARE e CONSTANTINE, 1997; SPERO et al., 1991).

Dentre esses materiais, o metal duro se destaca devido à sua combinação única de alta resistência mecânica e tenacidade. Essas propriedades são oriundas de sua microestrutura que consiste de carbeto de tungstênio de alta dureza (WC) embebidos em uma matriz metálica dúctil, na maioria das vezes, cobalto puro (ANDREW, 1998; GEE *et al.*, 2017; ZUÑEGA, 2012; ZHENG, 2020.) Porém, diversos trabalhos apontam para susceptibilidade desses compósitos à corrosão, que pode ter efeito sinérgico com o desgaste, amplificando o dano nesses materiais (ZHENG, 2020; GANT *et al.*, 2004; ZHENG *et al.* 2019). Além disso, esses materiais possuem custo elevado quando comparado a outros materiais, podendo chegar a ser dez vezes maior em relação a cerâmicos puros (ASHBY, SHERCLIFF e CEBON, 2018).

Os materiais cerâmicos, devido às suas fortes ligações iônico-covalentes, são, por definição, muito duros e inertes quimicamente a maioria dos processos oxidativos e corrosivos à temperatura ambiente (CARTER e NORTON, 2007). No entanto, essa alta energia de ligação implica uma baixa plasticidade. Sendo assim, esses materiais falham, em geral, por fratura frágil. Entretanto, existe um grupo de materiais dentre os cerâmicos, chamados de cerâmicos de engenharia, que possuem alta resistência a propagação de trincas ou alta tenacidade à fratura, o que possibilitou o emprego

desses materiais em tribossistemas abrasivos (FREITAG, 1998; CHEN *et al.*, 2017; MULLIGAN e PATTERSON, 2017).

Neste trabalho, materiais cerâmicos selecionados através de critérios sistemáticos, juntamente com amostras de metal duro com diferentes percentuais de cobalto, serão caracterizados no que tange a densidade, microestrutura e propriedades mecânicas e, também, submetidos a ensaios de mono e multieventos abrasivos, quais sejam: múltiplas indentações, monoriscamento e ensaio tipo roda de borracha, visando compreender e comparar a resposta tribológica desses materiais nas diversas nuances do desgaste abrasivo e avaliar a possibilidade do emprego dos materiais cerâmicos em situações onde esse tipo de desgaste impera. Correlações entre os volumes do dano ou volumes perdidos e as propriedades mecânicas relevantes ao desgaste (dureza e tenacidade à fratura) e a quantidade de Evans e Wilshaw ($H^{1/2}KIC^{3/4}$), que, apesar de clássica, pouco foi aplicada na literatura, serão avaliadas em todos os ensaios e, quando possível, em diferentes parâmetros, como a carga normal e o grau de superposição.

Visando a dinâmica da leitura, no capítulo 2, serão realizadas revisões bibliográficas sucintas sobre o desgaste abrasivo, desgaste abrasivo de materiais cerâmicos e do metal duro. A partir do capítulo 3, cada capítulo terá revisão bibliográfica específica, juntamente com os resultados e discussões.

2. DESGASTE ABRASIVO

O desgaste abrasivo é caracterizado pela interação de superfícies com partículas duras, causadoras da remoção de matéria. Quanto ao tipo de movimento da partícula, o desgaste abrasivo pode ser classificado em dois corpos, que ocorre quando uma aspereza dura ou uma partícula abrasiva presa em uma superfície risca a outra durante o deslizamento, e em três corpos, quando as partículas de desgaste estão soltas e podem se movimentar entre as superfícies em deslizamento. Ambos casos são mostrados esquematicamente na Figura 1.

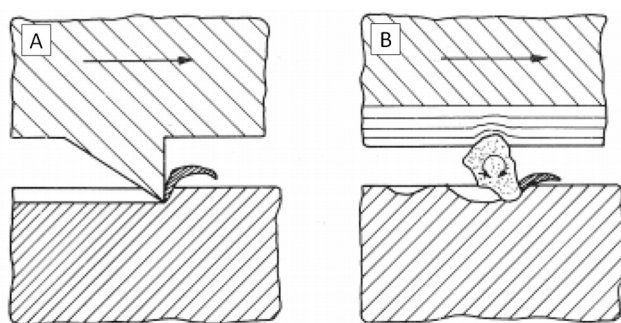


Figura 1. Desgaste a dois (A) e três corpos (B). Fonte: Zum Gahr (1987).

O desgaste abrasivo pode ainda ser classificado quanto ao nível de tensão no contato das partículas abrasivas com as superfícies. Na abrasão de alta tensão, o nível de tensão excede a resistência à fratura das partículas, enquanto que na abrasão de baixa tensão, as partículas não sofrem fratura durante o processo de desgaste. O termo *gouging* é empregado para classificar o desgaste causado por grandes partículas de abrasivo, resultando num desgaste acentuado da superfície, através da retirada de grandes fragmentos, como ocorre em britadores de mandíbulas. (HUTCHINGS, 2017; ZUM GAHR, 1987).

Diferentes micromecanismos podem estar presentes no desgaste abrasivo (Figura 2, ZUM GAHR, 1987):

- Microsulcamento: a passagem da partícula abrasiva não causa remoção de material, mas apenas deslocamento do mesmo por deformação plástica (Figura 2a);
- Microcorte: a remoção material da superfície é proporcional ao volume do abrasivo que a penetrou (Figura 2b);

- Microfadiga: a remoção de material ocorre por fadiga superficial de baixo ciclo, após deslocamentos sucessivos do material pela passagem do abrasivo (múltiplos microsulcos, Figura 2c);
- Microtrincamento: particularmente presente em superfícies de materiais frágeis, haverá o destacamento do material devido a formação e propagação das trincas (Figura 2d).

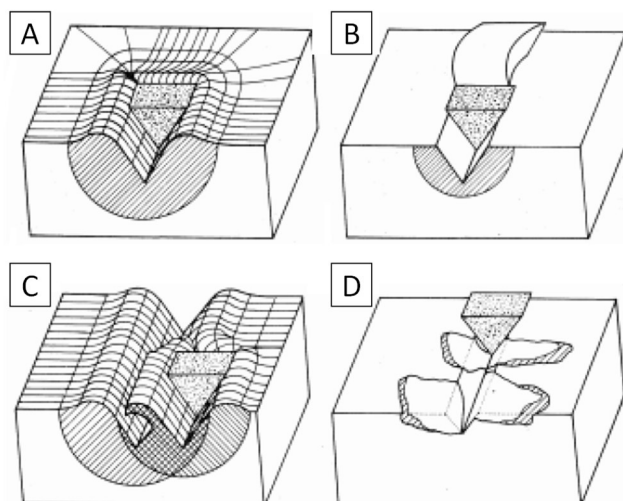


Figura 2. Micromecanismos presentes de desgaste abrasivo: (a) microsulcamento; (b) microcorte; (c) microfadiga; (d) microtrincamento. Fonte: Zum Gahr (1987).

2.1 DESGASTE ABRASIVO DE MATERIAIS CERÂMICOS

Os materiais cerâmicos utilizados em aplicações mecânicas de alta responsabilidade, conhecidos como cerâmicos de engenharia, apresentam alta dureza, baixa densidade, baixa porosidade, alta resistência mecânica em compressão e alta tenacidade à fratura (K_{IC} entre 5 e 15 MPa.m^{1/2}) quando comparados a materiais cerâmicos comuns. Além de outras aplicações, alguns cerâmicos de engenharia (como Al₂O₃, ZTA, ZrO₂, SiC e B₄C) são tipicamente utilizados em componentes onde alta resistência ao desgaste por deslizamento, abrasivo ou erosivo é necessária (CARTER e NORTON, 2007; STREY e SCANDIAN, 2017).

Na indústria da mineração, cerâmicos de engenharia vem sendo utilizados como alternativas à materiais metálicos, tais como os ferros fundidos brancos alto cromo, e materiais compósitos, como o metal duro (WC-Co). Um material já comercialmente utilizado é o carbetto de silício (SiC), empregado na indústria da mineração em válvulas, bombas e em liners de ciclones, devido sua alta resistência à abrasão e à

corrosão. Além disso, combinações de diferentes materiais cerâmicos podem resultar em propriedades otimizadas, reduzindo o tempo de troca de partes desgastadas. Um exemplo comercial é o uso de cerâmicas contendo SiC e alumina, Al_2O_3 , que são amplamente empregadas como revestimentos de chutes na indústria da mineração. Vale ressaltar que esse equipamento é submetido não somente a abrasão, mas, também, ao impacto, o que limitaria o uso de materiais cerâmicos, não fosse a maior tenacidade ao impacto destes materiais de engenharia. A combinação de materiais cerâmicos, nesse caso, aumenta a resistência à abrasão, à erosão, ao choque térmico e ao ataque químico (FREITAG, 1998).

Chen *et al.* (2017), investigando a resistência à abrasão de diferentes materiais utilizados como revestimentos de chute, observaram que os materiais cerâmicos perscrutados, SiC e três tipos de Al_2O_3 , exibiram menores taxas de desgaste em relação aos materiais metálicos. Dentre os cerâmicos, o SiC exibiu a maior resistência à abrasão, seguido pela alumina tenacificada com zircônia (ZTA).

Sabe-se que a resistência ao desgaste de materiais cerâmicos depende de vários fatores como o tamanho do grão, tensões residuais internas e macroscópicas, porosidade, dureza e tenacidade à fratura (WANG *et al.*, 2005). Sendo assim, atualmente, busca-se manipular tais fatores para otimizar o desempenho desses materiais em serviço, através da inserção de materiais de reforço, como a dopagem da zircônia com ítria e a da alumina com zircônia (CARTER e NORTON, 2007)

Tratando-se de desgaste de materiais frágeis, como é o caso dos cerâmicos, o micromecanismo de desgaste chamado de microtrincamento (Figura 2d) não pode ser negligenciado. A profundidade da penetração de uma partícula dura em uma superfície frágil depende da dureza do material a ser indentado (H) e pode resultar no trincamento dessa superfície. A extensão do trincamento dependerá da tenacidade à fratura do material (K_{IC}), das condições de carregamento e do tamanho e forma da partícula. Frequentemente, cerâmicos possuem defeitos em forma de microtrincas preexistentes ou poros, que amplificam fortemente as tensões aplicadas externamente. Diferentes tipos de trincas podem surgir durante o contato da partícula dura com a superfície do cerâmico, quais sejam: semi-cônicas, laterais, radiais e medianas (Figura 3).

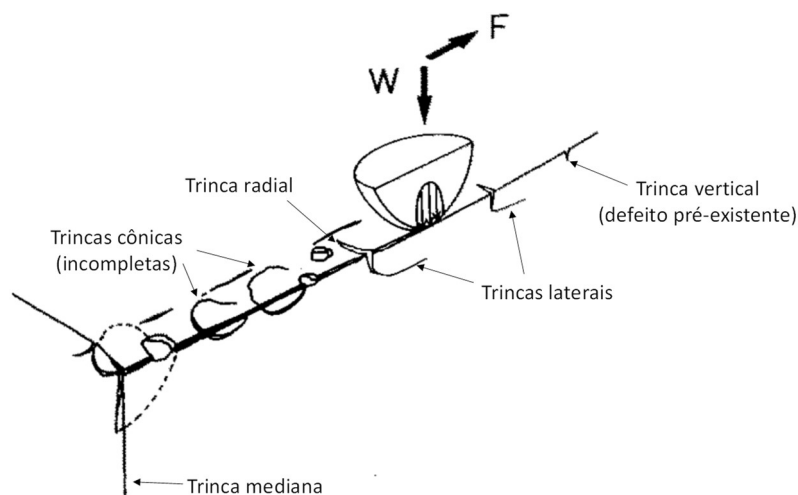


Figura 3. Tipos de trincas formadas durante o deslizamento de materiais cerâmicos. Fonte: Kato (1990). Nota: Adaptado pelo autor.

Microtrincas verticais geralmente estão presentes e são defeitos provenientes da fabricação do material e da preparação da superfície, por exemplo, os próprios contornos de grão ou microporosidades superficiais. Segundo Kato (1990), no estudo de cerâmicos no ensaio tipo pino-disco (pino de diamante e discos de carbetto e nitreto de silício), o mecanismo de desgaste mais severo acontece quando algumas dessas trincas se propagam e interceptam a superfície do material, mecanismo esse denominado de *flake formation* (Figura 4 e Figura 5).

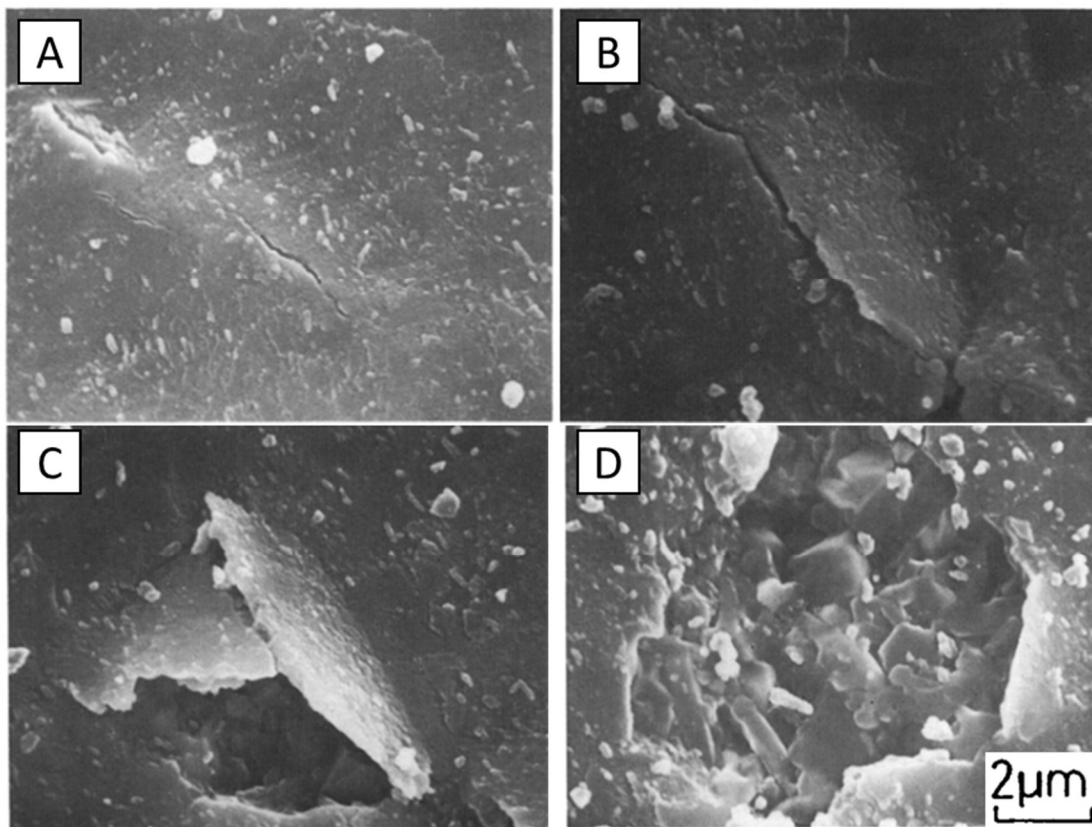


Figura 4. Processo de propagação da trinca no nitreto de silício. A: trincamento inicial. B: propagação da trinca. C: remoção da partícula de desgaste em forma de flocos (*flake-like*). D: Superfície de desgaste após a remoção da partícula. Fonte: Kato (1990). Nota: Adaptado pelo autor.

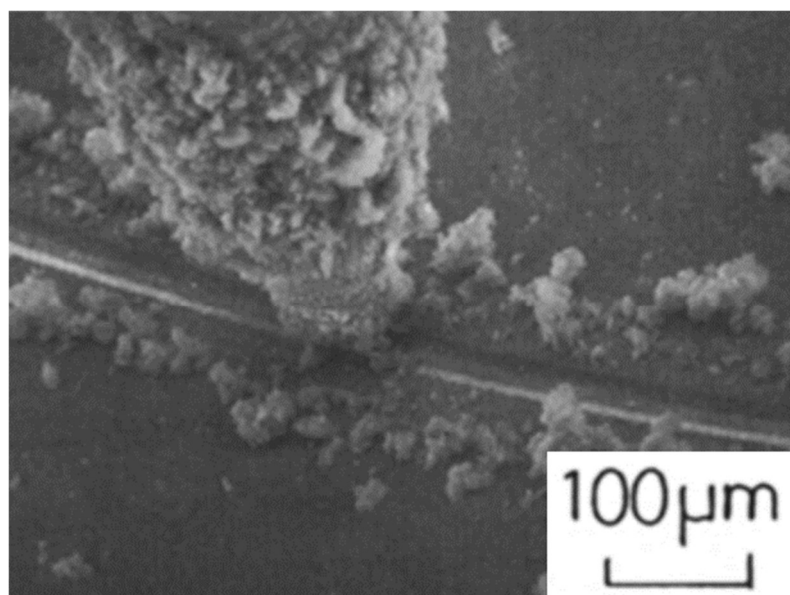


Figura 5. *Flake-formation* em menor magnificação no carbetto de silício. Fonte: Kato (1990). Nota: Adaptado pelo autor.

Diferentemente dos materiais metálicos, em que a taxa de desgaste, quando em abrasão, é relacionada à razão E/H, nos materiais cerâmicos não é observada essa

correlação. Experimentalmente, foi observado que em materiais cerâmicos submetidos a desgaste abrasivo a dois corpos dominado por fratura frágil, a taxa de desgaste relacionava-se com o produto $K_{IC}^{3/4}H^{1/2}$ (tenacidade à fratura elevada à $3/4$ vezes dureza elevada a $1/2$), como pode ser observado na figura Figura 6. De acordo com Hutchings (2017), a razão K_{IC}/H , que pode ser chamada de índice de fragilidade, é uma medida da fragilidade do material, isto é, representa a dificuldade que o material impõe em sofrer fratura durante a indentação. Já as potências nas variáveis irão depender do grupo de materiais cerâmicos estudado, porém, na maioria dos estudos, o expoente da tenacidade à fratura é maior que o da dureza, ou seja, nesses materiais, devido à dominância de mecanismos frágeis, a tenacidade à fratura tem maior importância que a dureza.

Materiais cerâmicos têm potencial para superarem o WC-Co em aplicações de desgaste abrasivo, como mostra a Figura 6b. No tribossistema desse exemplo, o B_4C mostra ter resistência ao desgaste 10 vezes maior que o WC-Co.

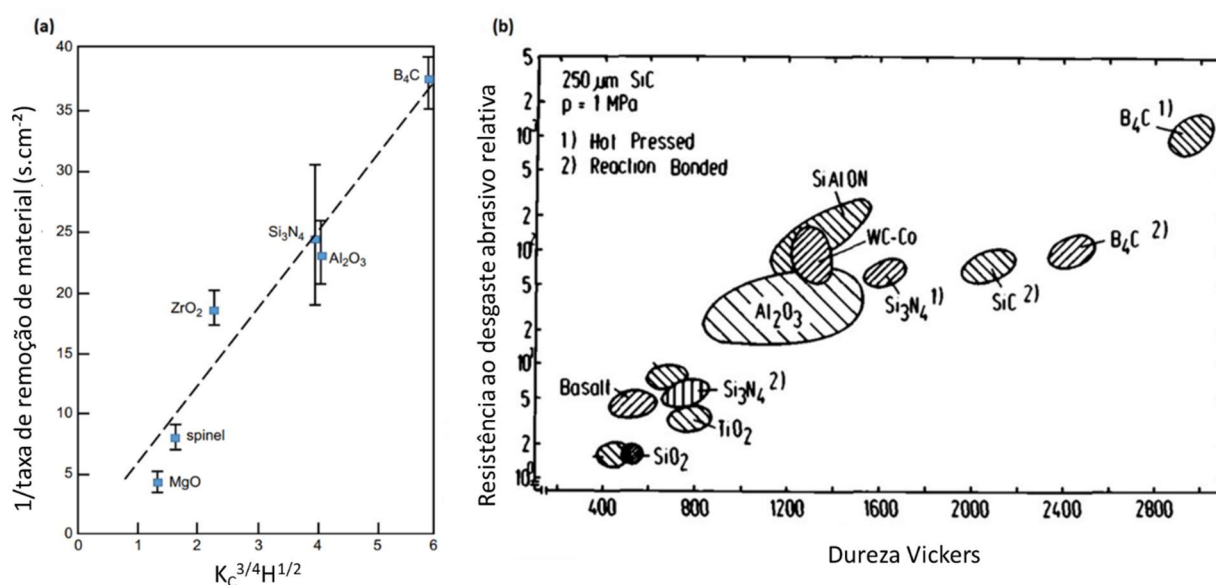


Figura 6. (a) Correlação entre a resistência ao desgaste na abrasão a dois corpos e a quantidade $K_{IC}^{3/4}H^{1/2}$ para vários materiais cerâmicos (EVANS e WILSHAW, 1976 *apud* HUTCHINGS, 2017). (b) Resistência ao desgaste abrasivo relativa em função da dureza Vickers para diversos cerâmicos de engenharia, avaliada no ensaio pino-lixia (ZUM GAHR, 1987). Nota: Adaptado pelo autor.

2.2 DESGASTE ABRASIVO NO METAL DURO (WC-CO)

Engqvist (2000) investigou a interação de compósitos de carbeto de tungstênio com diferentes tipos de abrasivo. Os resultados mostram que quando o metal duro é

desgastado por abrasivos pelos menos 1,2 vezes mais duros, a matéria é removida através da deformação plástica e fragmentação dos carbonetos. Se o abrasivo é menos duro, o ligante é preferencialmente desgastado, gerando o destacamento dos carbonetos. Assim, se o livre caminho médio entre os carbonetos for maior, a resistência ao desgaste é menor. O Autor também observou que os grãos de carbeto de tungstênio foram desgastados segundo mecanismos plásticos.

A excelente resistência à abrasão e à erosão desse material foi reportada diversas vezes na literatura (GEE *et al.*, 2017; ZUÑEGA, 2012; GEE, 2010.). É importante salientar que as aplicações do metal duro acima mencionadas geralmente envolvem a exposição a ambientes corrosivos, como lubrificantes e água do mar, sendo que a sinergia entre corrosão e abrasão já foi abordada em vários trabalhos (ZHENG, 2020; GANT *et al.*, 2004; ZHENG *et al.* 2019). Porém, há escassez literária sobre o papel do meio líquido corrosivo, ou seja, um líquido ativo com a superfície, na facilitação da fratura. Neste trabalho, essa influência foi estudada e encontra-se detalhada no subtópico 2.2.1 e no artigo já publicado "*Liquid media effect on the abrasion response of WC/Co hardmetal with different cobalt percent*" – Magnol, R. V. *et al.* - *Wear*, v. 477, p. 203815, 2021.

2.2.1 Influência de meios líquidos ativos no desgaste abrasivo e fratura do metal duro

A facilitação da fratura de cerâmicos através de líquidos ativos com a superfície já foi observada e discutida extensivamente na literatura:

Desa e Bahadur (1999), estudaram o efeito diferentes líquidos em materiais cerâmicos sob ensaio de riscamento e observaram que o efeito do líquido depende de sua reatividade com o material. Como por exemplo, no carbeto de silício, onde a água teve um efeito lubrificante, reduzindo a ocorrência de trincas, enquanto na alumina, a água promoveu a corrosão sob tensão, aumentando a taxa de desgaste, mas somente em cargas elevadas.

Enomoto (1981), observou a redução da carga crítica para ocorrência de fratura no vidro quando na presença de líquidos ativos com este material, o autor atribui esse fenômeno à alteração da energia de superfície. Na presença de líquido menos ativos, como a parafina, a carga crítica para fratura aumentou. Chen *et al.* (1991), notou que a presença de água no vidro promovia uma redução do coeficiente de atrito, mas

aumentava a extensão do trincamento. Magnol et al. (2019), investigando o desgaste abrasivo de rochas, observou que lubrificantes a base de água aumentaram a taxa de desgaste e reduziram a carga crítica para transição de mecanismos.

Neste trabalho, a análise do efeito de meios líquidos ativos no metal duro foi realizada com soluções de diferentes pH's (2, 6 e 10) em amostras de carbeto de tungstênio com 6, 11 e 28% de cobalto através de ensaios de molhabilidade, de riscamento progressivo com indentadores de diamante tipo Vickers e Rockwell (2 a 102 N) e com a medição da tenacidade à fratura via indentação nesses meios, além da realização de ensaios controle, a seco. O tempo de exposição máximo aos líquidos foi de 200 segundos, de maneira a minimizar a degradação desses materiais via fenômenos corrosivos.

Os resultados desse estudo encontram-se resumidos nos parágrafos a seguir, o primeiro deles, referente aos ensaios de molhabilidade, onde o ângulo de contato entre uma gota de líquido (pH2, pH6 ou pH10) e a amostra de metal duro (com 6, 11 ou 28% de cobalto) foi medido, o líquido com pH2 apresentou os menores ângulos independente do percentual de cobalto. Quanto menor o ângulo de contato, maior a molhabilidade e maior a reatividade do líquido com a superfície. Os líquidos com pH10 e pH6 apresentaram molhabilidade menores, respectivamente (Figura 7).

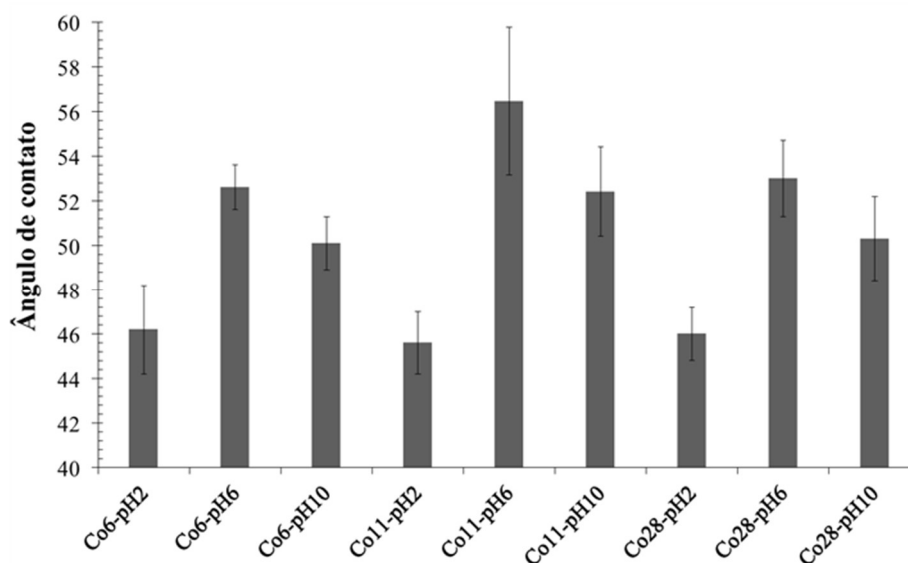


Figura 7. Ângulo de contato para todos os materiais e condições. Fonte: Autor.

A presença de líquido reduziu a tenacidade à fratura via indentação quando comparado aos ensaios a seco na amostra com menor teor de cobalto e menor tenacidade medida, como mostra a Figura 8.

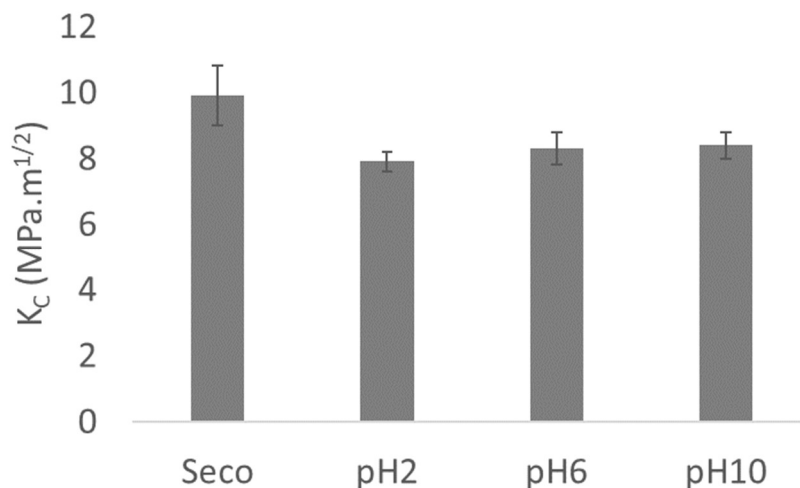


Figura 8. Redução da tenacidade à fratura via indentação devido à presença de meios líquidos ativos com a superfície. Fonte: Autor.

Os meios ácidos (pH 2) e básicos (pH 10) aumentaram o volume perdido quando comparados ao pH 6, nas maiores cargas. Os meios líquidos, também, aumentaram a severidade dos mecanismos quando comparados aos ensaios a seco com o indentador Vickers, como mostra a Figura 9.

Em suma, além dos efeitos corrosivos, meios líquidos com potencial de corrosão podem reduzir a tenacidade e facilitar a fratura da mesma forma que em materiais cerâmicos puros. Maior detalhamento dessa parte do trabalho se encontra no artigo já publicado (MAGNOL, et. al, 2021).

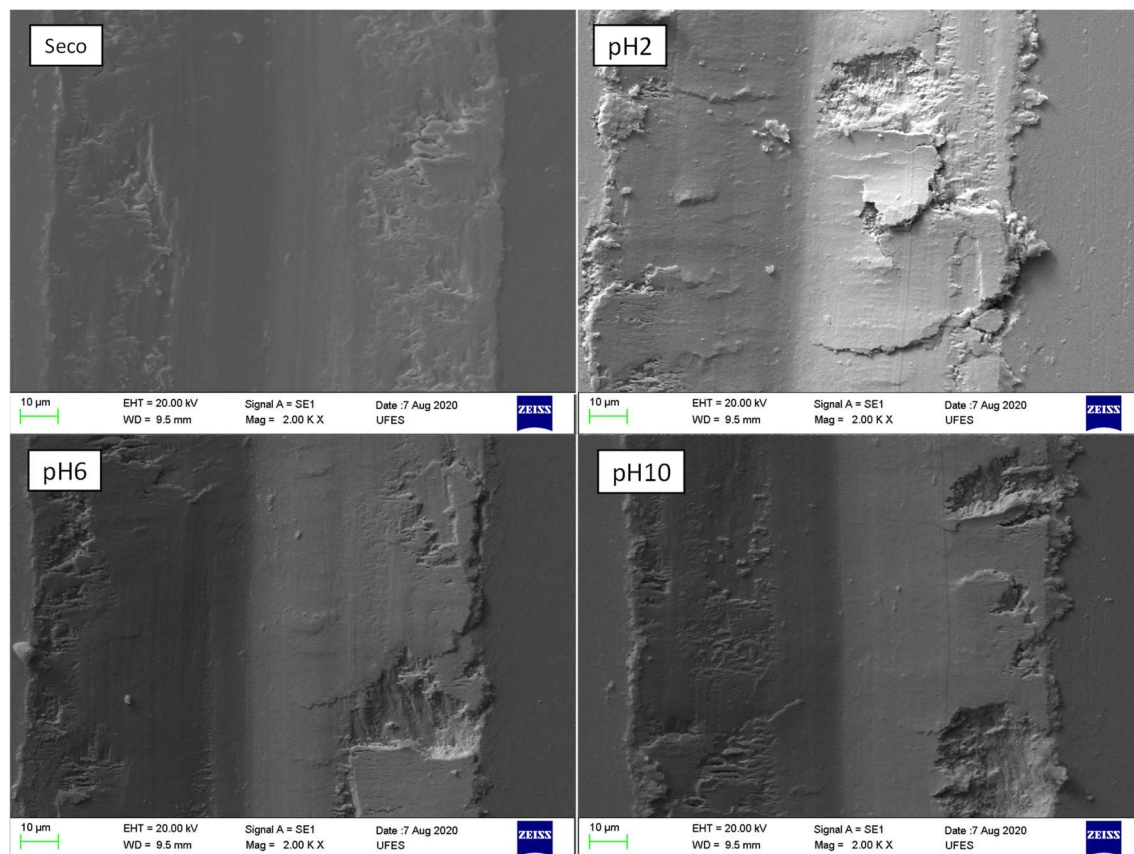


Figura 9. Comparação entre a severidade da fratura nos riscos com indentador Vickers na presença de meios líquidos (pH 2, 6 e 10) e a seco. Fonte: (MAGNOL, et. al, 2021). Nota: Adaptado pelo autor

3. SELEÇÃO DE MATERIAIS

A fim de selecionar um grupo inicial de cerâmicos para o estudo em questão, uma primeira abordagem foi pensada: Selecionar os cerâmicos com base em suas propriedades mais importantes no que tange à resistência ao desgaste. Essa seleção será baseada no conceito de índice de mérito.

O índice de mérito é, resumidamente, uma propriedade ou conjunto de propriedades que ao serem maximizadas ou minimizadas, maximizam o desempenho de um certo componente de engenharia. Por exemplo, um índice de mérito adequado para um tirante de alumínio aplicado em aeronaves seria o limite de escoamento sobre a densidade (σ_e/ρ), pois quanto maior o limite de escoamento e menor a densidade, mais resistente e leve seria o tirante, o que aumentaria o desempenho geral da aeronave, que poderia suportar maiores cargas e ser mais eficiente energeticamente devido ao baixo peso (ASHBY, SHERCLIFF e CEBON, 2018).

As propriedades pré-selecionadas para constituir esse índice de mérito foram a tenacidade à fratura (K_{IC}) e dureza (H), já que estas estão presentes em diversas equações que prometem prever o comportamento em desgaste abrasivo de materiais cerâmicos, além de serem de fácil obtenção, tanto na literatura quanto em laboratório.

Porém, para construir esse índice de mérito para classificação dos cerâmicos, é necessário atribuir pesos para cada propriedade. A quantidade $K_{IC}^{3/4}H^{1/2}$ de Evans e Wilshaw (1976), encontrada no livro de I. Hutchings e P. Shipway (2017), que correlaciona o desgaste abrasivo de materiais cerâmicos com a dureza e a tenacidade à fratura, atribui os respectivos pesos às propriedades, $3/4$ e $1/2$. O expoente da tenacidade à fratura ($3/4$) tem origem em correlações entre a extensão do trincamento lateral e a tenacidade à fratura, já o expoente da dureza ($1/2$) deriva de equações envolvendo relações entre a força sobre uma partícula afiada (angulosa) e seu respectivo raio de impressão no material. Essa quantidade foi validada utilizando como base resultados de ensaios abrasivos a dois corpos com indentador fixo (serragem) de cerâmicos de Rice e Speronello (1976) normalizados para um tamanho de grão de $0,4 \mu\text{m}$, como mostra a Figura 6. (a).

Existe, também, na literatura, uma equação, desenvolvida por Buijs, Korpel-Van Houten, 1993. que tenta explicar o volume perdido na lapidação do vidro em diferentes parâmetros, como resultado, a taxa de desgaste foi linearmente proporcional a $E^{5/4}/H^2K_{IC}$.

Como os ensaios utilizados para os estudos dos cerâmicos nesse trabalho diferem tribologicamente dos ensaios previamente citados, que deram origem ou validaram essas quantidades, foi realizada na literatura uma extensa pesquisa nos repositórios acadêmicos visando a obtenção de dados para a construção de uma nova quantidade/índice de mérito para a aquisição de cerâmicos para o estudo em questão. Muitos artigos sobre desgaste de cerâmicos foram encontrados, entretanto, poucos tratavam de ensaios padronizados com informações sobre as propriedades mecânicas dos materiais, dentre estes, ensaios padronizados do tipo roda de borracha a seco (ASTM G65) apresentaram quantidade significativa, além de ser um dos ensaios e o mais próximo de um tribossistema real dentre os ensaios realizados neste trabalho. Os dados relativos a esses ensaios se encontram na Tabela 1 abaixo:

Tabela 1. Propriedades mecânicas e volume perdido nos ensaios de abrasão tipo roda de borracha (ASTM G65). Fonte: autor.

Referência	Material	E (GPa)	Dureza [HV]	K_{IC} [MPa.m ^{1/2}]	Vol. G65 [mm ³]
Gee, 1999	RBSC (SiC- 10Si)	410	2000	5,3	1,39
Gee, 1999	SSN (Si ₃ N ₄)	290	1600	5	9,25
Gee, 1999	α-SiC (SiC)	410	2300	2,7	0,8
Gee, 1999	Vitox (Al ₂ O ₃ 99,99%)	370	1900	6	10,48
Medvedovski, 2006	AM2 (Al ₂ O ₃)	237	1130	2,54	11,3
Medvedovski, 2006	AM5 (Al ₂ O ₃)	241	1030	2,32	12,25
Medvedovski, 2006	ZAS2 (Al ₂ O ₃)	275	1180	3,03	13,7
Medvedovski, 2006	ZAS3 (Al ₂ O ₃)	228	940	3,08	16,8
Medvedovski, 2001	AL91 (Al ₂ O ₃)	267	1140	2,85	14,5
Medvedovski, 2001	AL95 (Al ₂ O ₃)	275	1040	2,65	22
Medvedovski, 2001	AL98 (Al ₂ O ₃)	340	1275	3,3	37
Medvedovski, 2001	AL99,5 (Al ₂ O ₃)	360	1540	3,2	17,5
Medvedovski, 2001	AZ (Al ₂ O ₃ - ZrO ₂)	202	1545	3,95	13,5
Medvedovski, 2001	MgO-PSZ (ZrO ₂)	202	1025	5,9	13
Medvedovski, 2001	Y ₂ O ₃ -PSZ (ZrO ₂)	360	1240	8	14

De posse desse banco de dados, foram realizadas correlações entre as quantidades acima citadas e as propriedades relevantes ao desgaste de cerâmicos (H e K_{IC}), como pode ser visto na Figura 11, utilizando o coeficiente de determinação (R^2), um dos

parâmetros mais utilizados como método de análise quantitativo para correlações entre variáveis.

Como o coeficiente de determinação (R^2) é um parâmetro estatístico muito utilizado durante este trabalho, ele será brevemente descrito a seguir: o R^2 pode ser interpretado como a proporção da variância de uma variável (resistência ao desgaste, por exemplo) que pode ser explicada pela variação linear de outra variável, como, por exemplo, a dureza. O R^2 pode variar de 0 a 1. Um R^2 igual a 1, significa que 100% da variação linear dos dados de uma variável foram explicados pela outra, enquanto um R^2 igual 0, significa que as variáveis não possuem correlação linear entre si.

Uma explicação mais didática, para nível estatístico, foi encontrada do livro de Devore (2014), onde o autor apresenta três gráficos de dispersão de dados (Figura 10) que apresentam grande variabilidade nos valores de y. No primeiro gráfico (a) não há qualquer desvio dos pontos em relação a reta que estima a variação linear entre y e x, indicando uma correlação linear perfeita ($R^2 = 1$), no segundo gráfico (b), existe uma variação dos pontos em relação a reta, porém, esta variação é pequena em relação a variação de y, portanto, é possível que exista uma correlação, mas o R^2 será diferente de 1. Em (c), essa variação é excessivamente grande (R^2 é baixo) e não é possível correlacionar linearmente essas variáveis.

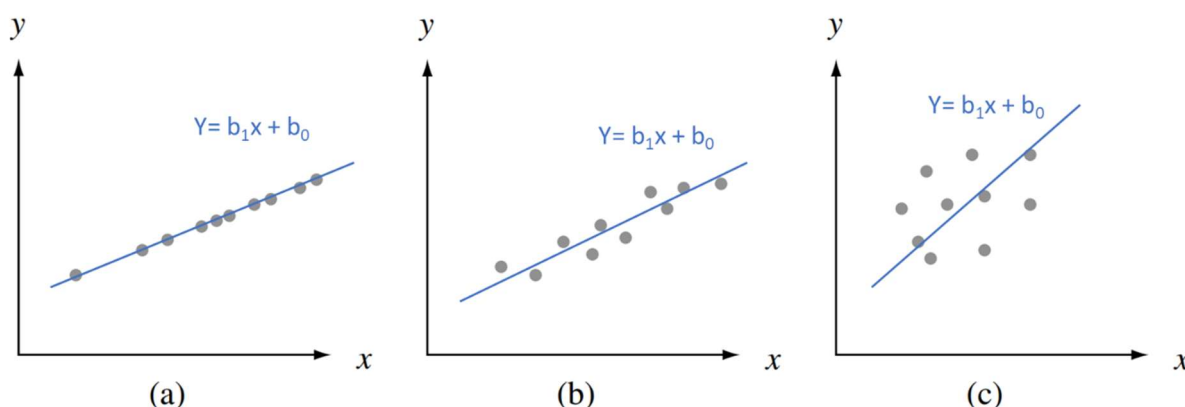


Figura 10. Variação de y em relação a x. (a) dados onde toda a variação é explicada, (b) dados para os quais a maior parte da variação é explicada, (c) dados para os quais pouca variação é explicada.

Fonte: (DEVORE, 2014). Nota: Adaptado pelo autor.

O coeficiente de determinação R^2 é dado pela equação:

$$R^2 = 1 - \frac{SQE}{SQT}$$

Onde SQT (Soma dos Quadrados Total) é a soma dos desvios quadrados ao redor da média amostral dos valores observados de y . E SQE (Soma dos Quadrados dos Erros) pode ser atribuída a quantidade de variação de y que não foi explicada pela equação linear (DEVORE, 2014).

Voltando aos gráficos da Figura 11, pode-se notar que apenas a dureza apresentou certa correlação ($R^2 = 0,60$) com o inverso da taxa de desgaste. Porém, ao analisarmos, minuciosamente, o aspecto da dispersão dos dados, vemos esta correlação é muito dependente dos dois pontos mais a direita do gráfico, e que para materiais com dureza entre, aproximadamente, 10 a 18 GPa, não existe correlação alguma.

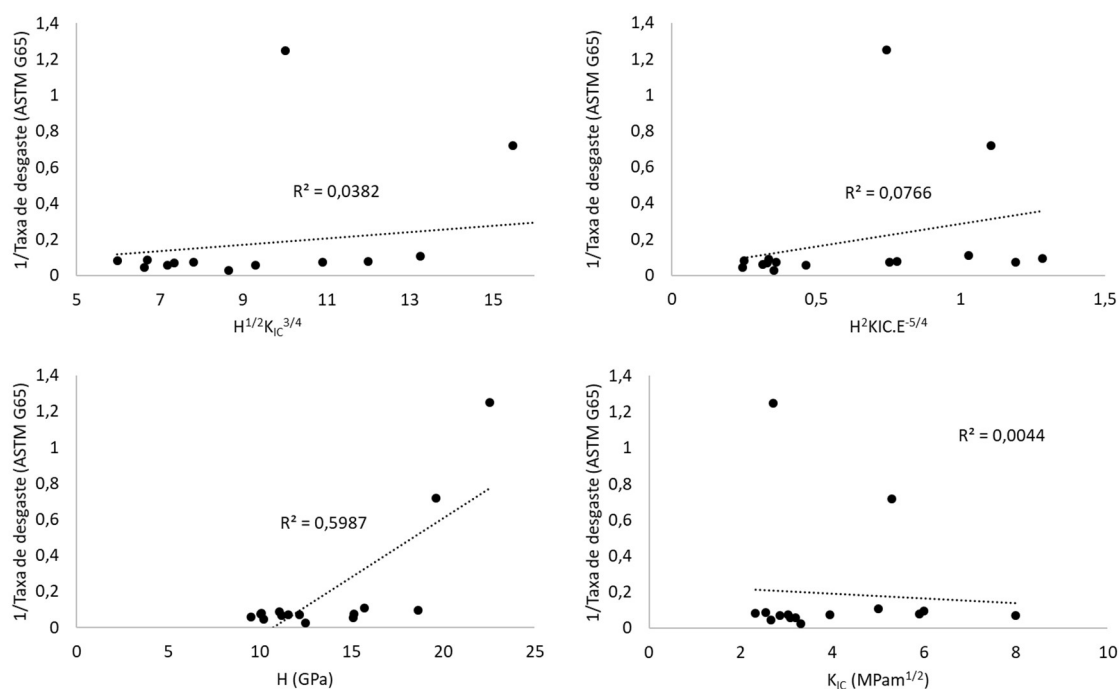


Figura 11. Comparação entre as correlações entre a dureza (H), a tenacidade à fratura (K_{IC}) e as quantidades: " $K_{IC}^{3/4}H^{1/2}$ ", " $H^2.K_{IC}.E^{-5/4}$ " e a resistência ao desgaste (inverso do volume perdido) para os ensaios roda de borracha encontrados na literatura. Fonte: Gee (1999); Medvedovski (2001) e Medvedovski (2006). Nota: Adaptado pelo autor.

Apesar de tudo, é fato que a dureza apresentou a melhor correlação e a tenacidade e os produtos das propriedades não apresentaram nenhuma, portanto apenas a dureza (H) foi utilizada como índice de mérito para a classificação/aquisição dos cerâmicos que serão estudados neste trabalho.

Para tal classificação, os mapas de Ashby, Shercliff e Cebon (2018) foram utilizados, através do software CES Edupack Granta Design Versão educativa (2019). O resultado da primeira classificação, pode ser visto no gráfico da Figura 12. Uma observação importante é que quando a quantidade de Evans e Wilshaw ($K_{IC}^{3/4}H^{1/2}$) foi empregada como índice de mérito, apenas a ordem de classificação entre os cerâmicos foi ligeiramente alterada, sendo que os cerâmicos melhores classificados permaneceram os mesmos.

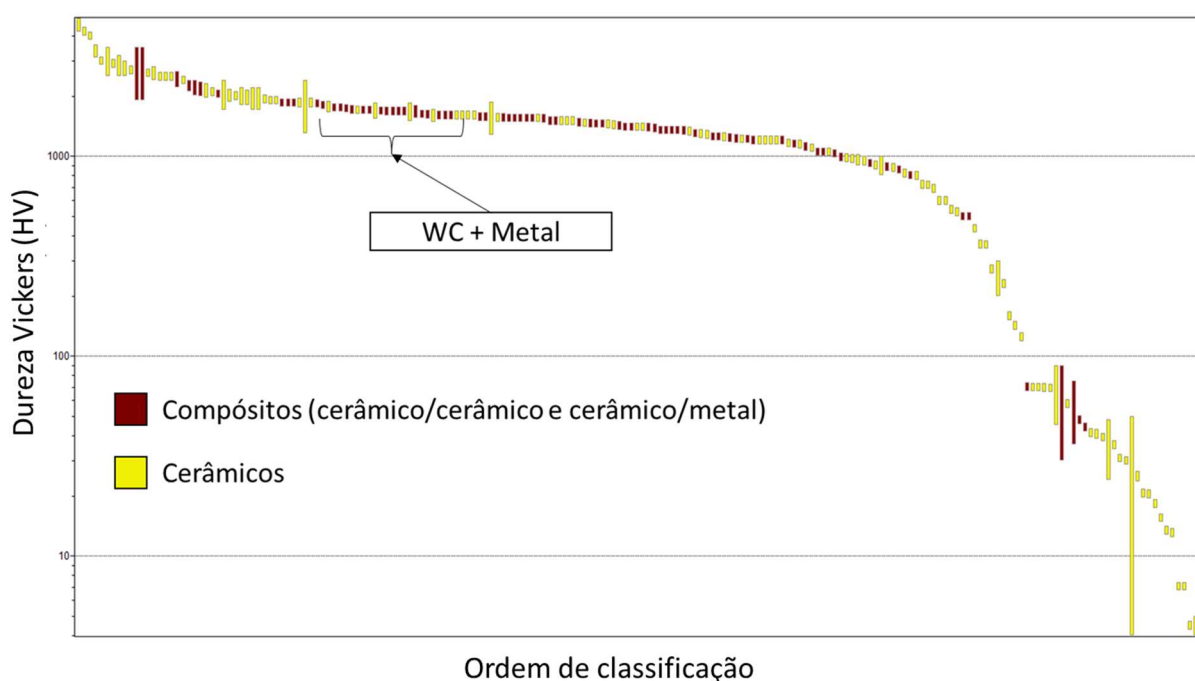


Figura 12. Primeira classificação dos cerâmicos segundo o índice de mérito (dureza). Fonte: (CES Edupack Granta Design Versão educativa, 2019). Nota: Adaptado pelo autor.

Em relação aos cerâmicos, uma de suas vantagens em relação ao metal duro é sua notória inércia química, ou seja, resistência à corrosão. Porém, isso não significa que sejam imunes a esse fenômeno, sendo assim, foi introduzida na pré classificação da Figura 12 duas novas variáveis: a resistência a meios ácidos (Figura 13) e aos meios alcalinos (Figura 14). Essas classificações foram feitas de forma automática através do banco de dados do próprio *software*.

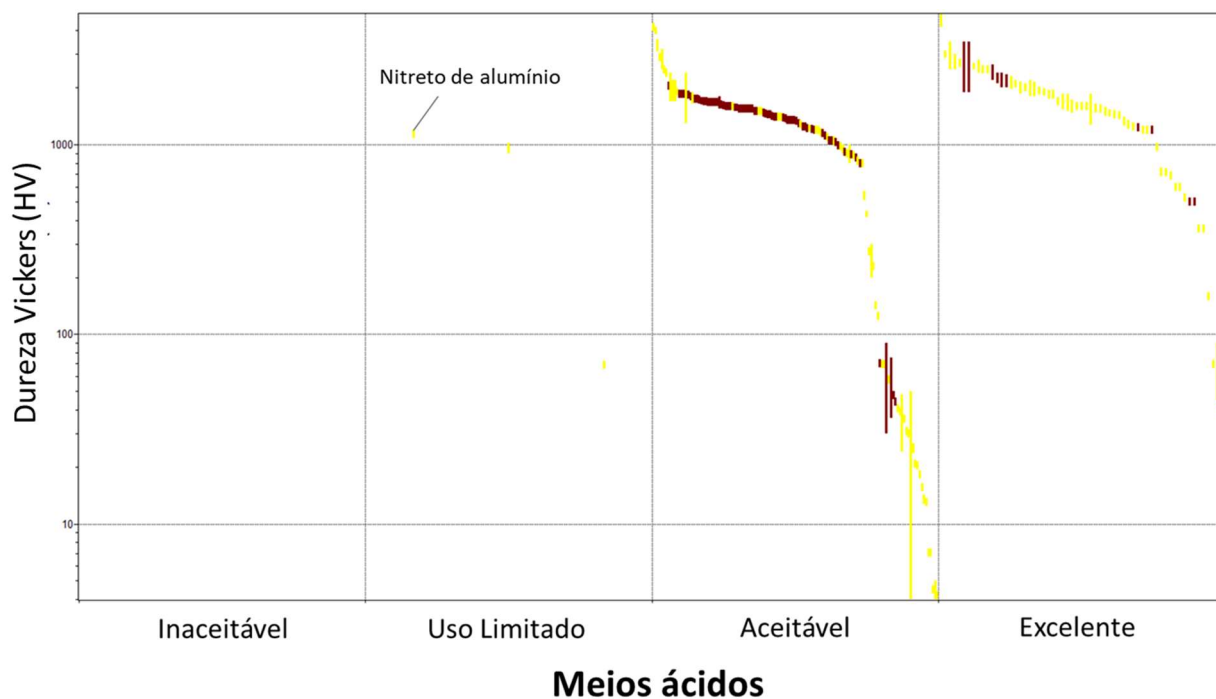


Figura 13. Resistência qualitativa em meios ácidos dos compósitos e cerâmicos. Fonte: (CES Edupack Granta Design Versão educativa, 2019). Nota: Adaptado pelo autor.

Como pode ser interpretado na Figura 13, apenas o nitreto de alumínio apresentou uso limitado nesse meio e foi excluído da classificação.

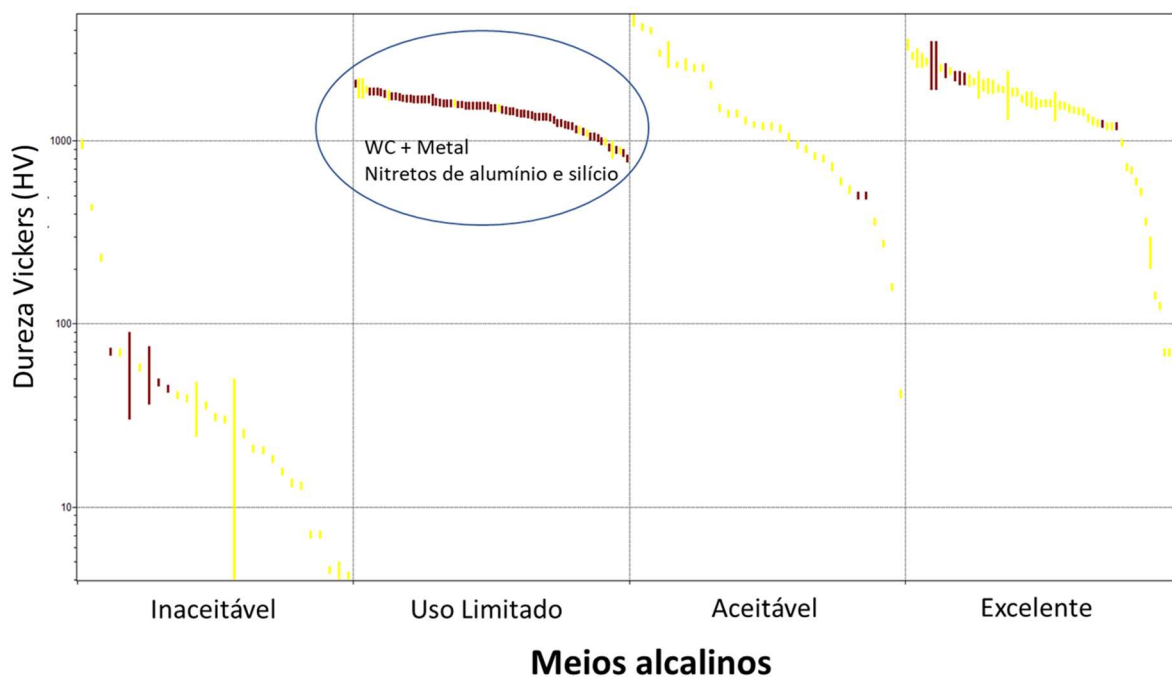


Figura 14. Resistência qualitativa em meios alcalinos dos compósitos e cerâmicos. Fonte: (CES Edupack Granta Design Versão educativa, 2019). Nota: Adaptado pelo autor.

Já para meios alcalinos (Figura 14), alguns tipos de nitretos de alumínio e silício, apresentaram uso limitado nessas condições, portanto foram excluídos da classificação. Vale notar que, segundo o *software* o grupo do WC+metal também teria sido eliminado nesse quesito. Porém, segundo Gant, Gee e May (2004), compósitos WC-Co apresentaram maior perda de massa em ensaios abrasivos quando em meio ácido, como pode ser observado na Figura 15.

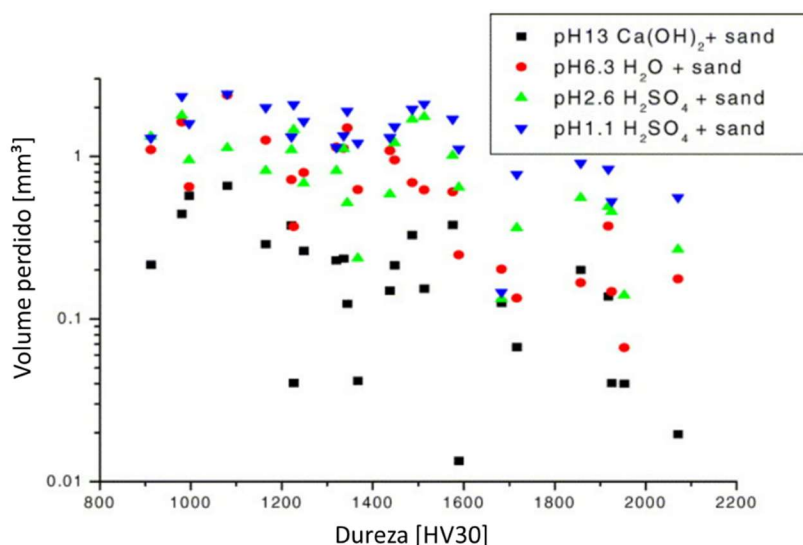


Figura 15. Influência do pH no desgaste de diversos tipos de metal duro (WC-Co) para o ensaio roda de borracha. Fonte: (GANT, GEE e MAY, 2004). Nota: Adaptado pelo autor.

Assim, finalmente, a classificação final dos cerâmicos foi formada, como se observa no gráfico da Figura 16, sendo esta a base para a aquisição dos cerâmicos utilizados nesse trabalho.

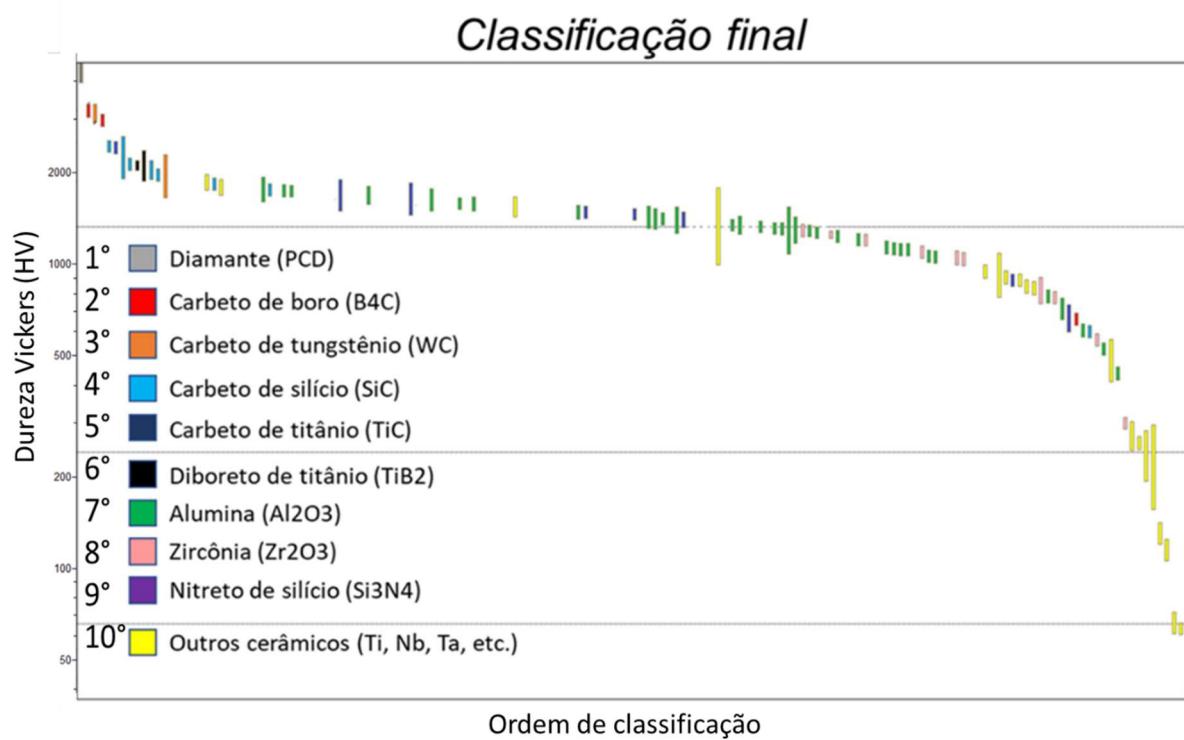


Figura 16. Classificação final dos cerâmicos. Fonte: (CES Edupack Granta Design Versão educativa, 2019). Nota: Adaptado pelo autor.

4. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1 NOMENCLATURA

Dentre os grupos de cerâmicos pré-selecionados, foi possível adquirir amostras de alumina com 96% e 99% de pureza, amostras de zircônia e amostras de alumina tenacificada com zircônia (ZTA) de diversos fabricantes, amostras de carбето de boro, de carбето de silício, além de amostras de carбето de tungstênio com quatro percentuais diferentes de cobalto (6, 7, 10 e 11%). Também foram estudadas, em alguns dos ensaios, amostras de cerâmicos que não estavam presentes na seleção inicial, a titânia e o quartzo fundido, por serem cerâmicos de baixa dureza e tenacidade à fratura, respectivamente. O que ampliaria o espectro das propriedades no conjunto dos cerâmicos.

Tabela 2. Nomenclatura utilizada e material das amostras ensaiadas. As siglas (HI, MC, CT, DC, EG e CR) representam os diferentes fabricantes. Fonte: autor.

Nomenclatura	Material
HI_WC6Co	Carбето de tungstênio (WC) + 6% em peso de cobalto (Co)
HI_WC7Co	Carбето de tungstênio (WC) + 7% em peso de cobalto (Co)
HI_WC10Co	Carбето de tungstênio (WC) + 10% em peso de cobalto (Co)
HI_WC11Co	Carбето de tungstênio (WC) + 11% em peso de cobalto (Co)
MC_SiC	Carбето de silício (SiC)
MC_AL96	Alumina (Al_2O_3) com 96% de pureza
MC_AL99	Alumina (Al_2O_3) com 99% de pureza
MC_ZrO2	Zircônia (ZrO_2)
MC_ZTA	Alumina (Al_2O_3) tenacificada com zircônia (ZrO_2)
MC_Qtz	Quartzo/Sílica fundida (SiO_2)
MC_TiO2	Titânia (TiO_2)
CT_AL96	Alumina (Al_2O_3) com 96% de pureza
CT_AL99	Alumina (Al_2O_3) com 99% de pureza
CT_ZrO2	Zircônia (ZrO_2)
CT_ZTA	Alumina (Al_2O_3) tenacificada com zircônia (ZrO_2)
DC_AL99	Alumina (Al_2O_3) com 99% de pureza
DC_ZTA	Alumina (Al_2O_3) tenacificada com zircônia (ZrO_2)
DC_ZrO2	Zircônia (ZrO_2)
EG_AL96	Alumina (Al_2O_3) com 96% de pureza
EG_AL99	Alumina (Al_2O_3) com 99% de pureza
EG_ZTA	Alumina (Al_2O_3) tenacificada com zircônia (ZrO_2)
CR_B4C	Carбето de boro (B_4C)

4.2 DENSIDADE

4.2.1 Método

A densidade das amostras foi calculada utilizando o princípio de Arquimedes segundo a norma ASTM B311 (2017). Cada material de cada fabricante possuía entre cinco e dez réplicas, cada uma foi pesada cinco vezes, tanto a seco quanto a úmido. Os valores das médias das réplicas se encontram na Tabela 3. As réplicas EG_ZTA_3, CR_B4C_10 e CT_ZTA_3 apresentaram densidades médias que foram consideradas *outliers* como pode ser observados nos gráficos da Figura 17, sendo assim, foram descartadas e uma nova densidade média foi calculada. O método para identificação dos *outliers* foi baseado na amplitude interquartil (IQR), onde Q_3 e Q_1 são o terceiro e primeiro quartil, L_{sup} e L_{inf} são os limites superior e inferior e X é a média.

$$IQR = Q_3 - Q_1 \quad (1)$$

$$L_{sup} = X + 1,5.IQR \quad (2)$$

$$L_{inf} = X - 1,5.IQR \quad (3)$$

Sendo assim, quando a densidade de uma das réplicas fica fora dos limites inferior ou superior, é considerada um *outlier*.

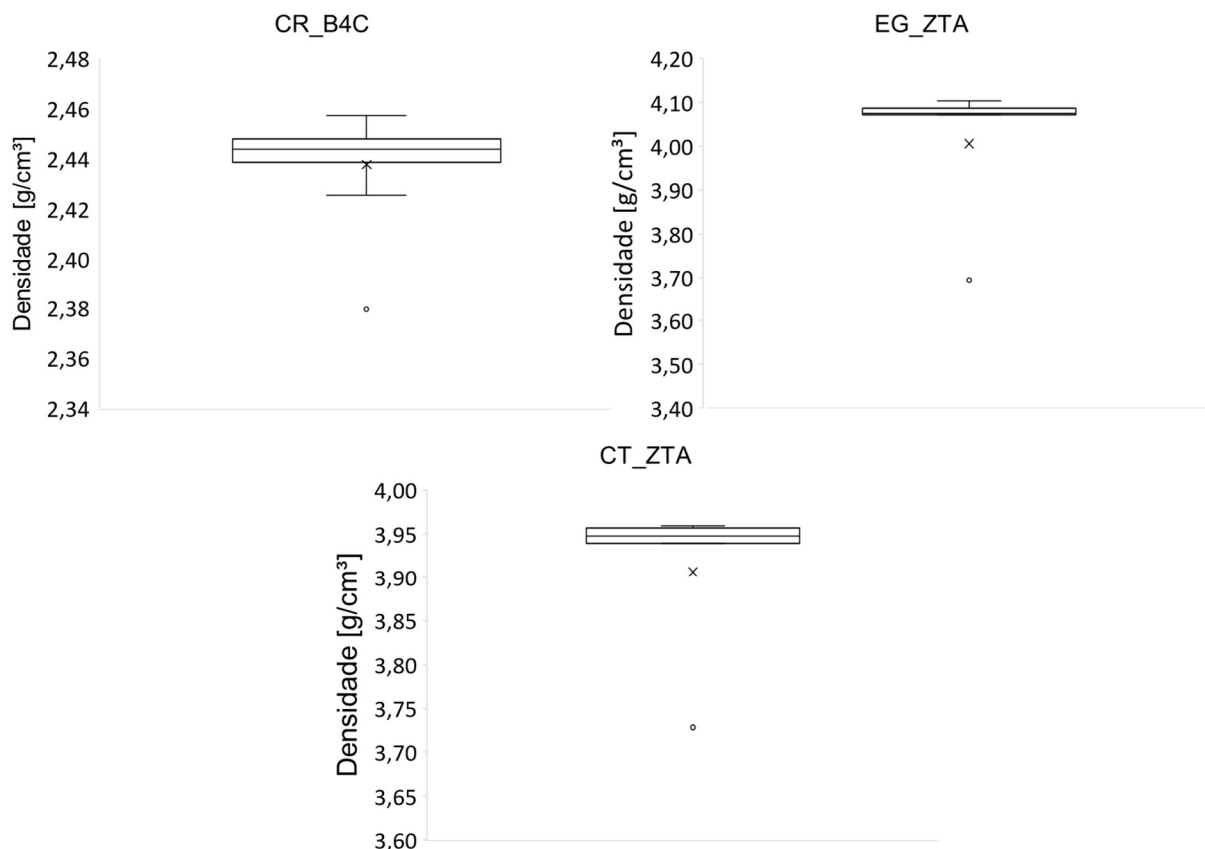


Figura 17. Gráfico tipo *boxplot* das amostras de CR_B4C, EG_ZTA e CT_ZTA. Onde as linhas no intervalo são os valores máximo e mínimo encontrados. A fronteira inferior e a superior da caixa representam respectivamente o 1° e o 3° quartil, a linha central representa a mediana, o “X” a média e o ponto os *outliers*. Fonte: autor.

4.2.2 Resultados

Como pode ser observado na Tabela 3, todos os materiais apresentaram densidades superiores a 90% de suas respectivas densidades teóricas. A EG_AL96 apresentou a densidade mais baixa (3,692 g/cm³) entre as aluminas com 96% de pureza, apesar de valor próximo das demais, atingindo cerca de 93% da densidade teórica.

Quanto as aluminas com 99% de pureza, a CT_AL99, a DC_AL99 e a EG_AL99 apresentaram densidades muito parecidas, em torno de 3,87 g/cm³, sendo que a MC_AL99 teve densidade ligeiramente maior, atingido 98,47% da densidade teórica.

A CT_ZTA teve densidade bem abaixo das demais (3,954 g/cm³), e a MC_ZTA bem acima chegando a 98,11% da densidade teórica. Vale notar que a densidade teórica assumida leva em consideração uma ZTA com 20% em peso de zircônia. Não há informações sobre o percentual exato de zircônia nas amostras de ZTA estudadas.

Finalmente, as densidades das zircônias foram bastante próximas atingindo em torno de 98% da densidade teórica.

Tabela 3. Medidas de densidade das amostras. Fonte: Autor, *Gatti (2023), ** Strey (2015).

Amostra	Densidade Média (g/cm ³)	Desvio padrão	Densidade Teórica (g/cm ³)	Percentual densidade teórica (%)
HI_WC6Co	14,837*	0,001*	15,43 (vii e viii)	96,15
HI_WC7Co	14,728	0,018	15,36 (vii e viii)	95,88
HI_WC10Co	14,452	0,001	15,15 (vii e viii)	95,39
HI_WC11Co	14,377*	0,001*	15,09 (vii e viii)	95,27
MC_SiC	3,152**	0,001**	3,21 (ii)	98,19
MC_Qtz	2,200	0,001	2,33 - 2,65 (iv)	94,42
MC_TiO2	4,012	0,001	4,26 (iii)	94,17
CT_AL96	3,731	0,003	3,987 (i)	93,57
EG_AL96	3,692	0,004	3,987 (i)	92,60
MC_AL96	3,706	0,001	3,987 (i)	92,95
CT_AL99	3,868	0,008	3,987 (i)	97,01
DC_AL99	3,871	0,011	3,987 (i)	97,09
EG_AL99	3,866	0,006	3,987 (i)	96,96
MC_AL99	3,926	0,002	3,987 (i)	98,47
CT_ZTA	3,954	0,012	4,29 20%Zirc (ix)	91,51
DC_ZTA	4,11	0,032	4,29 20%Zirc (ix)	95,8
EG_ZTA	4,084	0,014	4,29 20%Zirc (ix)	95,19
MC_ZTA	4,209	0,006	4,29 20%Zirc (ix)	98,11
CT_ZrO2	6,02	0,006	6,10 (v)	98,68
DC_ZrO2	5,976	0,017	6,10 (v)	97,96
MC_ZrO2	6,031	0,006	6,10 (v)	98,86
CR_B4C	2,446	0,022	2,52 (vi)	97,06
(i)	YALAMAÇ, E.; TRAPANI, A.; AKKURT, S. (2014).			
(ii)	ALLIEGRO, R.; COFFIN, L.; TINKLEPAUGH, J. (1956).			
(iii)	RUBIO, J. (1997).			
(iv)	MCCOLM, I. J. (2013)			
(v)	JIANG, L. (2011).			
(vi)	MARTIN, H.; FENG, B.; MICHAELIS, A. (2014).			
(vii)	CALLISTER, D.; RETHWISCH, G. (2020).			
(viii)	ZHU, T. (2018).			

4.3 TENACIDADE À FRATURA VIA INDENTAÇÃO

A medição da tenacidade à fratura através da medição das trincas radiais oriundas da indentação com penetrador de diamante Vickers é bastante utilizada devido à sua simplicidade e baixo custo (QUINN e BRADT, 2007).

Apesar de diversos trabalhos, como o de Quinn e Bradt (2007), deixarem claro que a tenacidade à fratura medida via indentação (K_c) é diferente da tenacidade à fratura (K_{Ic}) calculada a partir de ensaios normatizados, esse método pode ser utilizado para ranquear cerâmicos de diferentes grupos, sendo que, segundo Ponton e Rawlings (1989), através da análise e comparação entre resultados de tenacidade à fratura e tenacidade à fratura via indentação oriundas de diversas equações, uma das equações que melhor o fazem é a equação de Evans e Charles (1976):

$$K_c = 0,16H_v a^{0,5} \left(\frac{c}{a}\right)^{-\frac{3}{2}} \quad (4)$$

Onde “ c ” é o comprimento da trinca, “ a ” é a metade da diagonal da impressão e “ H_v ” é a dureza Vickers.

4.3.1 Método

Diversas indentações foram realizadas com indentador de diamante Vickers no microdurômetro SHIMADZU HMV-G 20ST do Laboratório de Tribologia, Corrosão e Materiais (TRICORRMAT) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) até a obtenção de dez impressões com quatro trincas radiais bem definidas e ausência de destacamento de material seguindo os critérios descritos na norma ISO 14627 (2012).

Inicialmente, as indentações eram realizadas com as menores cargas normais disponíveis no microdurômetro em que era possível visualizar as impressões, geralmente 25 gf. Caso nenhum trincamento fosse observado, o carregamento era aumentado progressivamente até a visualização das trincas radiais. Ao encontrar a carga ótima para medição da tenacidade, essa carga era repetida para amostras no mesmo grupo de materiais. Portanto, as cargas da Tabela 4 são simplesmente as cargas em que as tenacidades foram medidas e não as cargas críticas para o trincamento.

A equação de Evans e Charles (1976), descrita anteriormente, foi utilizada para o cálculo das tenacidades.

4.3.2 Resultados

Os resultados das tenacidades via indentação calculados, de tenacidades em materiais semelhantes também calculadas com a equação 4 de Evans e Charles (1976) e de tenacidades à fratura (K_{IC}) obtidas de métodos normatizados em materiais semelhantes encontradas na literatura podem ser encontrados na Tabela 4. Nela, pode-se notar que os metais duros apresentaram os maiores valores de tenacidade, chegando a $16,29 \text{ MPa.m}^{1/2}$ para a amostra HI_WC10Co. Em relação aos cerâmicos, as zircônias apresentam as maiores tenacidades, sendo que a amostra MC_ZrO2 obteve tenacidade média próxima a amostra de metal duro com menor tenacidade (HI_WC6Co). As aluminas e ZTA's apresentaram valores intermediários, a exceção das amostras MC_AL99 e MC_AL96, que obtiveram valores mais baixos, 3,15 e 2,72 $\text{MPa.m}^{1/2}$, respectivamente. Juntamente com essas amostras, as cerâmicas comuns (titânia e quartzo) e os carbetos de boro e silício, apresentaram os menores valores de tenacidade.

Tabela 4. Valores de tenacidade obtidos e comparação com valores encontrados na literatura. Fonte: autor, Vaneli (2019).

Amostra	$K_c \text{ (MPa.m}^{1/2})$ medida	Carga de medição (Kgf)	$K_c \text{ (MPa.m}^{1/2})$ E&C	$K_{IC} \text{ (MPa.m}^{1/2})$
HI_WC6Co	$9,90 \pm 0,91$	3	11,2-12,7 ^(viii)	8-15 ^(ix)
HI_WC7Co	$11,02 \pm 0,45$	4		8-15 ^(ix)
HI_WC10Co	$16,29 \pm 0,73$	31	14,5-15,5 ^(vii)	12-17 ^(ix)
HI_WC11Co	$14,60 \pm 1,50$	150		12-17 ^(ix)
MC_SiC	$3,26 \pm 0,26$	8	3,1-3,4 ⁽ⁱ⁾	2,45-2,66 ⁽ⁱⁱ⁾ 2,48 ^(iv)
MC_Qtz	$2,22^* \pm 0,32^*$	0,5*		0,7-2,5 ⁽ⁱ⁾
MC_TiO2	$1,03 \pm 0,25$	0,1		3,2 ^(vi)
CT_AL96	$4,73 \pm 0,16$	0,6		4,0-5,0 ^(vi)
EG_AL96	$4,02 \pm 0,38$	0,6		4,0-5,0 ^(vi)
MC_AL96	$2,72 \pm 0,57$	0,2		4,0-5,0 ^(vi)
CT_AL99	$4,20 \pm 0,49$	0,7	2,92 ⁽ⁱⁱⁱ⁾	3,5 ⁽ⁱⁱ⁾ 4,23 ⁽ⁱⁱⁱ⁾
DC_AL99	$4,61 \pm 0,43$	0,6	2,92 ⁽ⁱⁱⁱ⁾	3,5 ⁽ⁱⁱ⁾ 4,23 ⁽ⁱⁱⁱ⁾
EG_AL99	$4,40 \pm 0,16$	0,6	2,92 ⁽ⁱⁱⁱ⁾	3,5 ⁽ⁱⁱ⁾ 4,23 ⁽ⁱⁱⁱ⁾
MC_AL99	$3,15 \pm 0,46$	0,3	2,92 ⁽ⁱⁱⁱ⁾	3,5 ⁽ⁱⁱ⁾ 4,23 ⁽ⁱⁱⁱ⁾
CT_ZTA	$5,15 \pm 0,75$	2	3,98 ⁽ⁱⁱⁱ⁾	6,02 ⁽ⁱⁱⁱ⁾ 8,67-9,43 ^(x)
DC_ZTA	$4,17 \pm 0,39$	2	3,98 ⁽ⁱⁱⁱ⁾	6,02 ⁽ⁱⁱⁱ⁾ 8,67-9,43 ^(x)
EG_ZTA	$4,95 \pm 0,52$	2	3,98 ⁽ⁱⁱⁱ⁾	6,02 ⁽ⁱⁱⁱ⁾ 8,67-9,43 ^(x)
MC_ZTA	$4,68 \pm 0,31$	1	3,98 ⁽ⁱⁱⁱ⁾	6,02 ⁽ⁱⁱⁱ⁾ 8,67-9,43 ^(x)

CT_ZrO2	6,76 ± 0,6	5	5,42-7,98 ⁽ⁱⁱⁱ⁾	5,7-5,9 ⁽ⁱⁱ⁾ 5,5-10,76 ⁽ⁱⁱⁱ⁾
DC_ZrO2	8,01 ± 0,58	5	5,42-7,98 ⁽ⁱⁱⁱ⁾	5,7-5,9 ⁽ⁱⁱ⁾ 5,5-10,76 ⁽ⁱⁱⁱ⁾
MC_ZrO2	9,65 ± 0,26	4	5,42-7,98 ⁽ⁱⁱⁱ⁾	5,7-5,9 ⁽ⁱⁱ⁾ 5,5-10,76 ⁽ⁱⁱⁱ⁾
CR_B4C	3,57 ± 0,78	0,5	2,9-3,8 ^(v)	2,73-2,90 ^(iv)
(i)	MCCOLM, I. J. (2013)			
(ii)	GOGOTSI (2003)			
(iii)	PONTON e RAWLINGS, (1989)			
(iv)	VARGAS-GONZALEZ, SPEYER e CAMPBELL (2010)			
(v)	GHOSH (2007)			
(vi)	Matweb: Material Property Data			
(vii)	SERGEJEV e ANTONOV (2006)			
(viii)	LIU <i>et al.</i> (2018).			
(ix)	RAVICHANDRAN (1994)			
(x)	SHIN <i>et al.</i> (1990)			

4.4 DUREZA

A dureza de um material é, na maioria das vezes, dependente da carga, aumentando com a redução desta, esse fenômeno é conhecido como *Indentation Size Effect (ISE)*. Logo, quando a dureza é usada como critério para seleção de materiais, valores de dureza medidos em apenas uma carga normal são insuficientes para descrever a resistência à deformação plástica de um material. Muitas explicações para esse fenômeno são encontradas na literatura, desde erros de medição devido à limitação da resolução das lentes até empilhamento de discordâncias na superfície, porém, estudos recentes mostram que a causa para esse efeito ainda não foi esclarecida de fato. Diversas equações, empíricas e semi-empíricas foram propostas para descrever a variação da dureza com a carga normal. Dentre estas, destacam-se a Lei de Meyer e o *Modified Proportional Specimen Resistance Model*, PSR modificado (JIANG, 2012).

4.4.1 Lei de Meyer

Uma maneira comum de analisar o ISE é através da lei de Meyer, onde a carga normal, P , é correlacionada com o tamanho da indentação, ou seja, a diagonal média da indentação, d , através da equação:

$$P = \beta d^n \quad (5)$$

Onde β e n derivam do ajuste da curva dos dados experimentais. O significado físico de β ainda não está claro na literatura, podendo estar relacionado com o tamanho de grão. Já o expoente n , quando igual 2, pode ser interpretado como ausência de ISE, quando menor que 2, presença de ISE, sendo que quanto menor for n , maior será este efeito. Já quando n for maior que 2, um fenômeno conhecido como *Reverse Indentation Size Effect* (RISE) será observado, ou seja, a dureza do material irá reduzir com a redução do tamanho da indentação (JIANG, 2012).

A dureza Vickers calculada pode ser obtida através da equação:

$$H = 1,8544 \left(\frac{\beta d^n}{d^2} \right) \quad (6)$$

4.4.2 PSR modificado

O PSR modificado é, de maneira simplificada, uma evolução do *energy-balance approach* e, obviamente, do modelo PSR (*proportional specimen resistance*). Ele foi proposto em 1999 por Gong e colaboradores e baseado em uma quantidade expressiva de dados experimentais, tendo sido validado por diversos autores e usado para descrever tanto o ISE quanto RISE.

O PSR modificado correlaciona a carga normal aplicada “P” em Newton com a diagonal média da indentação “d” em milímetros através da equação:

$$P = \alpha_0 + \alpha_1 d + \alpha_2 d^2 \quad (7)$$

A dureza Vickers calculada, H, pode então ser obtida através da equação:

$$H = 1,8544 \left(\frac{\alpha_0 + \alpha_1 d + \alpha_2 d^2}{d^2} \right) \quad (8)$$

O PSR modificado leva em consideração as tensões compressivas residuais na superfície devido ao polimento (α_0). A constante α_1 está relacionada às propriedades elásticas, e α_2 às propriedades plásticas. E ainda α_1/α_2 está relacionado com α_0 , ou seja, com as tensões residuais na superfície (JIANG, 2012).

4.4.3 Método e Resultados

Antes das medições de dureza, as amostras de cerâmicos e de metal duro foram cortadas, embutidas e polidas até a suspensão de diamantes com 1 μm de diâmetro. Dez medições foram realizadas com indentador de diamante Vickers no microdurômetro SHIMADZU HMV-G 20ST do TRICORRMAT com as seguintes cargas normais: 25, 50, 100, 200 e 1000 gf de maneira a observar o comportamento da dureza em diferentes escalas e a presença ou não dos fenômenos ISE e RISE.

A Tabela 5 apresenta os resultados das medições e o respectivo expoente n da Lei de Meyer:

Tabela 5. Dureza dos materiais estudados (média e desvio padrão) em cinco cargas normais: 25, 50, 100, 200 e 1000 gf. Fonte: Autor, * Strey (2015), **Vanelli (2019). Obs¹: Referente a carga normal de 500 gf.

Amostra	HV0,025	HV0,05	HV0,1	HV0,2	HV1	n
HI_WC6Co	1520±154	1722±90	1742±46	1742±36	1802±34	2,08
HI_WC7Co	1477±46	1459±37	1557±29	1592±28	1637±20	2,04
HI_WC10Co	1332±113	1284±54	1284±50	1212±35	1221±16	1,95
HI_WC11Co	1182±152	1219±82	1284±49	1303±57	1333±17	2,07
MC_SiC	3138±259*	2989±290*	2928±133*	3011±217*	2725±244*	1,94
MC_Qtz	377±15**	533±61**	785±193**	880±289**	1074±185**¹	2,17
MC_TiO2	695±75	736±90	761±134	722±133	608±46	1,92
CT_AL96	1951±115	1468±115	1467±171	1565±69	1380±80	1,90
EG_AL96	1823±231	1497±79	1398±143	1321±158	1287±30	1,84
MC_AL96	1411±577	1638±170	1484±132	1408±115	1223±63	1,93
CT_AL99	2068±132	1657±88	1769±115	1918±39	1827±67	2,16
DC_AL99	1355±65	1696±78	1715±82	1930±66	1736±44	2,11
EG_AL99	1358±110	1499±98	1715±79	1894±162	1693±68	2,13
MC_AL99	1682±206	1710±161	1675±73	1588±126	1466±70	1,92
CT_ZTA	1815±284	1559±168	1522±99	1510±136	1293±132	1,85

DC_ZTA	1287±153	1584±96	1608±69	1830±80	1790±44	2,18
EG_ZTA	1639±196	1578±133	1496±69	1563±223	1466±45	1,95
MC_ZTA	1183±73	1533±107	1658±162	1644±183	1537±45	2,10
CT_ZrO2	1044±70	1190±33	1256±20	1238±50	1294±15	2,10
DC_ZrO2	871±29	1009±59	1188±39	1295±55	1247±31	2,18
MC_ZrO2	1287±131	1280±71	1281±77	1228±73	1269±34	2,01
CR_B4C	4907±721	3215±408	3015±313	3543±565	2515±320	1,74

De posse desses dados, foram construídos gráficos comparando a dureza medida com as durezas estimadas pelas equações de Meyer e do PSR modificado (Figura 18). Segundo alguns trabalhos, o fenômeno RISE, muito bem descrito pelo PSR modificado, pode ser observado somente em cargas muito baixas e durante um pequeno intervalo, como visto nos gráficos supracitados (JIANG, 2012; SAKAI, 1992).

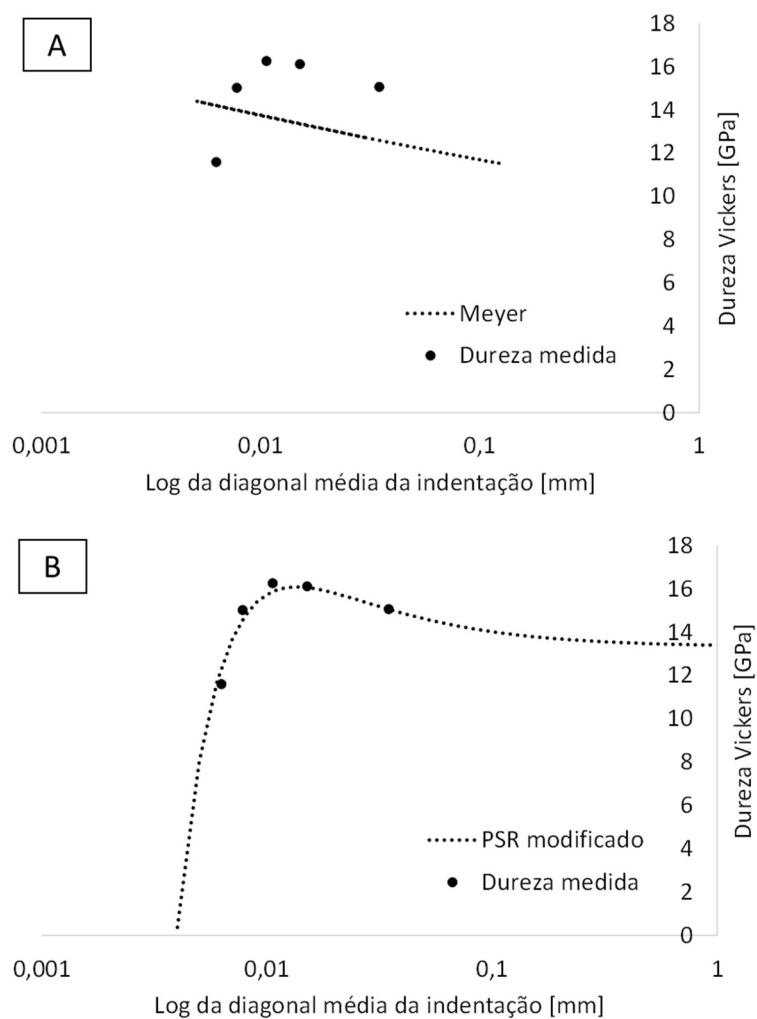


Figura 18. Comparação entre a dureza medida na MC_ZTA e a dureza estimada pelas equações de Meyer (A) e do PSR modificado (B). Fonte: autor.

Também foram construídos gráficos correlacionando a dureza medida com a dureza calculada, para cada amostra, utilizando tanto a abordagem de Meyer quanto a do

PSR modificado, afim de observar qual modelo apresentou melhor correlação com as durezas medidas (Figura 19).

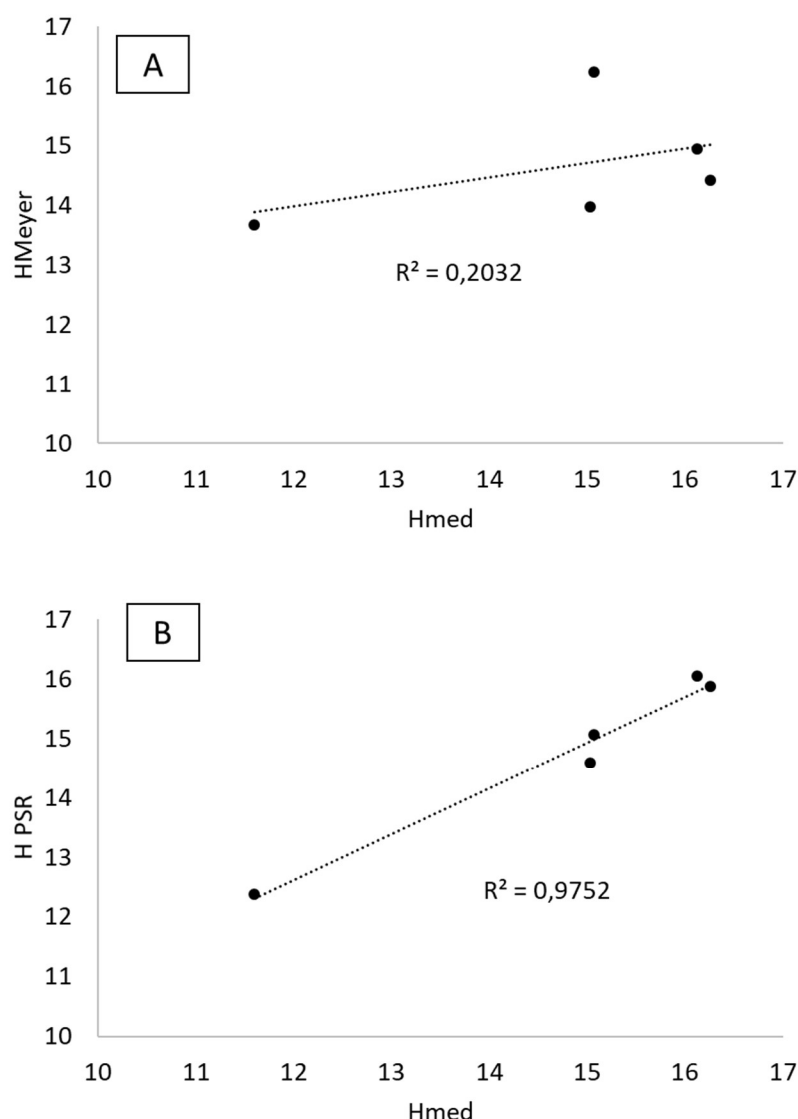


Figura 19. Correlação entre dureza medida e dureza calculada pelas equações de Meyer (A) e do PSR modificado (B), para a amostra MC_ZTA. Fonte: autor.

A Tabela 6 quantifica as correlações entre a dureza medida e as durezas estimadas pela equação de Meyer (6) e do PSR modificado (8) através do fator R^2 . O valor R^2 médio da correlação entre dureza medida e dureza calculada foi de $0,72 \pm 0,30$ para a equação do PSR modificado e de $0,62 \pm 0,21$ para a equação de Meyer, sendo que em 14 dos 22 materiais a dureza foi melhor estimada pela equação do PSR modificado.

Aos considerarmos somente os valores de R^2 do modelo que foi aplicado em cada material (modelo com maior R^2), o R^2 médio chega a $0,84 \pm 0,16$.

Tabela 6. Valores de correlação R^2 entre a dureza medida e as durezas estimadas pela equação de Meyer e do PSR modificado. Fonte: autor.

R^2 Hmed versus			R^2 Hmed versus		
Material	Hpsr	Hmeyer	Material	Hpsr	Hmeyer
HI_WC6Co	0,7804	0,6046	EG_AL99	0,7836	0,3650
HI_WC7Co	0,8219	0,8611	CT_AL99	0,9743	0,4725
HI_WC10Co	0,7747	0,7783	DC_AL99	0,8812	0,2964
HI_WC11Co	0,9662	0,8643	MC_AL99	0,9913	0,8804
MC_ZTA	0,9752	0,2032	CT_AL96	0,8194	0,5299
EG_ZTA	0,5346	0,7225	EG_AL96	0,9962	0,7912
CT_ZTA	0,5408	0,9033	MC_AL96	0,8491	0,5837
DC_ZTA	0,9076	0,6121	CR_B4C	0,0146	0,7397
CT_ZrO2	0,9445	0,6668	MC_SiC	0,1265	0,8212
MC_ZrO2	0,216	0,2182	MC_Qtz	0,2922	0,8238
DC_ZrO2	0,8067	0,5942	MC_TiO2	0,9403	0,4452

Dessa forma, a dureza utilizada para as correlações futuras deste trabalho, será a dureza, estimada pela equação de Meyer (6) ou pela equação do PSR modificado (8), na carga específica do ensaio. Por exemplo, nos ensaios de múltiplas indentações, a carga normal utilizada foi a de 50 N, logo, a dureza utilizada para as correlações será a dureza estimada pela equação com melhor coeficiente de correlação R^2 entre a dureza medida e a dureza calculada no material em questão correspondente à carga de 50 N.

4.5 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

As imagens da microestrutura dos metais duros HI_WC6Co e HI_WC11Co reveladas após ataque químico foram obtidas do trabalho de Magnol e colaboradores (2021) que estudaram materiais idênticos a esses (Figura 20) assim como as do carbeto de silício (Figura 21) obtidas de Vanelli (2019).

O ataque químico das amostras de cerâmicos puros se mostrou um processo desafiador, baseado em tentativa e erro, sendo que raramente foi obtido sucesso com a aplicação exata da metodologia encontrada da literatura, sendo necessário adaptá-la, mesmo assim, a bibliografia tomada como base para esses procedimentos foi a de Chinn (2002). Antes dos ataques, as amostras foram polidas até a suspensão de diamantes com 1 μm de diâmetro.

Apenas nas aluminas foi possível obter imagens aceitáveis afim de avaliar qualitativamente o tamanho dos grãos. Mesmo assim, em quase todas, o ataque químico foi excessivo, a exceção da DC_AL99 e da EG_AL99. As aluminas foram atacadas com ácido fosfórico (H_3PO_4) à 250°C , o tempo variou entre 30 e 120 segundos.

Na Figura 20 podemos perceber que além do maior percentual de cobalto, a amostra HI_WC11Co ainda possui maior tamanho de grão ($0,77\text{ }\mu\text{m}$) contra $0,56\text{ }\mu\text{m}$ da amostra HI_WC6Co (MAGNOL *et al.* 2021). Já no carbeto de silício (Figura 20), o tamanho de grão calculado por Vaneli (2019) foi de $3,9 \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$. Quanto as amostras de alumina (Figura 22 e Figura 23), somente as micrografias das amostras DC_AL99 e EG_AL99 apresentaram qualidade suficiente para medição do tamanho de grão, apresentando um tamanho médio de $1,91 \pm 0,12\text{ }\mu\text{m}$ e $2,32 \pm 0,19\text{ }\mu\text{m}$ (medidos segundo a norma ASTM E112). Mesmo sem poder medir quantitativamente os grãos das outras aluminas, é possível notar o maior tamanho de grão das aluminas do fabricante MC em relação aos demais fabricantes.

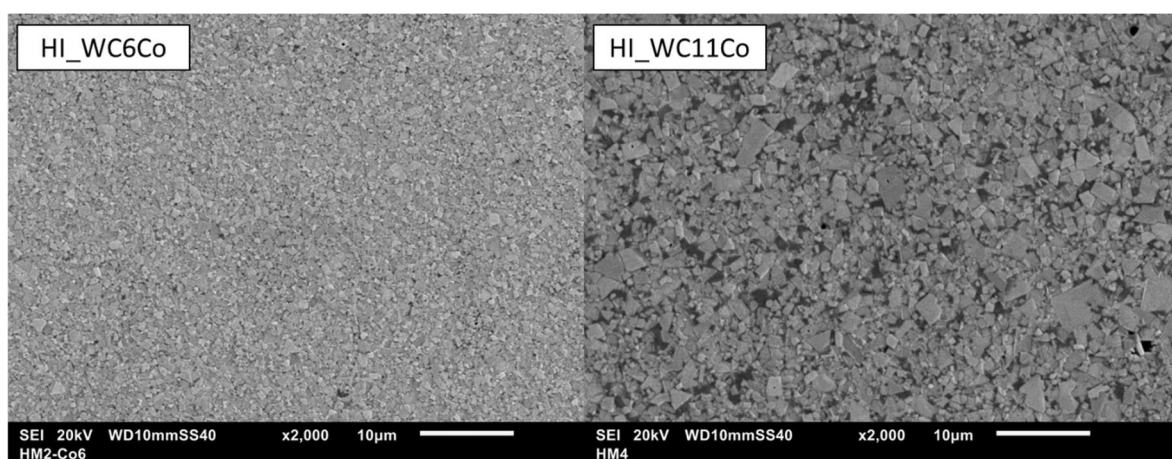


Figura 20. Micrografia eletrônica de varredura (MEV) das amostras de metal duro com 6 e 11% de cobalto após ataque com nital 2% e Murakami. Fonte: (MAGNOL *et al.*, 2021). Nota: Adaptado pelo autor.

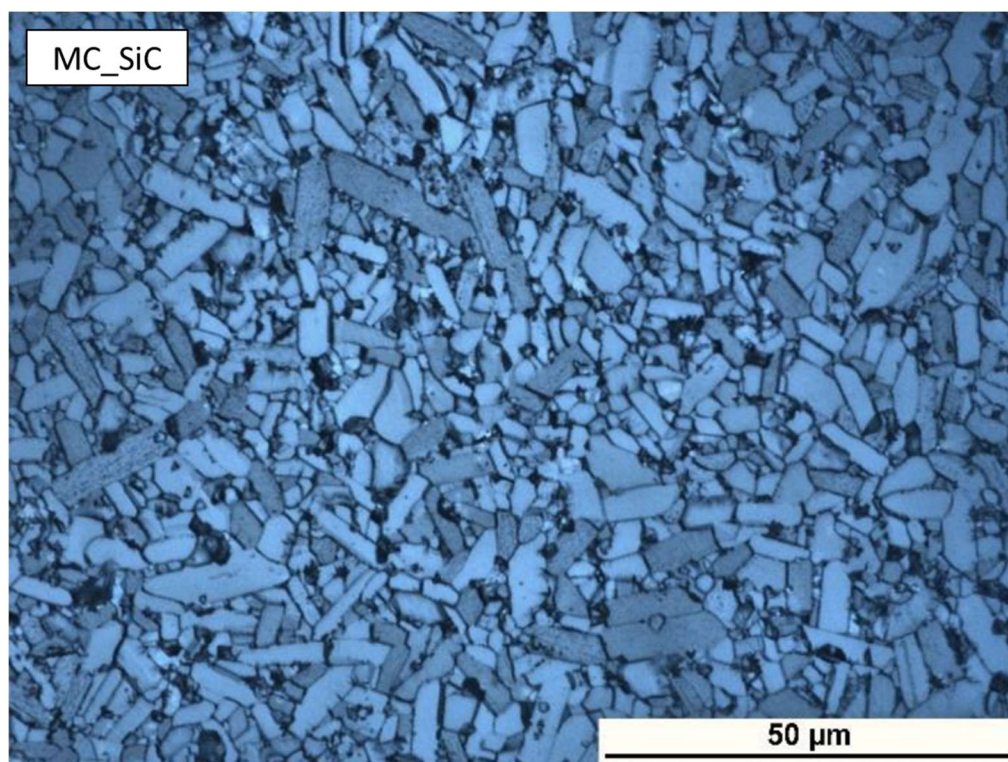


Figura 21. Micrografia óptica (MO) da amostra MC_SiC após ataque. Fonte: (VANELLI, 2019). Nota: Adaptado pelo autor.

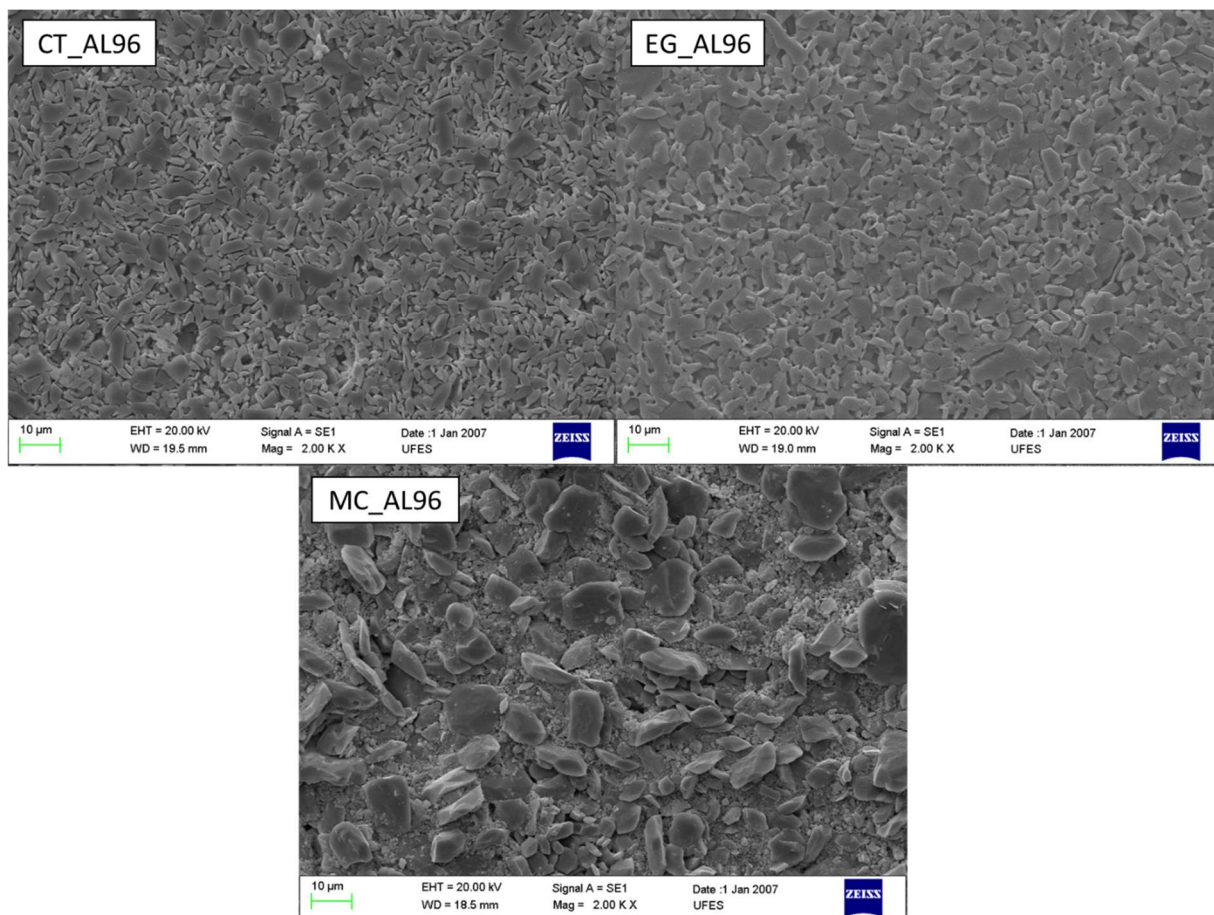


Figura 22. MEV das amostras de alumina com 96% de pureza após ataque com ácido fosfórico.
Fonte: autor.

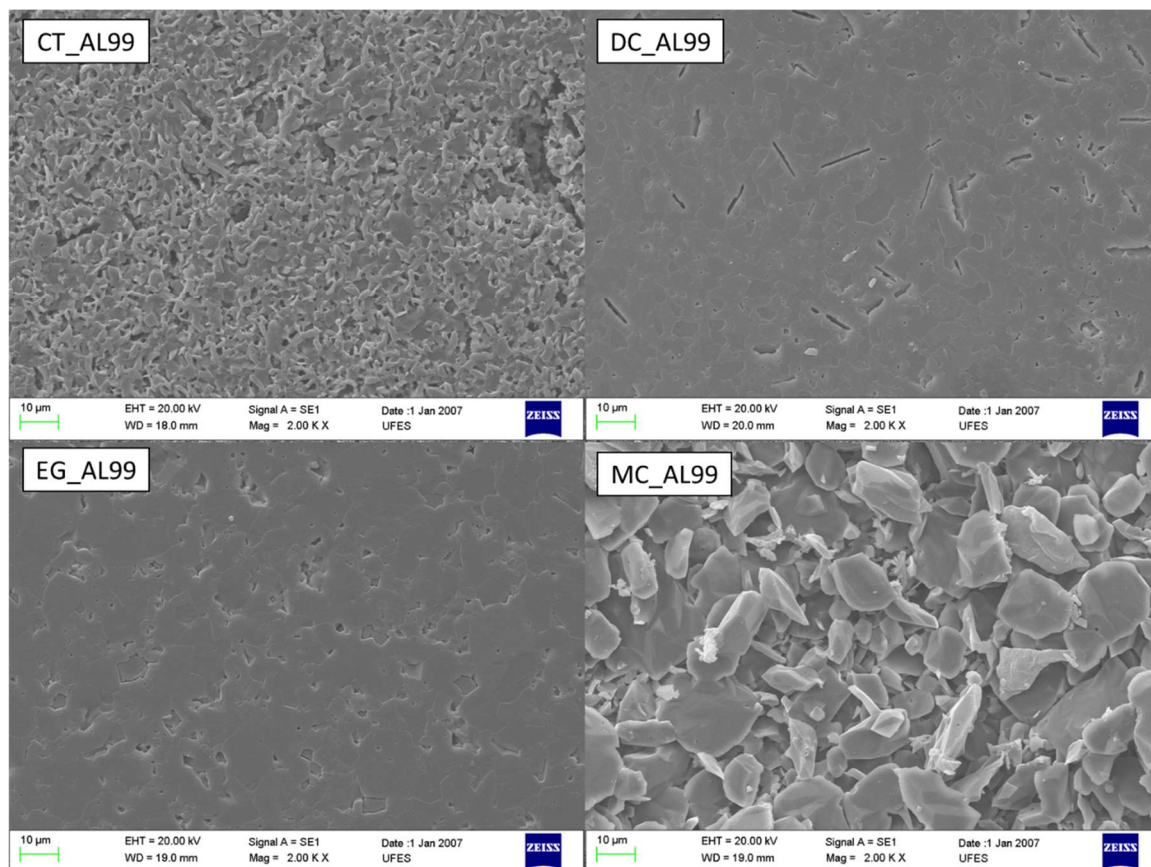


Figura 23. MEV das amostras de alumina com 99% de pureza após ataque com ácido fosfórico.
Fonte: autor.

5. ENSAIOS ABRASIVOS

Neste capítulo, serão abordados os procedimentos experimentais, mecanismos de desgaste e resultados quantitativos como atrito e volume de matéria perdida dos ensaios tipo múltiplas indentações (5.1), ensaios de riscamento (5.2) com indentadores de diamantes Vickers e Rockwell e ensaios tipo roda de borracha horizontal a seco (5.3). Ao final do capítulo, na seção 0, os resultados dos ensaios como um todo serão discutidos e correlacionados entre si.

Dutra *et al.* (2013) demonstraram que o comportamento do desgaste abrasivo depende das características construtivas no tribômetro. Dependendo da configuração experimental utilizada, diferentes propriedades do material podem determinar sua taxa de desgaste. Os ensaios de múltiplas indentações e de riscamento serão usados para uma análise controlada/individual dos mecanismos de desgaste e para exemplificar as diferenças entre os metais duros, os cerâmicos de engenharia e os de não engenharia (quartzo e titânia). Já o ensaio tipo roda de borracha traz essas comparações para uma situação mais próxima da real, onde vários fenômenos acontecem simultaneamente. Em cada ensaio, o volume perdido ou volume do dano dos materiais foi ranqueado e correlações com as principais propriedades e a quantidade de Evans e Wilshaw (1976) foram realizadas.

5.1 ENSAIOS DE MÚLTIPLAS INDENTAÇÕES INSTRUMENTADO

Silva Júnior (2008) e Silva Júnior, Costa e Mello (2011), simularam as indentações geradas pelo rolamento de partículas duras em um corpo macio através de um ensaio instrumentado onde várias indentações individuais, uma após a outra, eram realizadas. O tamanho e a distância entre indentações foi variado e como resultado, transições nos mecanismos de desgaste foram observadas. A principal vantagem desse método, assim como nos ensaios de esclerometria retilínea, é a possibilidade de realizar um estudo controlado dos eventos abrasivos.

5.1.1 Experimentos

Os ensaios de múltiplas indentações, assim como os ensaios de riscamento do capítulo 5.2, foram realizados no microtribômetro universal CETR Apex do Laboratório

de Caracterização de Superfície e Materiais (LCSM) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

De acordo com a Figura 24, tem-se a unidade responsável pela movimentação vertical, (Z - carriage), acoplada a ela, pode-se observar um bloco de montagem em que são alocados a célula de carga, a suspensão, o porta-indentador e o indentador. A célula de carga tem a capacidade de medir as forças em Z (carga normal) e em X (tangencial). A suspensão é composta por molas que atenuam a variação da carga normal durante os ensaios. O porta amostras é fixado à mesa responsável pelos movimentos em X e em Y. Para os ensaios, foram utilizadas duas células de carga, uma com faixa de medição de 0,2 a 20 N e resolução de 1 mN e outra com faixa de medição de 2 a 200 N e resolução de 10 mN. As células de carga foram calibradas antes do início dos ensaios de acordo com o manual CETR, 2009. A taxa de aquisição de dados utilizada nos ensaios foi de 50 Hz (MAGNOL, 2018).

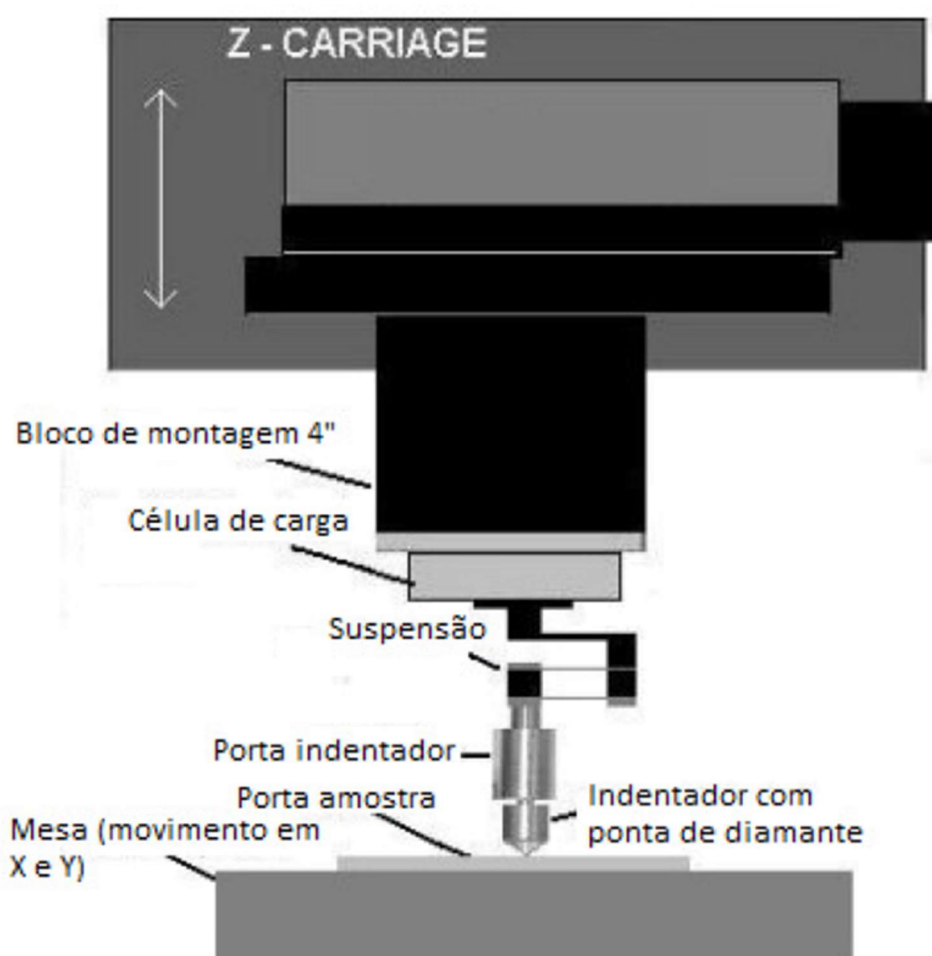


Figura 24. Desenho esquemático da unidade de esclerometria retilínea. Fonte: (CETR, 2009; MAGNOL, 2018).

5.1.1.1 Múltiplas indentações colineares

Foram realizadas onze seções com cinco indentações cada variando o grau de superposição, de cima para baixo, de maneira análoga ao método de SILVA JÚNIOR (2008), como elucidado na Figura 25, nas amostras HI_WC6Co, MC_SiC, MC_Al96, MC_ZrO2, MC_ZTA, MC_Qtz, MC_TiO2. Os graus de indentação estudados foram os de -500%, -200%, -100%, -75%, -50%, -25%, 0%, 25%, 50%, 75% e 100%. Todas as amostras foram estudadas sob a aplicação de uma carga de 50 N. Devido à grande porosidade (tamanho e quantidade de poros) de algumas amostras, não foi possível a realização de ensaios em cargas menores, onde o tamanho da indentação se equiparava ao tamanho dos poros, dificultando a avaliação dos resultados. Porém, nas amostras HI_WC6Co e MC_Qtz, foi possível a realização adicional de ensaios em menores cargas, sendo estas: 15 e 25 N.

O grau de superposição “*DS*” é calculado da seguinte forma:

$$DS = \frac{(SW - DI) \times 100\%}{SW} \quad (9)$$

Onde, “*SW*” é a largura da indentação e “*DI*” a distância entre indentações.

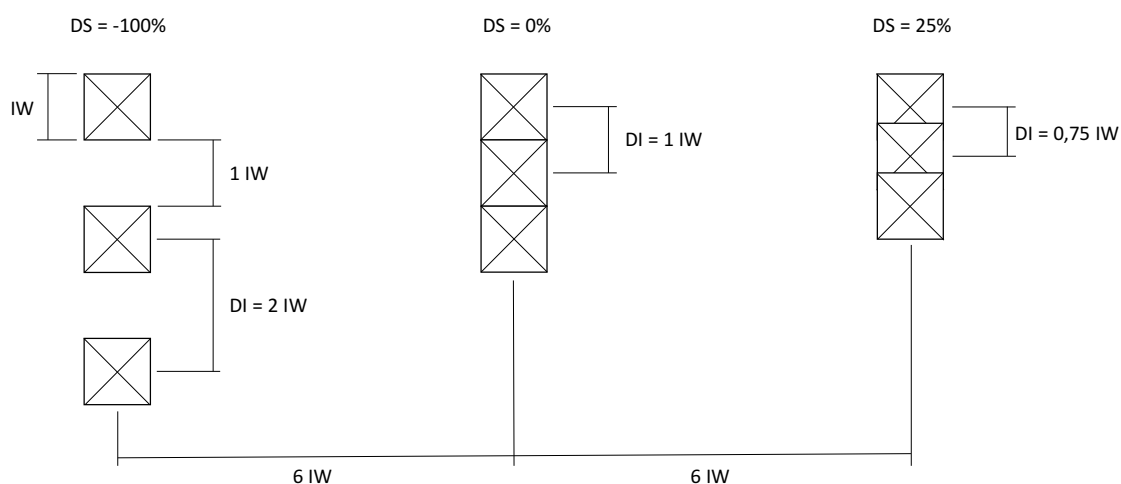


Figura 25. Desenho esquemático apresentando a metodologia dos ensaios de indentações múltiplas lineares variando o grau de superposição. Onde, IW = largura da indentação, DI = distância entre indentações e DS = grau de superposição. Fonte: autor.

5.1.1.2 Múltiplas indentações em área

Na tentativa de avaliar a influência da distância dos eventos abrasivos em todas as direções, nove indentações foram realizadas em formato de espiral, sendo a última indentação realizada no centro desta, como mostra a Figura 26. Esse método é similar ao método de “superposição em área” de SILVA JÚNIOR (2008). Os graus de superposição aplicados foram os mesmos do ensaio colineares com exceção do 100%, pois o mesmo teria efeito similar ao do grau 100% no ensaio lineares (uma indentação exatamente sobre a outra). A carga normal dos ensaios foi de 50 N.

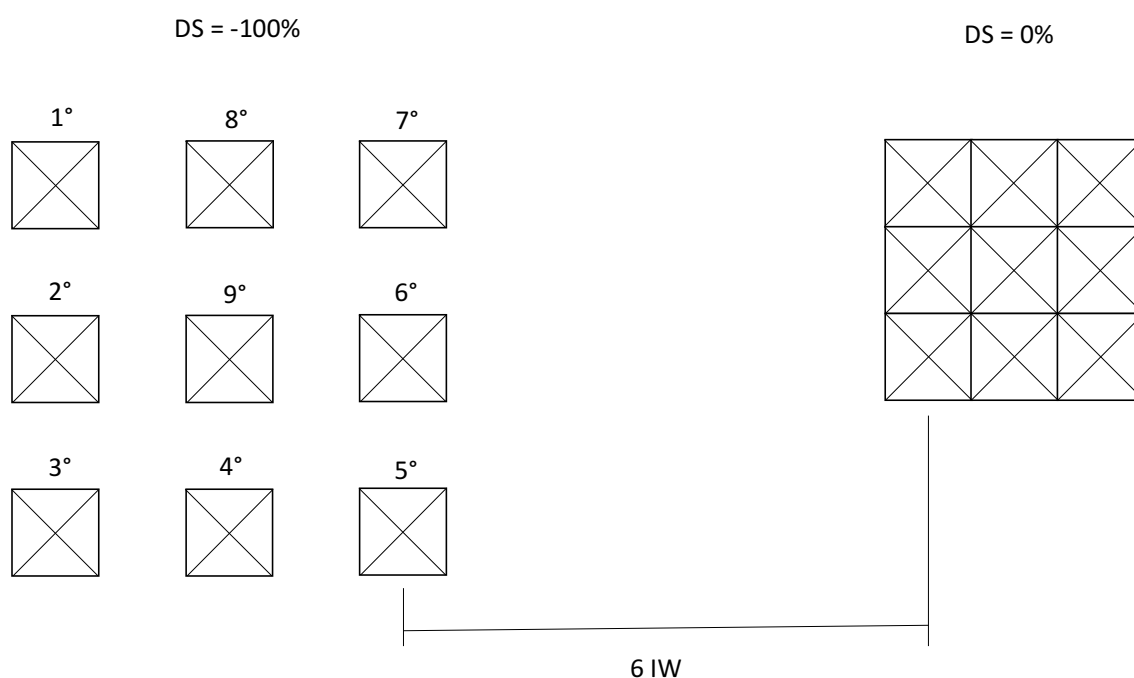


Figura 26. Desenho esquemático apresentando a metodologia dos ensaios de indentações múltiplas em área variando o grau de superposição. Fonte: autor.

5.1.1.3 Avaliação do volume das indentações

Para avaliação do volume das indentações, foi utilizado analisador tridimensional de superfícies S-neox[®] da Sensofar do TRICORRMAT. Nesse equipamento, uma imagem é obtida através da metodologia confocal. As figuras Figura 27 e Figura 28 apresentam exemplos superfícies detectadas pelo S-neox[®]. Esse equipamento é integrado ao software MountainsMap[®], onde é possível tratar os dados obtidos pelo equipamento e ainda analisar parâmetros como rugosidade e volume. Para o cálculo do volume das indentações utilizou-se do auxílio de uma função que o calculava

simulando o volume de líquido necessário para preencher as cavidades geradas por, nesse caso, as indentações. Bastava selecionar a região de interesse e os dados do volume eram obtidos automaticamente como mostra a Figura 29.

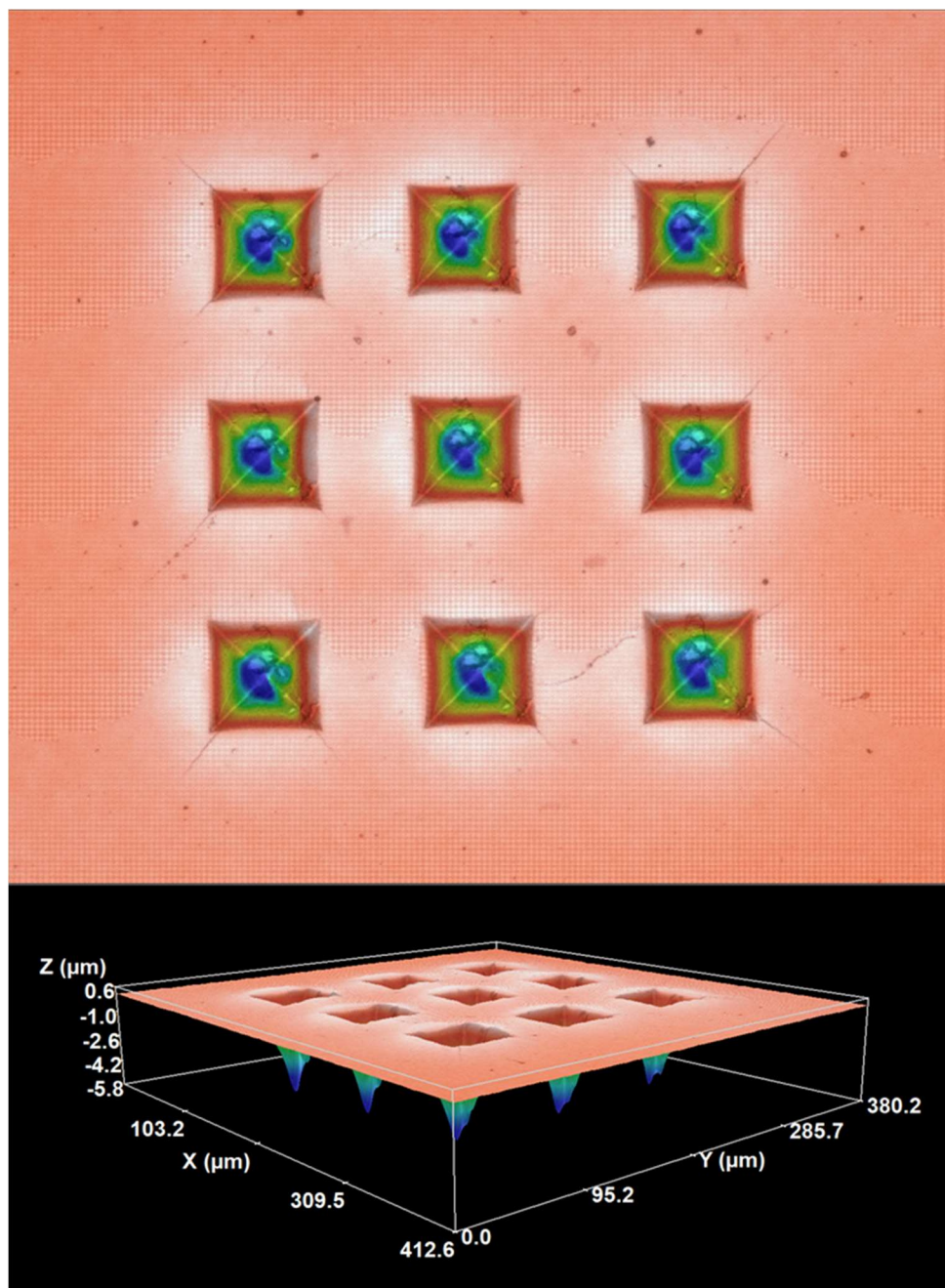


Figura 27. Análise tridimensional da superfície da amostra HI_WC6Co – Grau de superposição de - 100%. Fonte: autor.

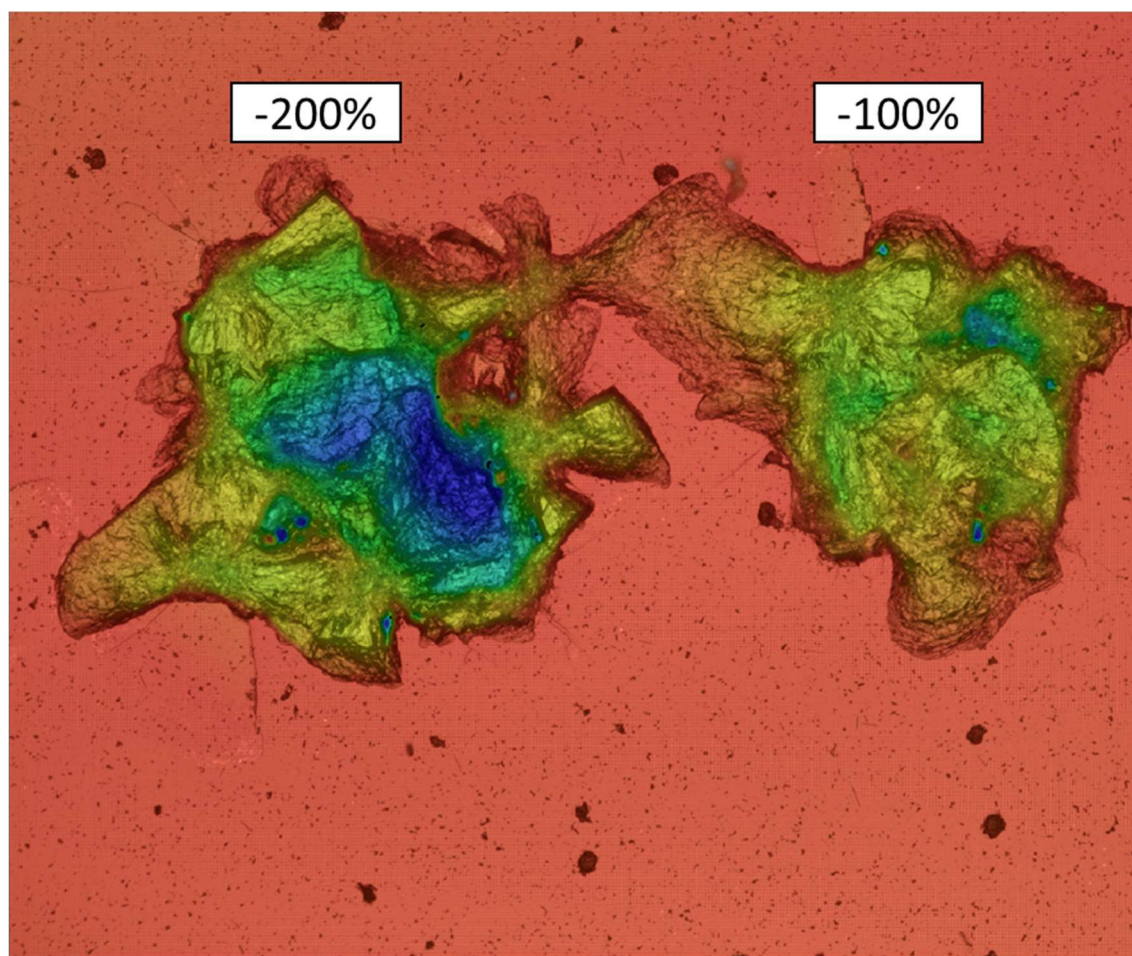


Figura 28. Análise tridimensional da superfície da amostra MC_SiC – Graus de superposição de -200% e -100%. Fonte: autor.

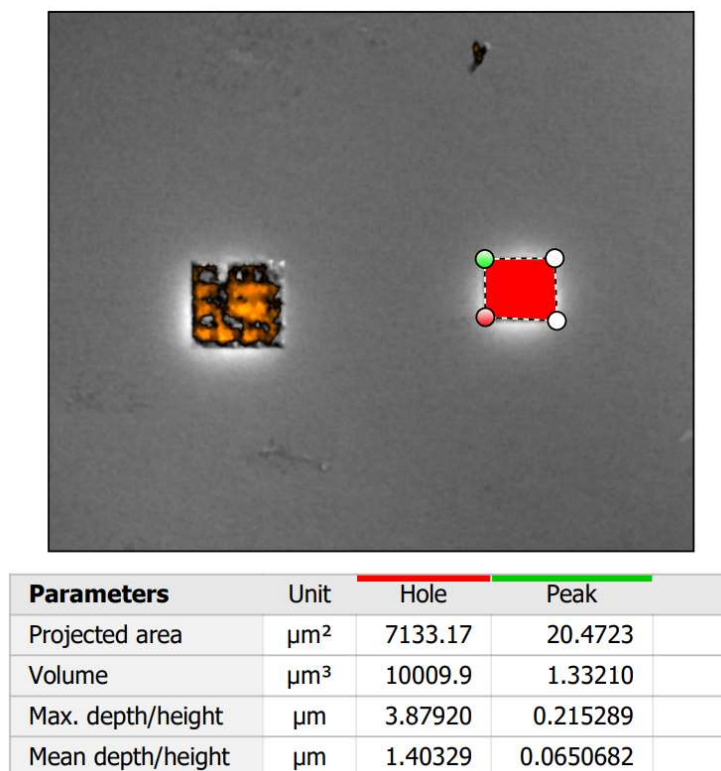


Figura 29. Medição do volume no grau de superposição de 50% da amostra HI_WC7Co. Fonte: autor.

5.1.2 Mecanismos de desgaste: múltiplas indentações colineares

Na amostra HI_WC6Co, nos graus de -500% e -200%, trincas radiais foram observadas nos vértices das indentações, como esperado em um ensaio de dureza ou tenacidade à fratura por indentação comum. Nos graus de -100%, as trincas radiais passaram a ser nucleadas nas arestas das indentações. No grau de -75% essas trincas foram conectadas. Em -25%, a quantidade de trincas aumentou. Em graus onde há superposição (25%, 50%, 75% e 100%) trincas radiais continuaram a serem observadas juntamente com grande deformação plástica (Figura 30). Destacamento de material não foi observado para a HI_WC6Co.

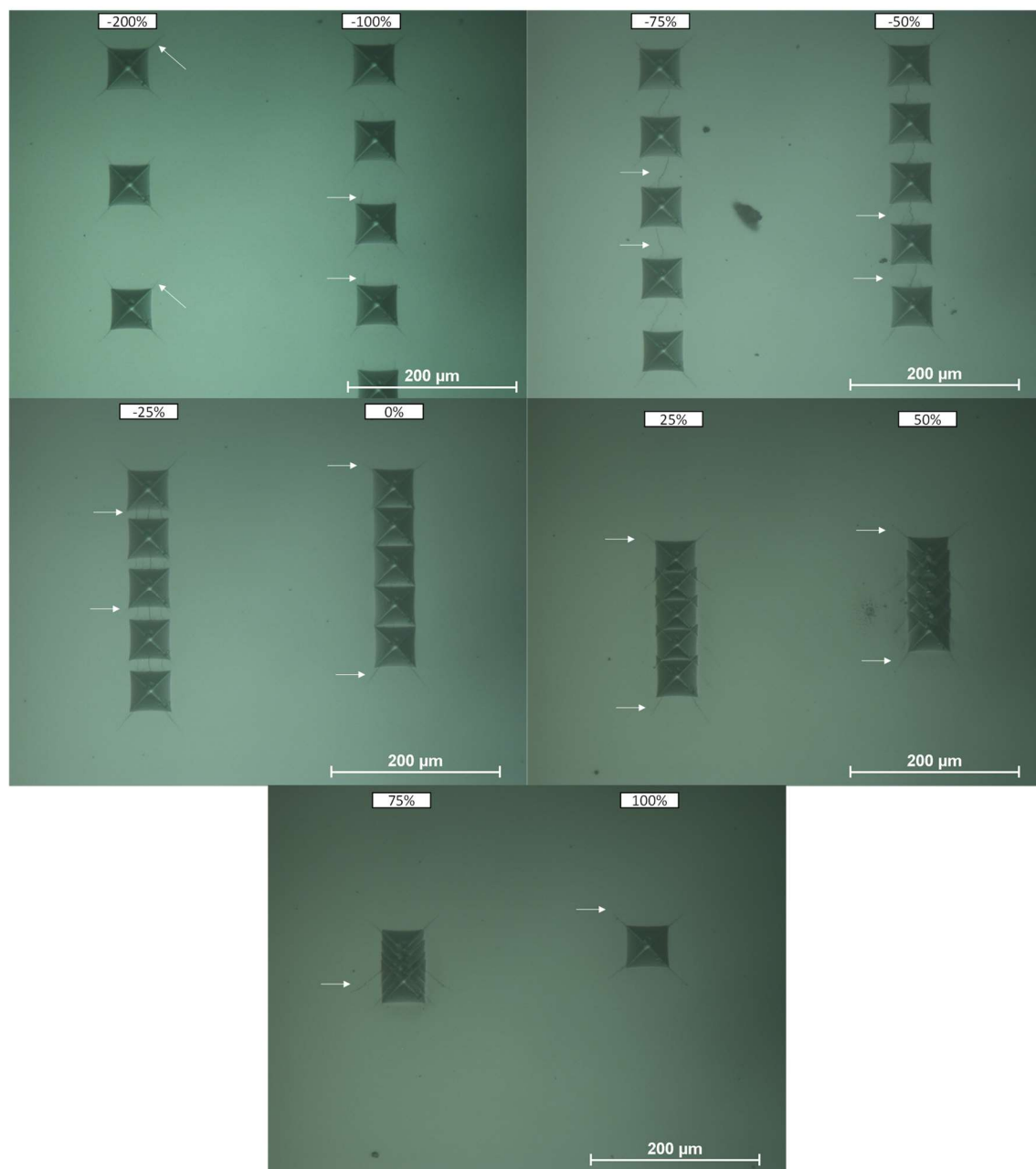


Figura 30. HI_WC6Co – 50 N - Alteração da direção e sentido das trincas radiais (setas brancas) a partir de -100%. Fonte: autor.

Quando estudadas em menores cargas (15 e 25 N), amostras tenazes como a HI_WC6Co e amostras frágeis como a MC_Qtz, não obtiveram sua resposta ao grau de superposição alteradas, como podemos observar nas figuras Figura 31 e Figura 32

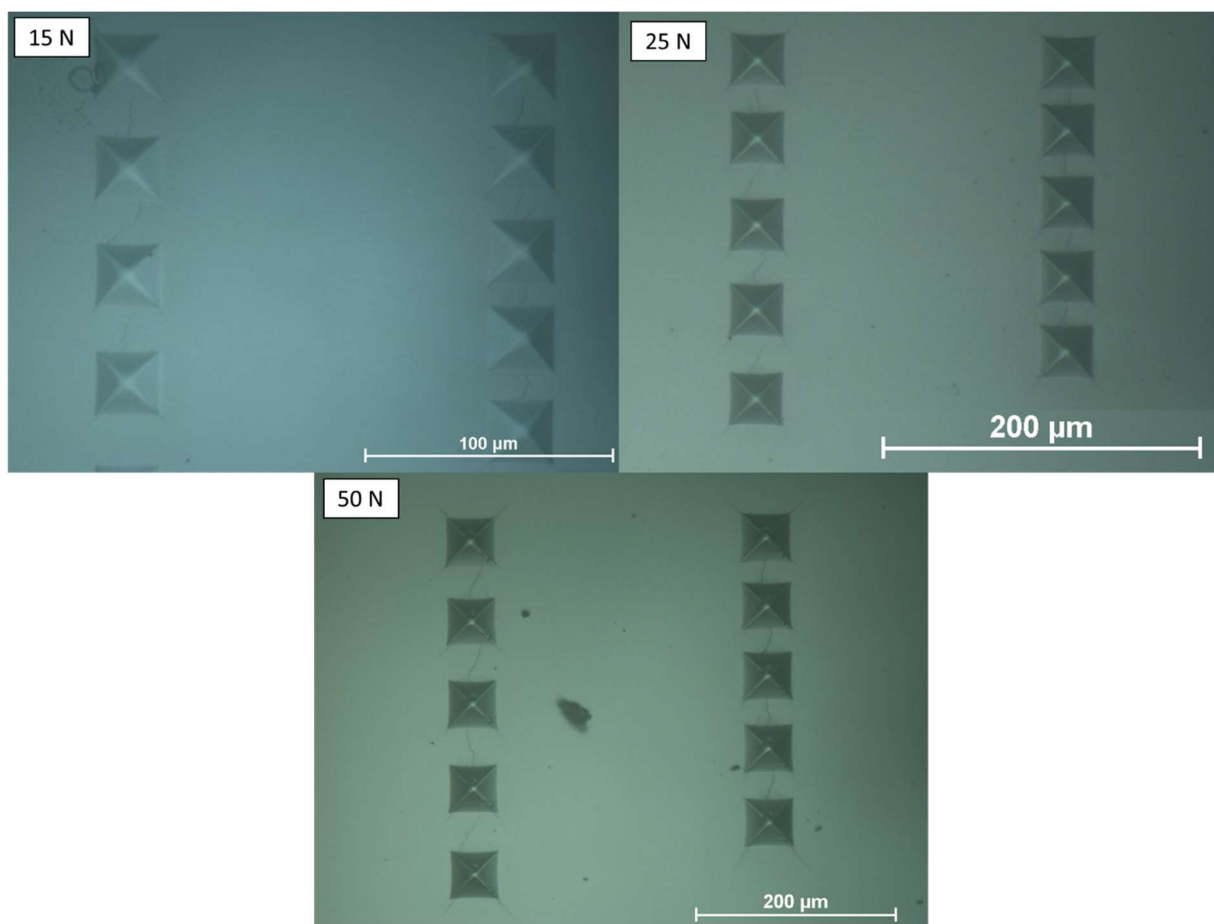


Figura 31. Graus de superposição (-75% e -50%) em três diferentes cargas normais (15, 25 e 50 N) na amostra HI_WC6Co. Fonte: autor.

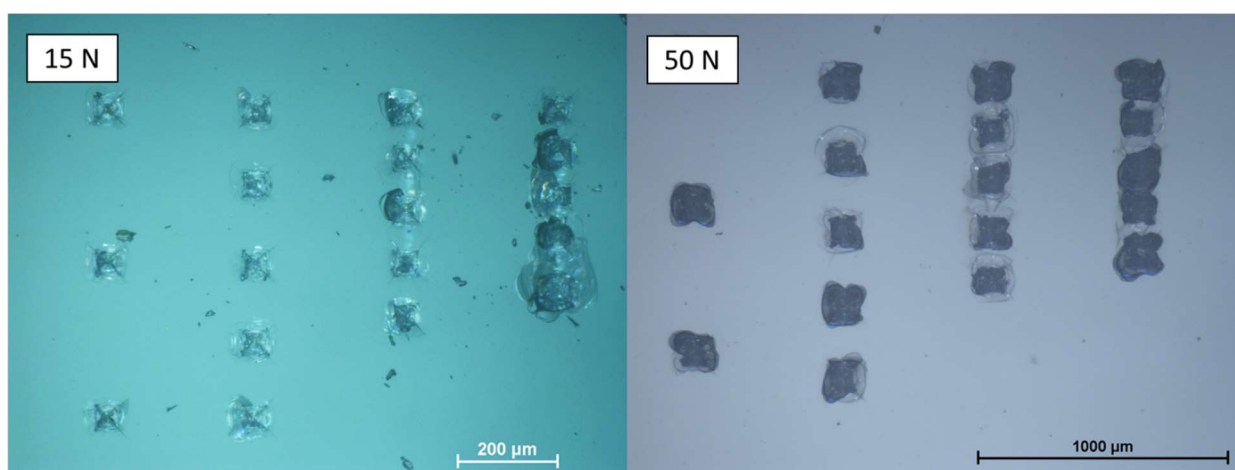


Figura 32. Graus de superposição (-500%, -200%, -100% e -75%) em diferentes cargas normais (15 e 50 N) na amostra MC_Qtz. A ampliação é menor nos ensaios sob carga de 50 N afim de possibilitar a visualização de uma maior quantidade de graus de superposição. Fonte: autor.

Ao todo, seis materiais foram estudados com os ensaios de múltiplas indentações colineares (HI_WC6Co, MC_Al96, MC_SiC, MC_Qtz, MC_TiO₂ e MC_ZTA). Ao comparar os resultados desses mesmos materiais com o ensaio de múltiplas

indentações em área, os mecanismos de desgaste obtidos foram similares, como pode ser visto no exemplo da Figura 33 para o SiC assim como os resultados quantitativos, ao compararmos os gráficos da seção 5.1.4. Assim, por abordar duas dimensões, produzindo resultados com maiores detalhes, apenas os ensaios em área foram levados à frente no restante dos materiais.

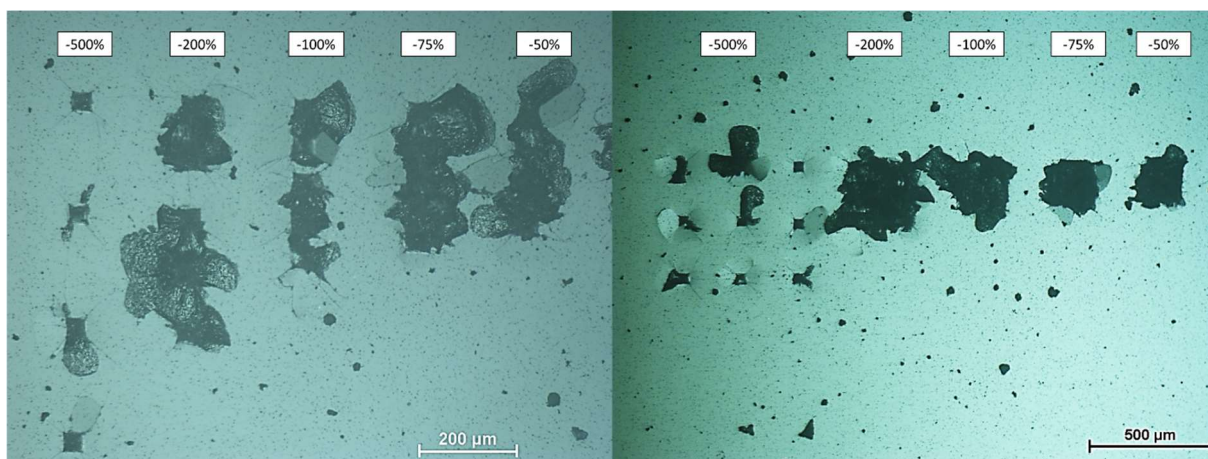


Figura 33. Ensaios de múltiplas indentações colineares e em área no carbeto de silício (MC_SiC).
Nota: A ampliação é menor na imagem das múltiplas indentações em área afim de possibilitar a visualização de uma maior quantidade de graus de superposição. Fonte: autor.

5.1.3 Mecanismos de desgaste: múltiplas indentações em área

O mesmo mecanismo de alteração da origem das trincas radiais (do vértice para aresta) e do aumento gradativo do tamanho e quantidade de trincas à medida que as indentações se aproximavam também foi observado nas indentações em área na HI_WC6Co. Porém, um novo fenômeno foi notado nesses ensaios (Figura 34), caracterizado por uma supressão do trincamento radial na última indentação dos ensaios (indentação central), essa supressão inicia-se no grau de superposição de -100%, permanecendo até o último grau onde ainda existe afastamento entre as

indentações (-25%). Nos graus onde a superposição de fato ocorre (25%, 50% e 75%), deformação plástica substancial foi notada.

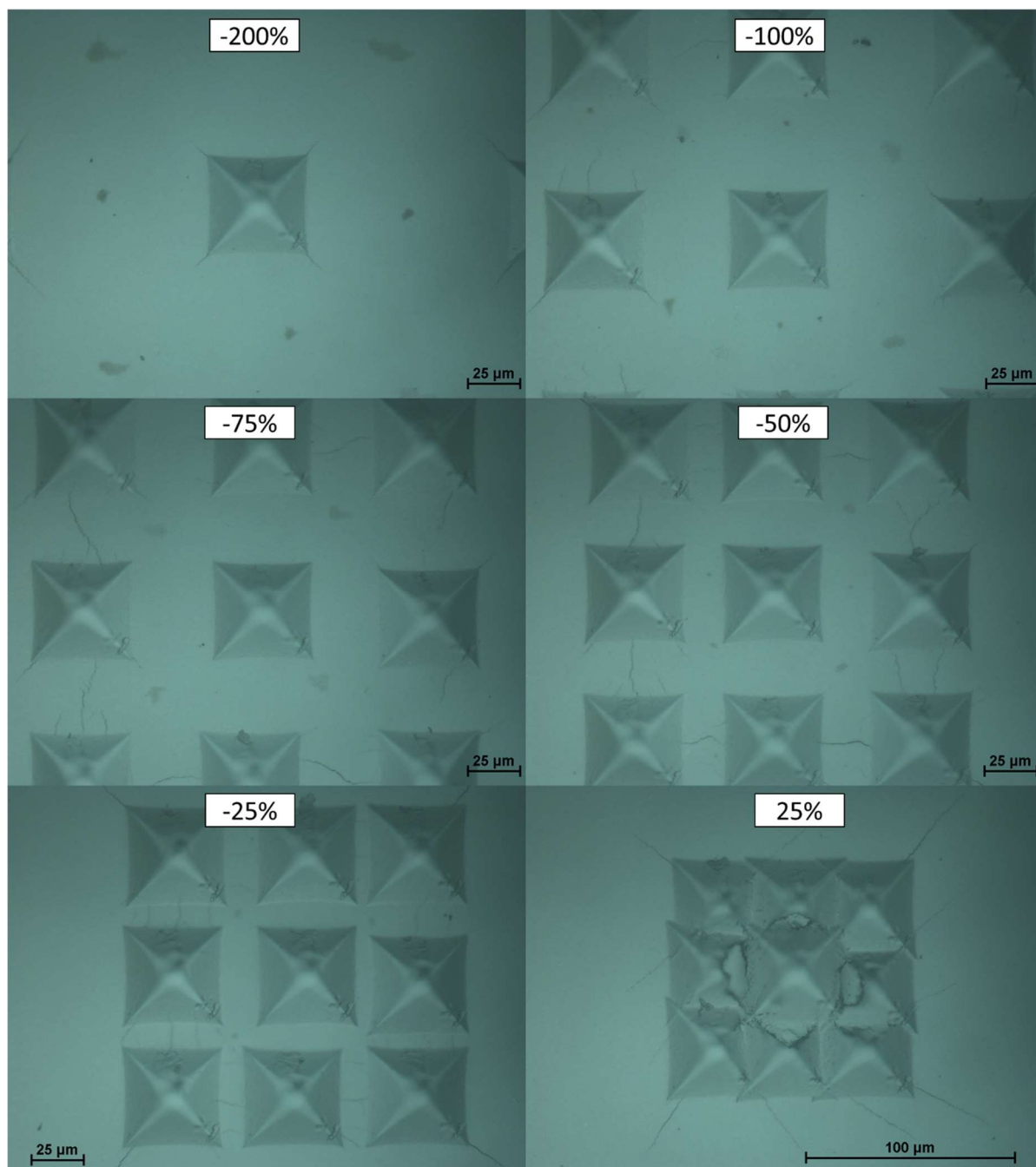


Figura 34. Comportamento da amostra HI_WC6Co nos ensaios de múltiplas indentações em área sob carga de 50 N. Fonte: autor.

Além da similaridade de comportamento com a amostra de carbeto de tungstênio com 6% de cobalto, a supressão do trincamento na indentação central também foi observada, de maneira mais discreta, na amostra de zircônia (Figura 35)

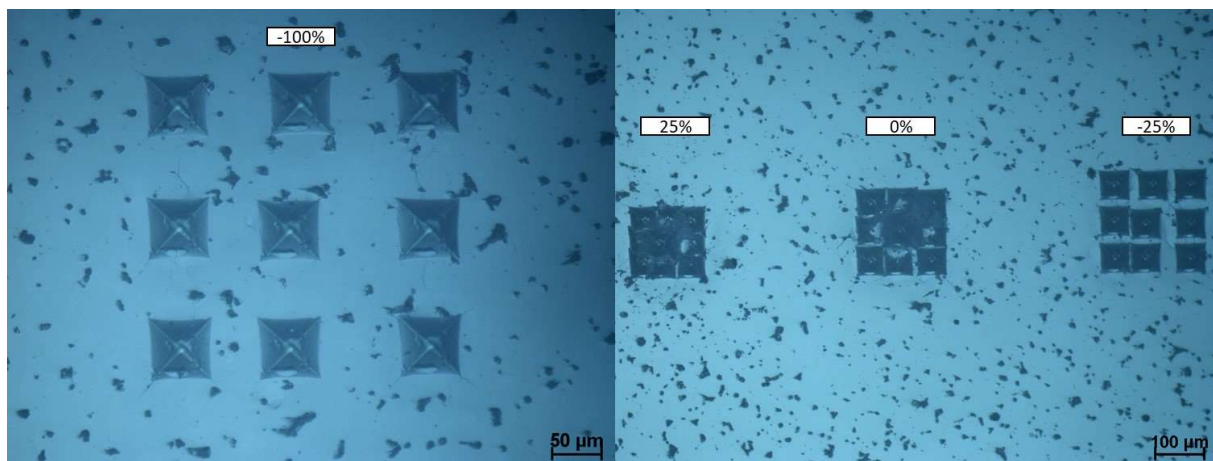


Figura 35. MC_ZrO₂ - 50 N - Comportamento plástico e supressão do trincamento na indentação central, similar a amostra de metal duro. Fonte: autor.

Já a amostra de quartzo, apresentou trincamento lateral, indicando comportamento mais frágil que os materiais anteriores, porém, vale notar que este trincamento permaneceu contido à região dos ensaios como mostram as imagens dos graus de superposição de 0% e 25% na Figura 36. O mesmo fenômeno de supressão do trincamento também foi notado, como pode ser observado na Figura 36, no grau de superposição de -75%, na oitava e nona indentação (ver esquema da Figura 26).

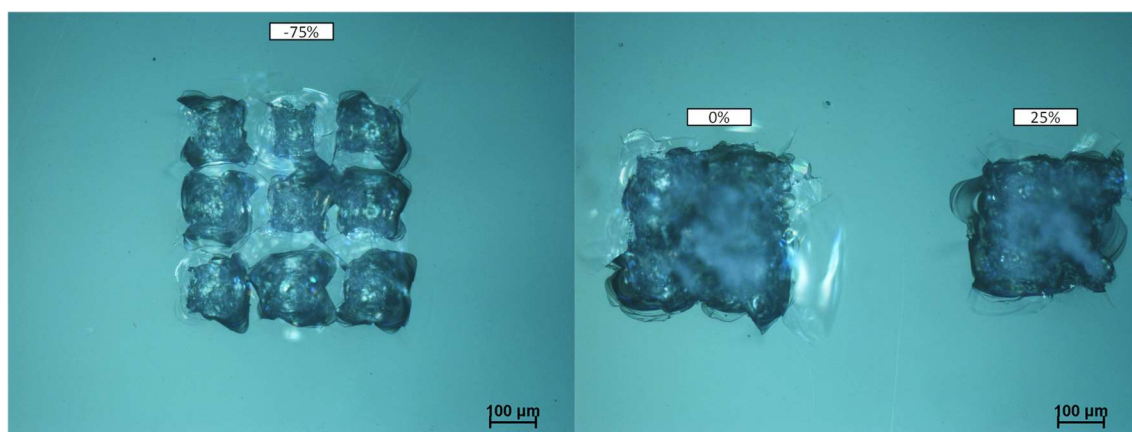


Figura 36. MC_Qtz – 50 N – Supressão do trincamento e trincamento moderado (quando comparado à MC_SiC) no quartzo.

Indentadores afiados, como o Knoop e o Vickers, podem causar um certo grau de deformação plástica remanescente, gerando assim, o chamado contato elasto-plástico. Nesses casos, diversos tipos de trincas podem ser gerados, como trincas medianas, laterais e radiais (MARSHAL e LAWN, 1979; COOK e PHARR, 1990).

As trincas radiais crescem paralelamente ao eixo de carregamento, emanando dos vértices das indentações (devido à amplificação das tensões nessa região) e

permanecendo próximas à superfície. Elas iniciam-se quase que imediatamente com o início do carregamento para materiais cristalinos e na fase de descarregamento para os vidros comuns (COOK e PHARR, 1990).

Segundo Chiang, Marshall e Evans (1982), as tensões compressivas desenvolvidas na zona plástica do contato, impedem o avanço desse tipo de trincamento. Assim, uma hipótese para a supressão do trincamento da indentação central nos ensaios de múltiplas indentações em área seria a supressão do trincamento pela influência das zonas plásticas dos ensaios anteriores. No trabalho desses autores, uma equação foi desenvolvida para o cálculo da zona plástica relativa das indentações (β) e validada com resultados experimentais.

A zona plástica relativa (β) nada mais é que a relação entre o raio da zona plástica (b) e o raio da indentação (a), assim:

$$\beta = \frac{b}{a} \quad (10)$$

A equação desenvolvida por Chang, Marshall e Evans (1982) pode calcular β através da relação:

$$\frac{E}{p} = \frac{9 \left[(1 - \nu)(\beta)^3 - \frac{2(1 - 2\nu)}{3} \right]}{2[1 + \ln(\beta)^3]} \quad (11)$$

Onde,

E = Módulo de elasticidade

p = Pressão de contato (Segundo os próprios autores, a relação entre dureza e pressão de contato é em torno de 0,8 para vários materiais, variando sutilmente com o valor de β)

ν = Coeficiente de Poisson

Após o cálculo de β , o próximo passo é calcular o raio da zona plástica (b). Para um indentador do tipo Vickers:

$$\beta = \frac{b}{a} = \left(\frac{b}{\frac{d}{2}} \right) \left(2^{\frac{1}{2}} \pi / \cot \psi \right)^{\frac{1}{3}} \quad (12)$$

Onde,

d = diagonal da indentação

2ψ = ângulo entre as faces do indentador (136° para o Vickers)

Fazendo os cálculos para o material onde o fenômeno da supressão do trincamento fora mais nítido, HI_WC6Co, sendo $E = 640$ GPa e $\nu = 0,204$ (DOI *et al.*, 1970). O resultado foi que, para este material, o raio da zona plástica calculado foi de $50,62 \mu\text{m}$, assim, as zonas plásticas se tocavam a partir de -120% de superposição, já havendo influência considerável no grau de superposição de -100% como mostra o esquema da figura, onde o efeito de supressão foi primeiramente notado.

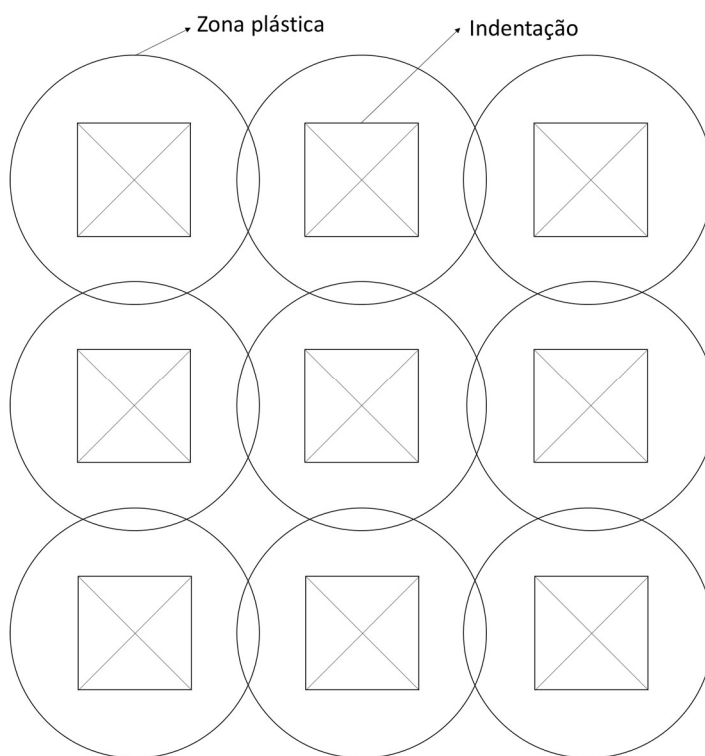


Figura 37 – Esquema apresentando a zona plástica abaixo da indentação na amostra de carbeto de tungstênio com 6% de cobalto no grau de superposição de -100%. Fonte: autor.

Já nas outras amostras de metal duro (HI_WC7Co, HI_WC10Co e HI_WC11Co), nenhum tipo de trincamento foi observado, exibindo comportamentos similares ao

exibido na Figura 38, possivelmente devido a maior tenacidade à fratura desse materiais

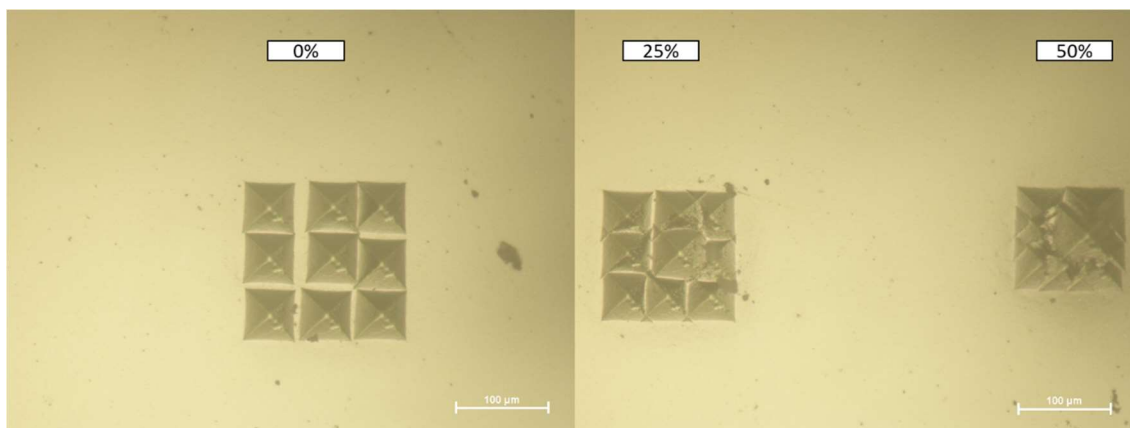


Figura 38. Comportamento da amostra HI_WC11Co nos ensaios de múltiplas indentações em área sob carga de 50 N. Fonte: autor.

O Comportamento da MC_SiC nos ensaios de múltiplas indentações em área foi similar ao comportamento observado nos ensaios de múltiplas indentações lineares, onde o trincamento lateral esteve presente desde do grau de superposição de -500%, se tornando dominante a partir de -200%, como já exemplificado na (Figura 33)

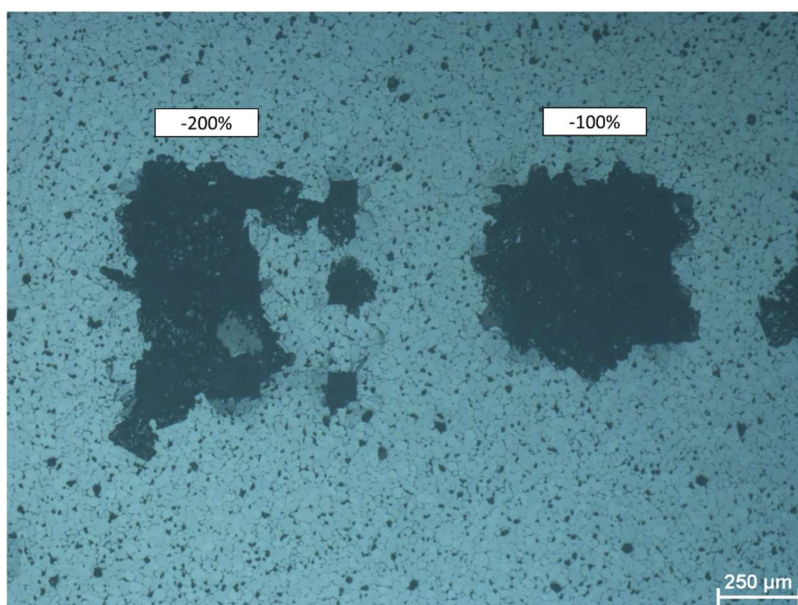


Figura 39. MC_TiO2 – 50N – Trincamento além da região dos ensaios a partir de -200%. Fonte: autor.

A MC_TiO₂ (Figura 39) apresentou trincamento extensivo somente a partir de -200%, indicando menor fragilidade que a MC_SiC, assim como nos ensaios colineares.

Nas aluminas com 96% e 99% de pureza, a transição para trincamento com destacamento de material ficou entre -75% e -100% como mostra a Figura 40 na MC_AL96 e a Figura 41 na DC_AL99. Assim como nos ensaios anteriores (colineares) o trincamento se deu de forma menos severa que no carbetto de silício, ficando contido à região das indentações.

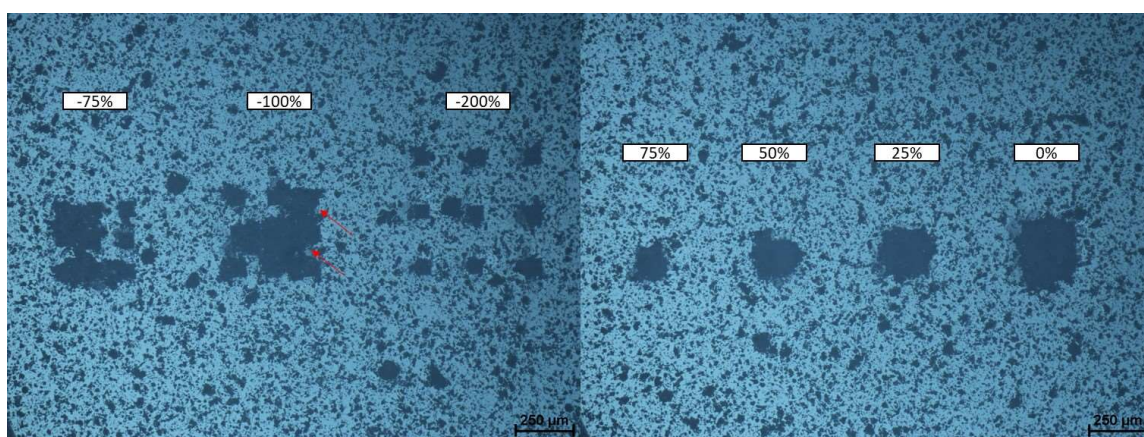


Figura 40. MC_AL96 – 50 N - Trincamento moderado na alumina com 96% de pureza. Fonte: autor.

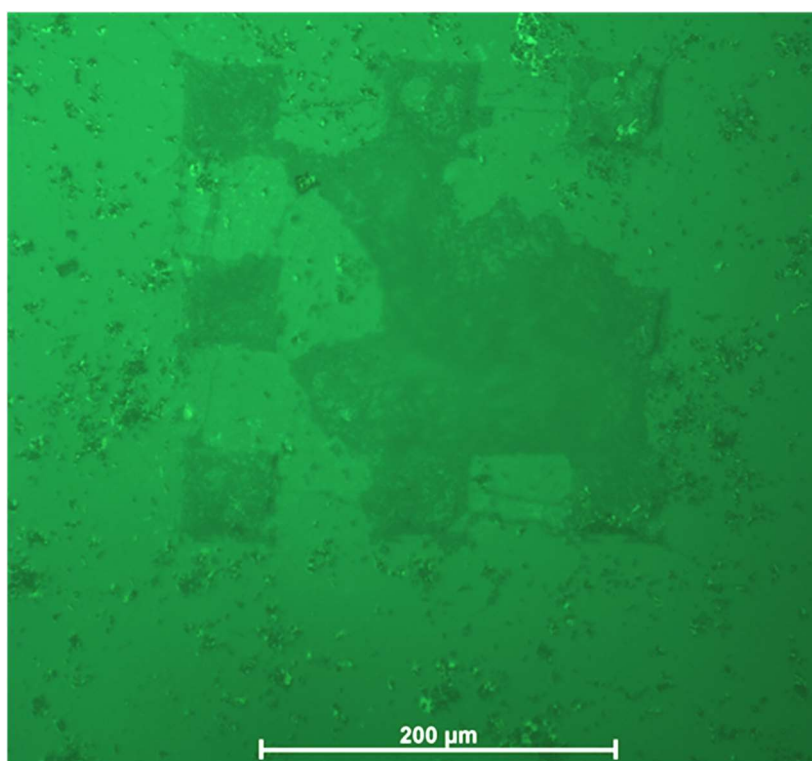


Figura 41. Trincamento contido à região dos ensaios no grau de superposição de -100% na amostra DC_AL99. Fonte: autor.

As ZTA's apresentaram comportamento similar as aluminas, porém, estas exibiram um trincamento ainda mais contido, restrito a área das indentações (Figura 42) e início do destacamento entre -100% e -50%.

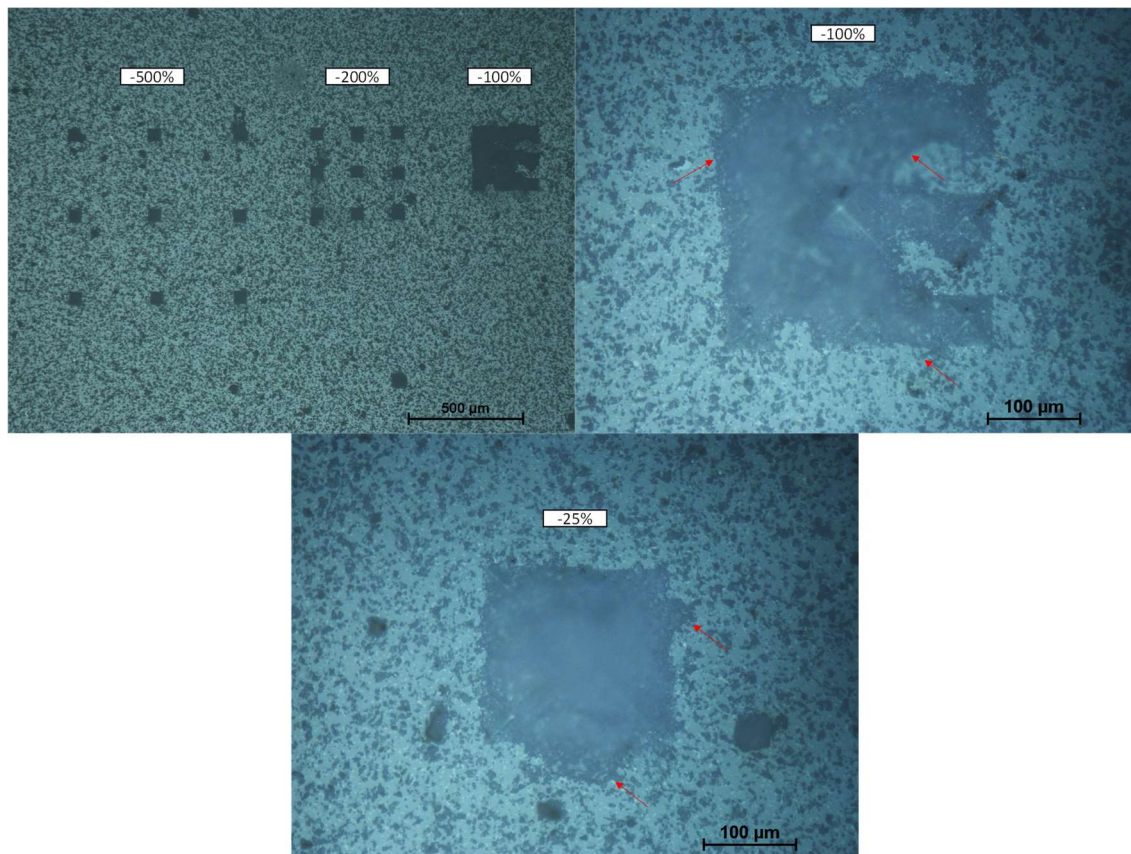


Figura 42. MC_ZTA – 50 N – Destacamento de material restrito a região das indentações (setas vermelhas). Fonte: autor.

No caso do carbetto de boro (CR_B4C), o trincamento, apesar de contido, estendeu-se um pouco além da região das indentações (Figura 43) permanecendo assim até o grau de superposição de 75%.

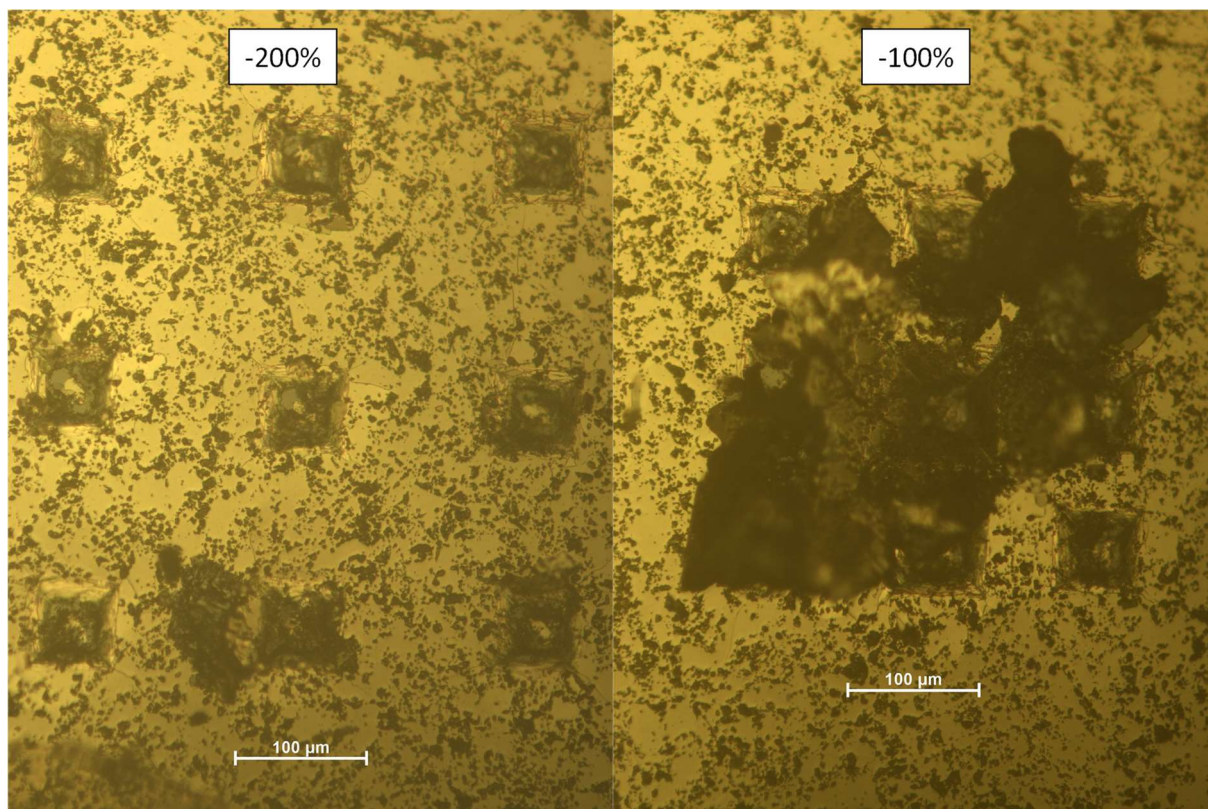


Figura 43. Comportamento do carbetto de boro (CR_B4C), durante os graus de superposição de -200% e -100%. Fonte: autor.

Em resumo, os materiais que exibiram comportamento mais frágil, com destacamento de material além da região dos ensaios foram a titânia e o carbetto de silício. O quartzo também manifestou grande trincamento, porém contido a região dos ensaios. As aluminas e ZTA's apresentaram trincamento com destacamento de material contido à região das indentações a partir de -100% e -75% de superposição. O carbetto de boro apresentou trincamento além da região das indentações, porém, em menor extensão quando comparado a titânia e o carbetto de silício. As zircônias e os metais duros exibiram mecanismos plásticos e ausência de trincamento.

5.1.4 Múltiplas indentações: resultados quantitativos

Os gráficos da Figura 44 apresentam o volume do dano medido via microscopia confocal dos ensaios de múltiplas indentações colineares e em área de 7 materiais primeiramente testados. Neles, pôde-se notar grande semelhança no que tange ao comportamento e classificação dos materiais, dessa forma, como mencionado anteriormente, o restante dos materiais será avaliado apenas pela configuração em área.

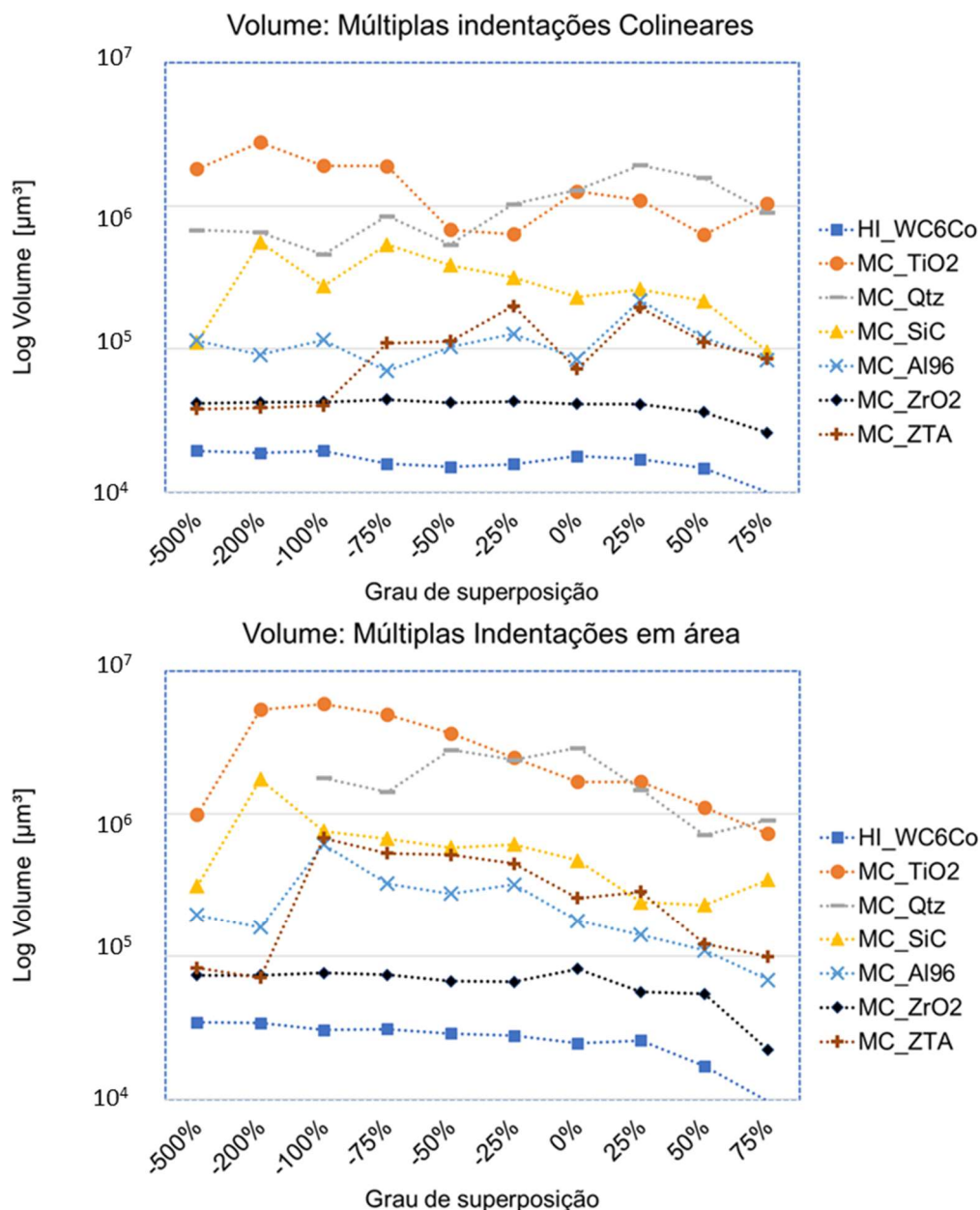


Figura 44. Comparação entre os resultados quantitativos dos ensaios de múltiplas indentações colineares e em área. Fonte: autor.

O gráfico da Figura 45 apresenta a média dos volumes do dano para cada material e/ou grupo de material, nele, podemos notar que os metais duros apresentaram os menores valores de volume do dano, o que indica uma maior resistência ao desgaste. Além disso, é possível perceber uma grande diferença entre os cerâmicos de engenharia (SiC, B₄C, ZTA's, zircônias e aluminas) e outros cerâmicos (titânia e quartzo).

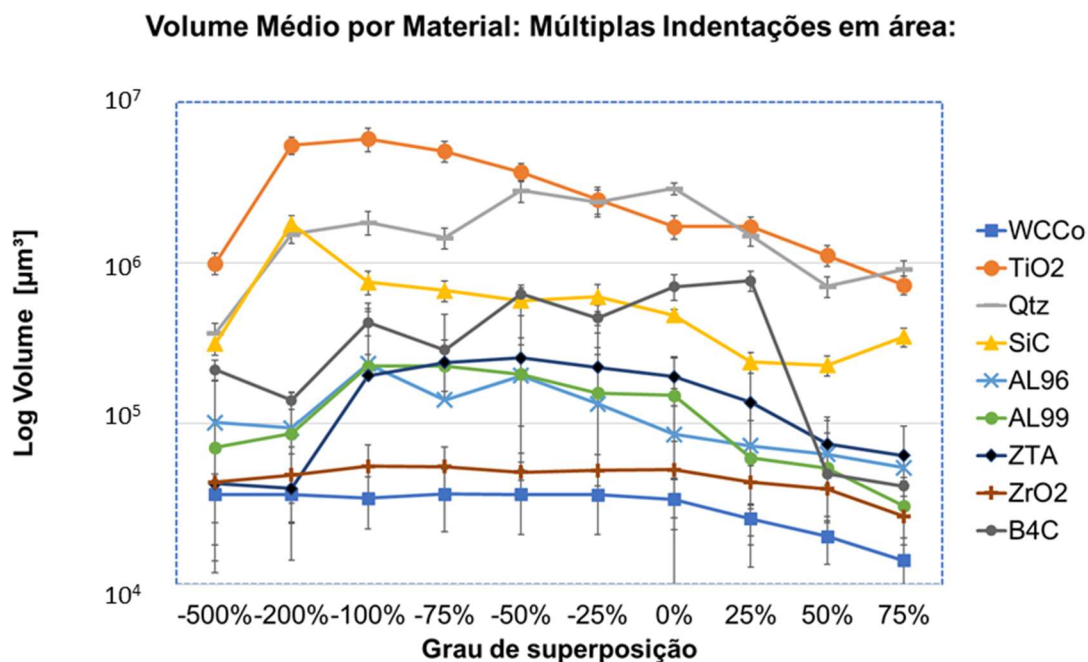


Figura 45. Variação do volume com o grau de superposição para todos os materiais estudados nos ensaios de múltiplas indentações em área. Fonte: autor.

Outro ponto digno de nota é que em todos os materiais onde o comportamento frágil foi predominante esse volume aumentou com a aproximação das indentações sendo máximo entre -200% e -100% e depois reduziu gradativamente. Esse comportamento sugere que existem duas forças motrizes atuando nesses materiais. Uma no sentido de facilitar o trincamento e remoção de material e outra no sentido contrário.

No que tange ao aumento da remoção de material, uma hipótese seria que a maior proximidade das indentações aumenta a densidade de defeitos em uma mesma região, sendo assim, a quantidade de pontos de concentração de tensão é aumentada o que aumenta a probabilidade de nucleação de novas trincas, ampliando o destacamento de material.

Já a redução da remoção de material, provavelmente está associada ao fenômeno de supressão do trincamento através da presença de tensões compressivas oriundas de deformações plásticas residuais, como explanado anteriormente, além disso, ao aumentarmos a superposição, reduzimos a área solicitada de material, o que pode, também, contribuir para redução do volume do dano.

Já nos materiais onde o comportamento plástico é dominante, o volume do dano foi aproximadamente constante nos graus onde não havia superposição (-500%, -200%, -100%, -75%, -50%, -25% e 0%). Quando as distâncias entre as indentações foram

próximas o suficiente para haver superposição (a partir de 0%), esses materiais apresentaram redução gradativa do volume do dano. Como a deformação plástica foi dominante, o aumento da superposição não teve efeito qualquer até o grau de 0%, onde a área solicitada foi reduzida, diminuindo, desta maneira, o volume do dano à medida que o grau de superposição aumentava.

Já no gráfico da Figura 46, tem-se o volume do dano total, ou seja, a soma do volume do dano de todos os graus de superposição, para os diversos materiais estudados. Nota-se a dominância de materiais tenazes, como os metais duros (que foram destacados com a cor laranja para facilitar a análise dos resultados) nas primeiras posições e a de materiais com baixa tenacidade à fratura via indentação nas últimas posições (carbeto de boro, carbeto de silício, quartzo e titânia). Nas posições intermediárias, houve um embaralhamento das aluminas, zircônias e ZTA's, exceto as aluminas com 99% de pureza, que permaneceram perfeitamente agrupadas em posições próximas ao final.

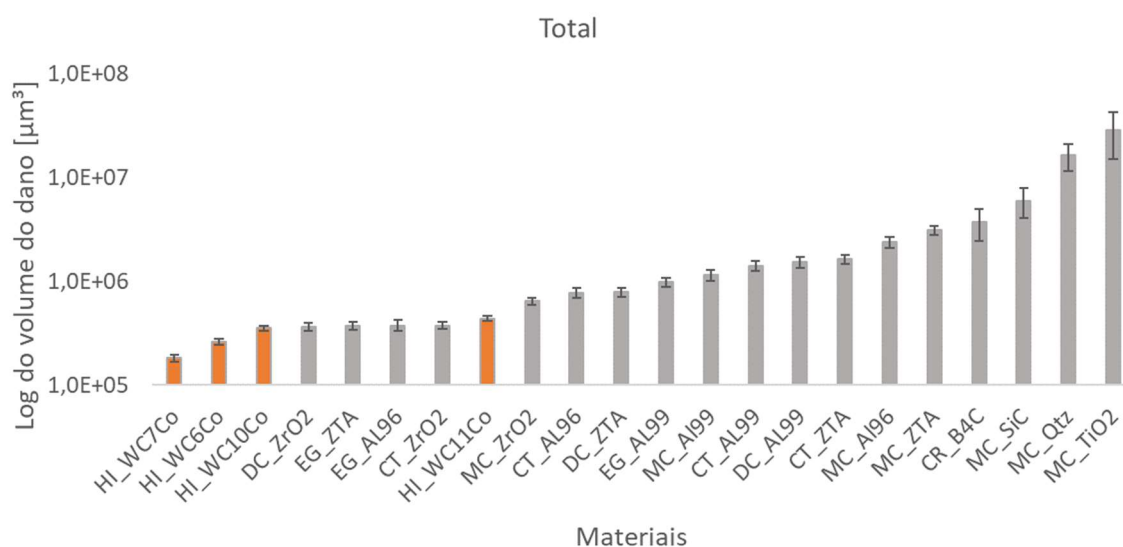


Figura 46. Log do volume do dano total nos ensaios de múltiplas indentações em área. Fonte: autor.

Esses resultados de desgaste (volume do dano) foram correlacionados com a dureza estimada para carga de 50 N (carga utilizada nesses ensaios), a tenacidade à fratura via indentação medida (K_C) e a quantidade de Evans e Wilshaw (1976) como mostram os gráficos da Figura 47. Nele, é possível perceber correlações razoáveis entre a tenacidade, a quantidade $H^{1/2}K_C^{3/4}$ e o inverso do volume do dano além da ausência de correlação para a dureza. Isso pode ser explicado pelo grande aumento no volume

de matéria removida promovido por destacamento de material via mecanismos frágeis quando comparado ao aumento no volume das indentações quando um material tem menor resistência à deformação plástica, ou seja, é menos duro. Ainda assim, as correlações com a tenacidade ($R^2 = 0,47$) e com a quantidade $H^{1/2}K_C^{3/4}$ ($R^2 = 0,54$) foram apenas medianas, umas das justificativas para esse resultado pode ser devido à presença de materiais que apresentaram comportamento dominado por plasticidade até os maiores graus de superposição, como os metais duros e as zircônias.

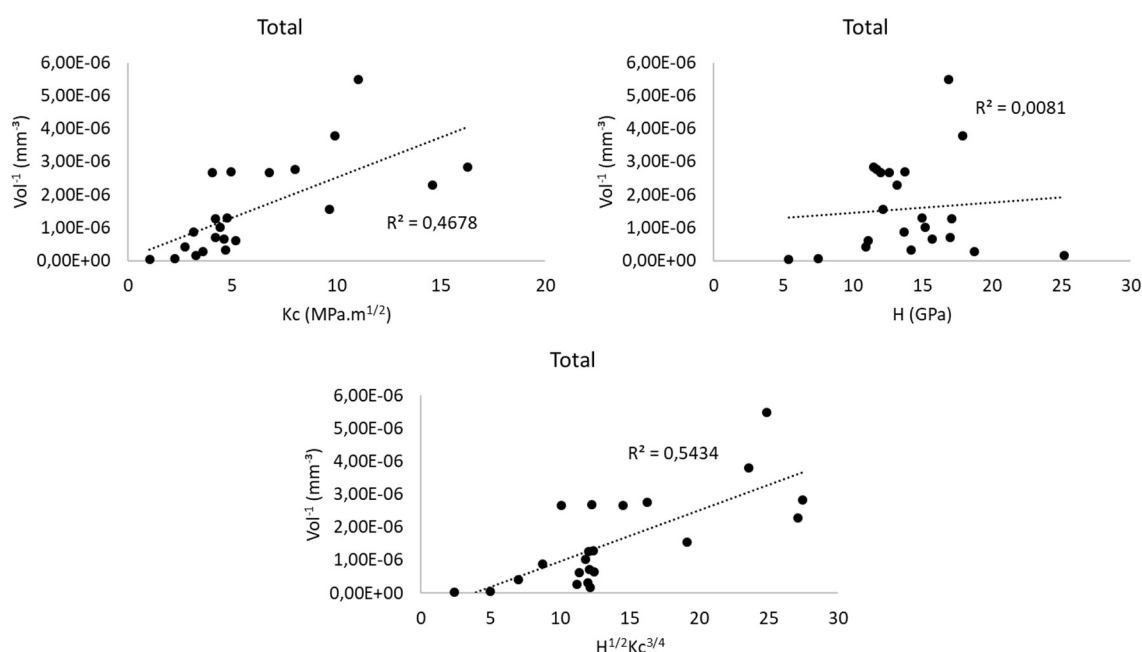


Figura 47. Correlação entre a tenacidade, a dureza, a quantidade $H^{1/2}K_C^{3/4}$ e o inverso do volume do dano dos materiais estudados, inclusive os metais duros. Fonte: autor.

Além da análise do volume do dano total e suas correlações, também foram estudados os volumes parciais em alguns graus de superposição chaves, são eles: o grau de -100%, onde os maiores volumes foram observados, o grau de 0%, grau no limiar da superposição, e o grau de 75%, o grau de superposição máximo estudado nesses ensaios.

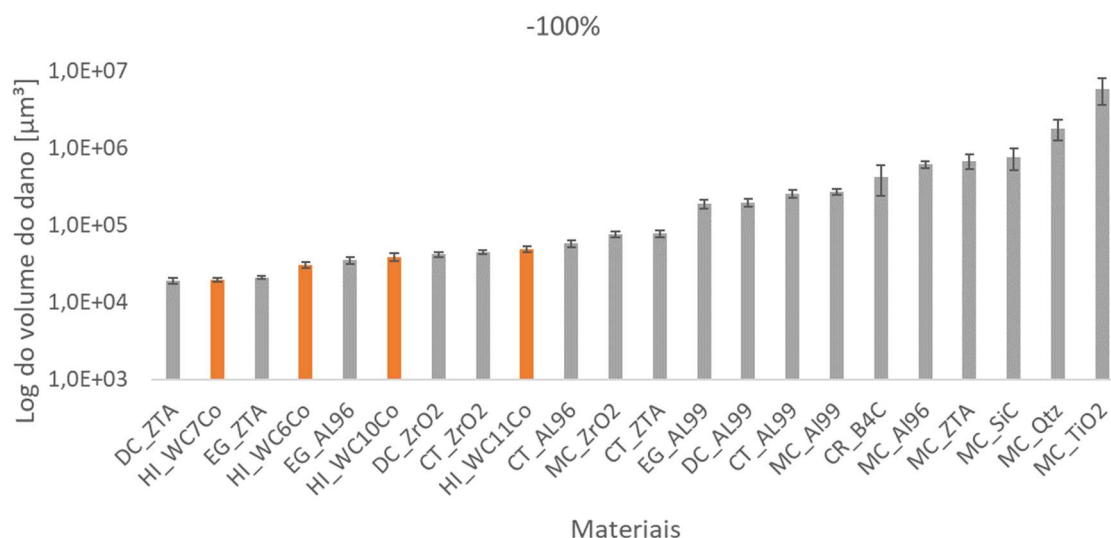


Figura 48. Log do volume do dano no grau de superposição de -100% nos ensaios de múltiplas indentações em área. Fonte: autor.

No grau de superposição de -100% (Figura 48), o ponto de maior destaque foi a equivalência do menor volume do dano de duas amostras de ZTA juntamente com as amostras de metal duro, alcançando as primeiras posições. As ZTA's possuem elevada tenacidade, talvez não detectada pelo método de caracterização deste trabalho, sendo comuns valores como $9,4 \text{ MPa.m}^{1/2}$, ver Tabela 4. Resumidamente, essa tenacidade é alcançada pela absorção da energia na ponta da trinca através da transformação de fase dos grãos de zircônia, indução de tensões compressivas e outros fenômenos (CARTER e NORTON, 2007; CALLISTER e RETHWISCH, 2020). Nessa forma, as ZTA's, se aproximam dos metais duros, combinando alta dureza e tenacidade.

Já em relação aos graus de 0% e 75% (Figura 49), pouca diferença foi notada em relação ao gráfico do volume total, já que, nesses graus, na maioria dos materiais, a maior parcela do volume do dano era devido a mecanismos frágeis, assim como no volume do dano total.

Ao analisar-se em conjunto os gráficos para cada grau de superposição chave, também é notado uma migração dos metais duros para as primeiras posições à medida que o grau de superposição aumenta.

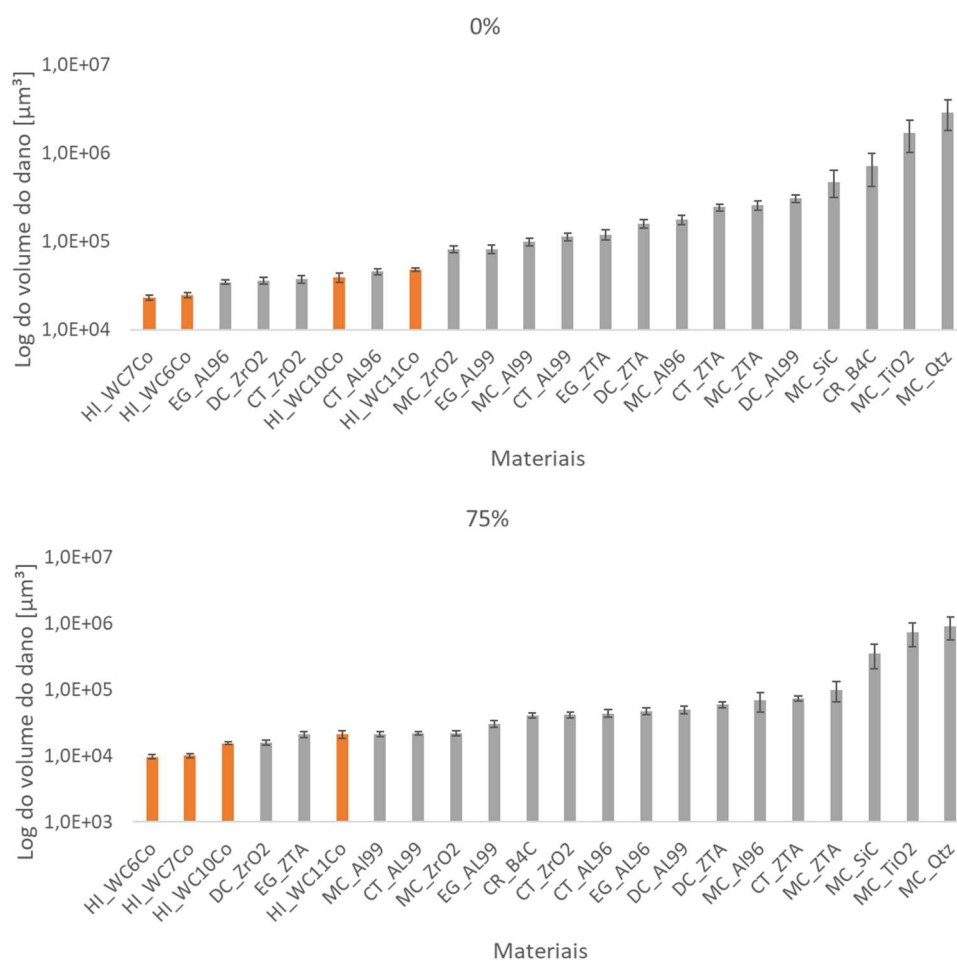


Figura 49. Log do volume do dano nos graus de superposição de 0% e 75% nos ensaios de múltiplas indentações em área. Fonte: autor.

Em relação as correlações para esses graus específicos, os dados foram resumidos na Tabela 7. Nela, fica explícito a ausência de correlação com a dureza e o aumento progressivo da relevância da tenacidade (e, por consequência, a quantidade $H^{1/2}K_{IC}^{3/4}$) à medida que o grau de superposição aumenta, o que obviamente é devido a predominância de mecanismos frágeis com o aumento do grau de superposição como ilustrado na seção anterior.

Tabela 7. Resumo dos valores de R^2 das correlações com propriedades relevantes ao comportamento tribológico nos ensaios de múltiplas indentações em área. Fonte: autor.

Grau de Superposição	R^2		
	H	Kc	$H^{1/2}K_c^{3/4}$
-100%	0,00	0,12	0,12
0%	0,01	0,30	0,22
75%	0,00	0,38	0,36
Total	0,01	0,47	0,54

5.2 ENSAIOS DE ESCLEROMETRIA LINEAR (ENSAIOS DE RISCAMENTO)

O ensaio de esclerometria linear nada mais é do que o riscamento controlado de uma superfície por um indentador, geralmente mais duro que a superfície a ser riscada, como por exemplo, os indentadores de diamante tipo Vickers e Rockwell. A ASTM G171-03 (2017) normatiza esse ensaio, porém, é comum a investigação de materiais utilizando parâmetros fora da norma, a fim de extrair maior quantidade de informações sobre determinado par tribológico.

Diferente de outros ensaios de desgaste, onde vários abrasivos entram em contato e interagem simultaneamente com a superfície do material, este ensaio consiste de um único evento abrasivo. Desa e Bahadur (1999) utilizaram a esclerometria retilínea para entender o comportamento de cerâmicos submetidos a processos abrasivos em meios lubrificados. Segundo os autores, apesar da complexidade envolvida nesses processos, o ensaio de riscamento por uma única aspereza dura, em carga elevadas, poderá amplificar a extensão do dano sem sofrer influências de eventos abrasivos adjacentes, facilitando, dessa maneira, a compreensão dos mecanismos de remoção de matéria envolvidos. Além disso, demonstrou-se que a geometria do indentador (portanto, da partícula abrasiva) é um dos fatores que determinam a severidade do dano nas superfícies e nos mecanismos de desgaste atuantes em materiais frágeis (MAGNOL *et al.*, 2019). De acordo com Hogan *et al.* (2012), o ensaio de riscamento é largamente utilizado para simular processos onde o contato pontual de abrasivos é observado, incluindo os processos de desgaste que envolvem minerais. Bortoleto, *et al.* (2018) também usaram a esclerometria retilínea para estudar o efeito da microestrutura e da distribuição granulométrica na taxa de desgaste de diferentes amostras de metal duro.

Segundo Jacobson *et al.* (1992) *apud* Axén, Kahlman e Hutchings (1997), a força tangencial necessária pra riscar um material perfeitamente dúctil depende das propriedades que controlam as forças adesivas, das propriedades mecânicas e da geometria do indentador. Nesses materiais, a força de atrito aumenta de maneira estável com a carga normal e a profundidade de penetração no indentador. Já a mudança de regime dúctil-frágil pode causar mudança repentina no atrito. Esses autores, investigaram diversos cerâmicos como carbeto de silício (SiC) e alumina (Al_2O_3) e observaram diferentes respostas ao riscamento, inclusive comportamento dúctil (Figura 50), além disso eles observaram variações no coeficiente de atrito coulombiano entre 0,1 e 0,9. Comportamento dúctil e trincamento dentro da trilha de desgaste também foi observado em diferentes tipos de zircônia no trabalho de KUN LEE *et al.* (2000), como pode ser visto na Figura 51. Axén, Kahlman e Hutchings (1997) também afirmaram que no riscamento em cerâmicos com matriz de SiC, um indentador afiado, como o Vickers, levou a fratura frágil em cargas muito menores que o Rockwell. O indentador Vickers, diferente do Rockwell, é um indentador afiado que pode produzir uma singularidade no campo tensões culminando em remoção de matéria via trincamento lateral (LAWN e WILSHAW, 1975; LAWN e SWAIN, 1975). Além disso, o indentador Vickers tem maior ângulo de ataque em relação ao Rockwell (que, em baixas cargas, apresenta contato hertziano) podendo levar a mecanismos mais severos (CHALLEN e OXLEY, 1979; HOKKIRIGAWA e KATO, 1988; SWAIN, 1979).

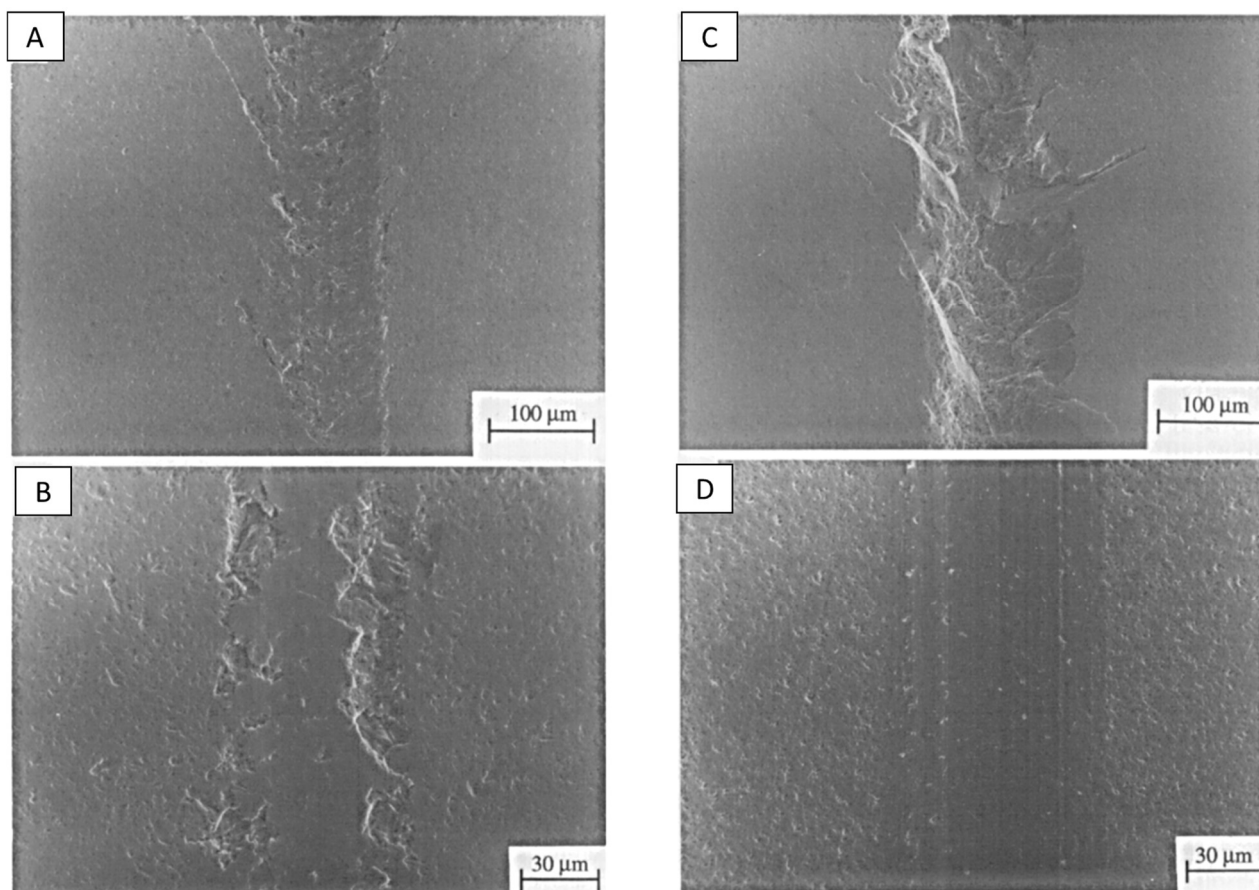


Figura 50. MEV de riscos com indentador Rockwell. (A) SiC-TiB₂ apresentando trincamento de longo alcance sob carga normal de 80 N. (B) SiSiC apresentando trincamento de curto alcance sob carga normal de 30 N. (C) SiC apresentando fratura frágil catastrófica sob carga de 80 N. (D) Si₃Ni₄-SiC apresentando comportamento dúctil sob carga de 60N. Fonte: (Axén, Kahlman e Hutchings, 1997).

Nota: Adaptado pelo autor.

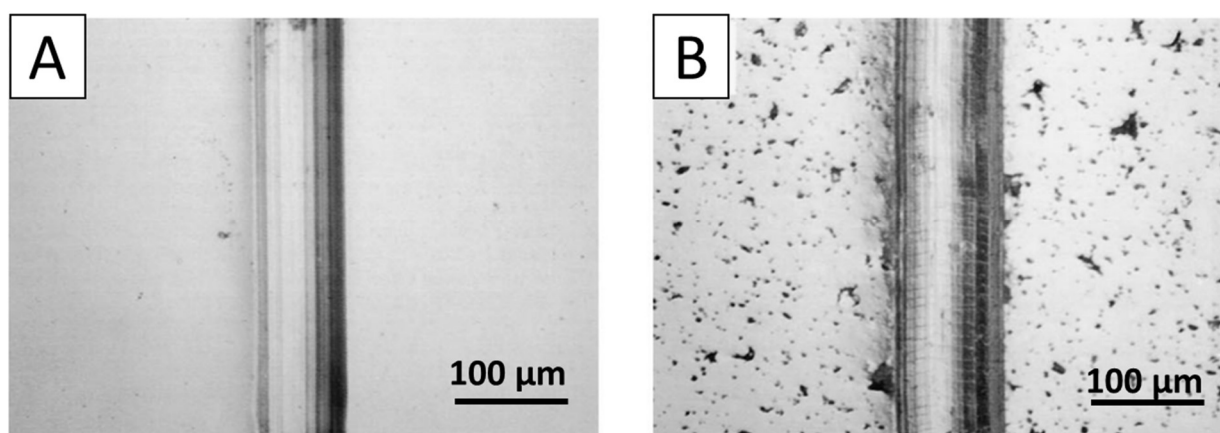


Figura 51. Micrografia óptica de riscos com indentador Rockwell em diferentes tipos de zircônia. (A) comportamento puramente dúctil. (B) sulcamento com trincamento em forma de escamas no interior.

Fonte: (KUN LEE *et al.*, 2000). Nota: Adaptado pelo autor.

5.2.1 Experimentos

Ensaio de riscamento foram confeccionados com dois tipos de indentadores de diamante, com objetivo de estudar a resposta dos materiais a um indentador afiado, como o Vickers, e a um indentador não afiado, que gera um campo de tensões menos severo, como é o caso do indentador Rockwell C. O equipamento utilizado para os ensaios foi o microtribômetro universal CETR Apex do LCSM, que se encontra detalhado na Figura 24 da seção 5.1.1.

Os ensaios com indentador Vickers foram realizados na configuração face paralela ao risco com carga normal progressiva variando de 0,2 a 5,2 N e comprimento de 5 mm. Já os com indentador Rockwell, o intervalo de cargas foi de 2 a 102 N. A velocidade foi mantida constante em 0,1 mm/s.

Durante os ensaios, os dados relativos à carga normal instantânea e ao coeficiente de atrito coulombiano foram armazenados.

A avaliação do volume dos riscos também foi avaliada com o analisador tridimensional de superfícies S-neox da Sensofar, porém, diferente da metodologia explanada na seção 5.1.1.3, o volume dos riscos foi calculado com base na área da seção transversal desses como descrito no parágrafo a seguir.

De posse da imagem/dados brutos do risco, filtros de planificação e remoção de artefatos eram utilizados à medida que necessário. Realizada a filtragem, 1024 perfis em duas dimensões eram extraídos e o perfil médio calculado. Desse perfil, a área da seção transversal era obtida. Para o cálculo do volume, bastava multiplicar a área pelo comprimento do risco.

A Figura 52 exemplifica o método de extração dos valores das áreas da seção transversal. A região em vermelho se trata da área do fundo do risco, originada pelo deslocamento de material. As áreas em verde são os chamados *ridges* ou *pile-ups*, ou seja, material que foi descolado do fundo do risco para as bordas, ali, permanecendo. Para o cálculo dos volumes, foi subtraído da área vermelha o somatório dos valores das áreas verdes (quando presentes), sendo o resultado multiplicado pelo comprimento do risco.

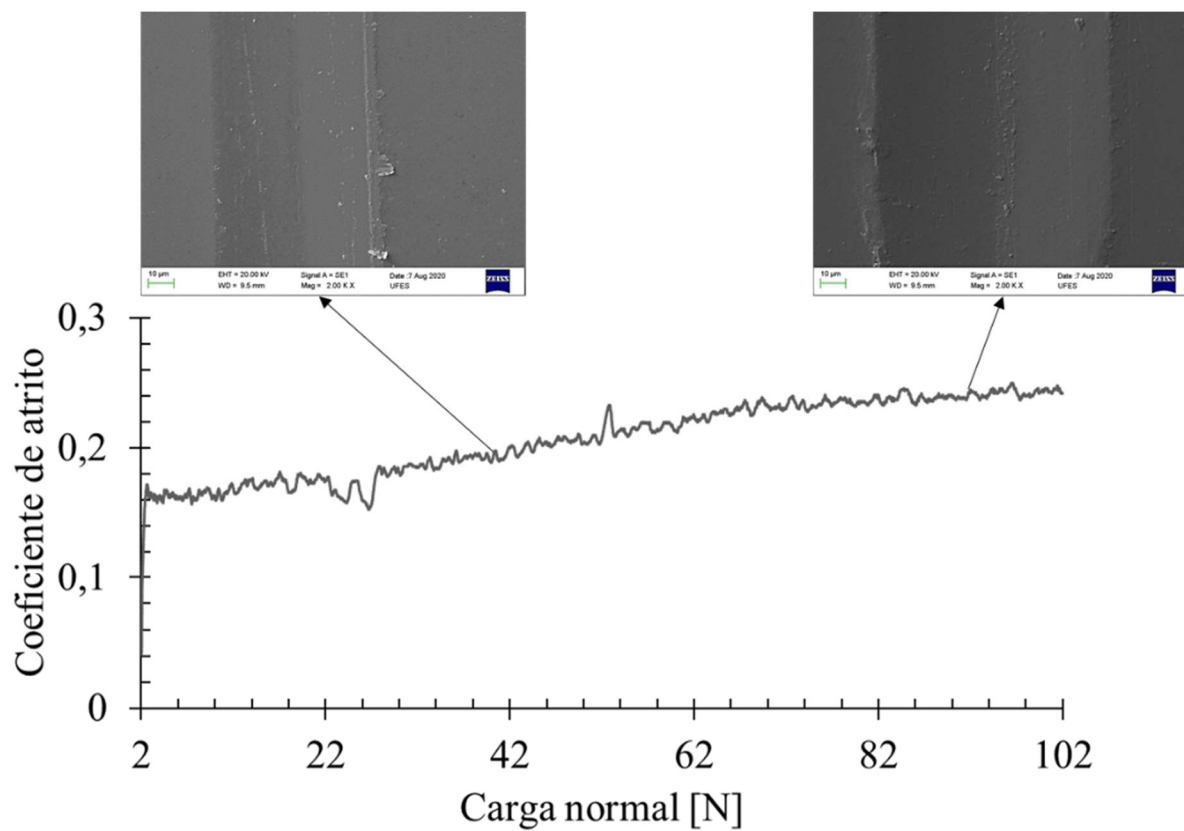


Figura 53. Atrito e mecanismos de desgaste na amostra HI_WC6Co com indentador Rockwell. Fonte: autor.

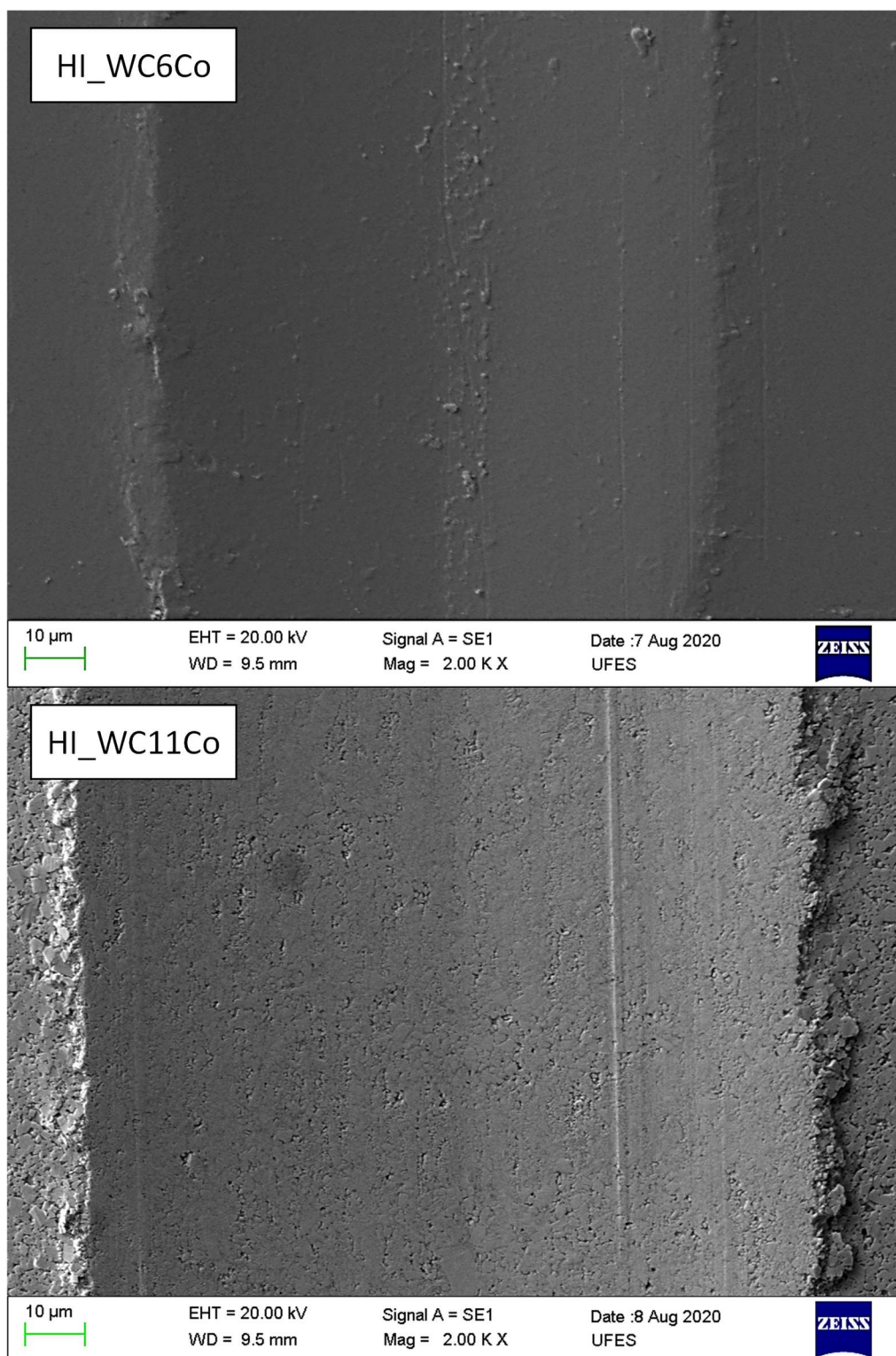


Figura 54. Aumento da deformação plástica com aumento do percentual de cobalto nas amostras de metal duro. Fonte: autor.

As ZTA's apresentaram diferentes respostas ao riscamento com penetrador Rockwell, desde mecanismos moderados, com dominância de deformação plástica, como podemos observar na Figura 55, na CT_ZTA e DC_ZTA, até um misto de deformação

plástica com trincamento dentro e fora da trilha de desgaste e destacamento de material via trincamento lateral como na MC_ZTA e EG_ZTA (apontado pelas setas vermelhas). Apesar do destacamento considerável de material exibido na DC_ZTA, esse foi um evento raro, acontecendo em apenas uma das três réplicas, de maneira geral, esse material apresentou predominância de mecanismos plásticos e trincamento contido no interior do risco. Esse comportamento, somado a menor porosidade aparente, resultou na menor perda de matéria dentre as ZTA's, apesar de muito próxima da CT_ZTA e MC_ZTA. A única que se destacou das demais, exibindo volume perdido consideravelmente maior foi a EG_ZTA (Figura 62).

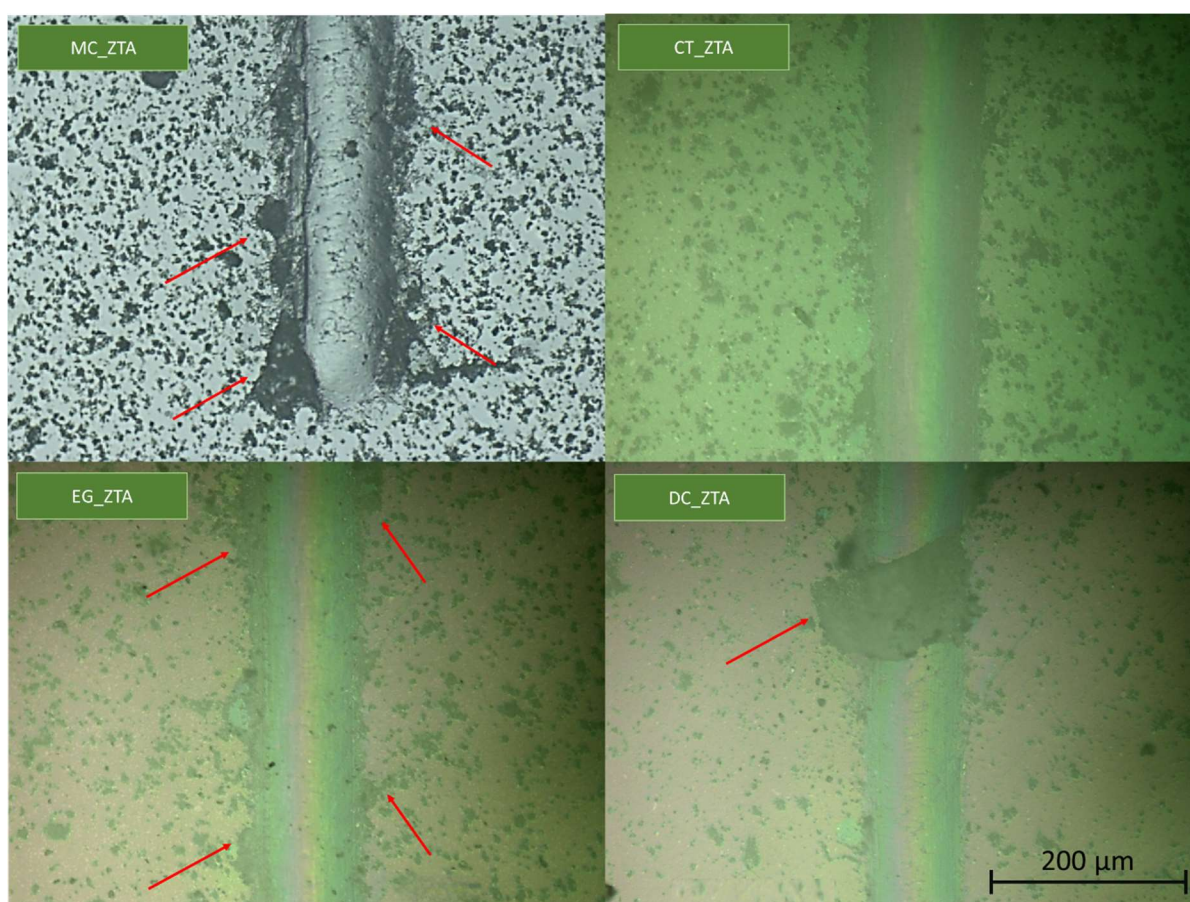


Figura 55. Resposta ao riscamento das ZTA's nas maiores cargas. Fonte: autor.

O gráfico da Figura 56 apresenta um comportamento típico da ZTA's, exemplificado pela EG_ZTA, em relação a variação do coeficiente de atrito com a carga normal. Nele, pode-se observar um aumento do atrito à medida que ocorre uma transição entre sulcamento, sulcamento com trincamento dentro da trilha e sulcamento com trincamento fora da trilha de desgaste e destacamento de material.

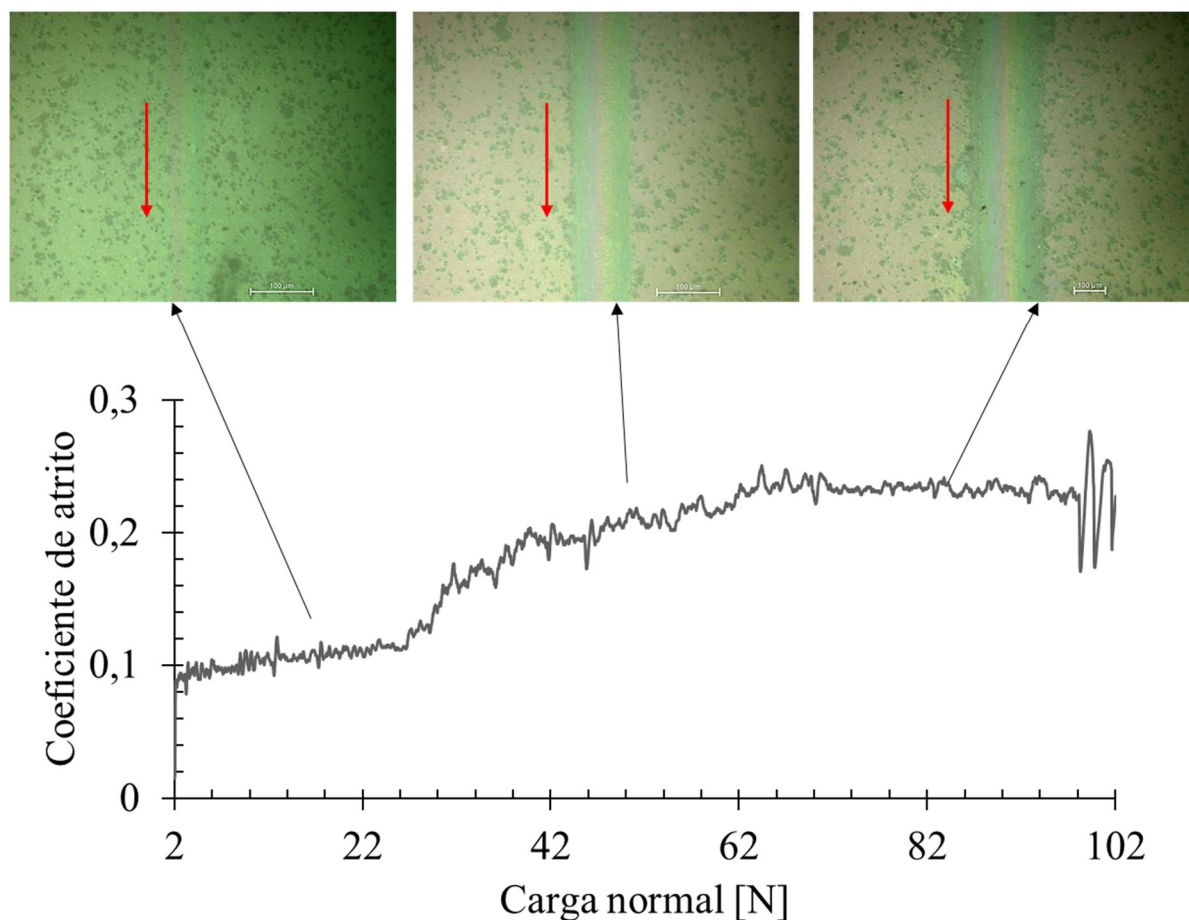


Figura 56. Comportamento típico das ZTA's exemplificado pela EG_ZTA. Fonte: autor.

As aluminas com 96% de pureza também apresentaram grande variabilidade no comportamento (Figura 57). Apesar de todas as amostras estudadas apresentarem deformação plástica no interior do risco, a intensidade do destacamento de material nas bordas do risco variou desde destacamento moderado de material, apenas no final do risco, como a amostra CT_AL96, que apresentou a menor perda de material entre essas aluminas (Figura 62), passando por destacamento moderado nas partes finais do risco, como a EG_AL96, que apresentou valores intermediários de remoção de material, até os maiores destacamentos observados nas aluminas com 96% de pureza, como a MC_AL96, que obteve maior volume de matéria removida. A MC_AL96 apresentou o menor valor de tenacidade à fratura via indentação ($2,72 \text{ MPa/m}^{1/2}$) dentre esses materiais, seguido da EG_AL96 ($4,02 \text{ MPa/m}^{1/2}$) e da CT_AL96 ($4,73 \text{ MPa/m}^{1/2}$), dessa forma, para as aluminas com 96% de pureza, a perda de matéria foi inversamente proporcional a tenacidade à fratura via indentação. Além disso, como visto na Figura 22 da seção 4.5, a alumina do fabricante MC tem maior tamanho grão, o que pode ter efeito deletério no que tange à fratura e remoção

de matéria em cerâmicos (RICE, FREIMAN e BECHER, 1981). Quanto ao atrito, as aluminas apresentaram comportamento similar ao das ZTA's, com aumento do atrito à medida que o trincamento nas bordas do risco aumentava, o valores ficaram entre 0,10 e 0,12 no início do risco e entre 0,18 e 0,22 no final e estão resumidos, juntamente com os mecanismos de desgaste, na Tabela 9.

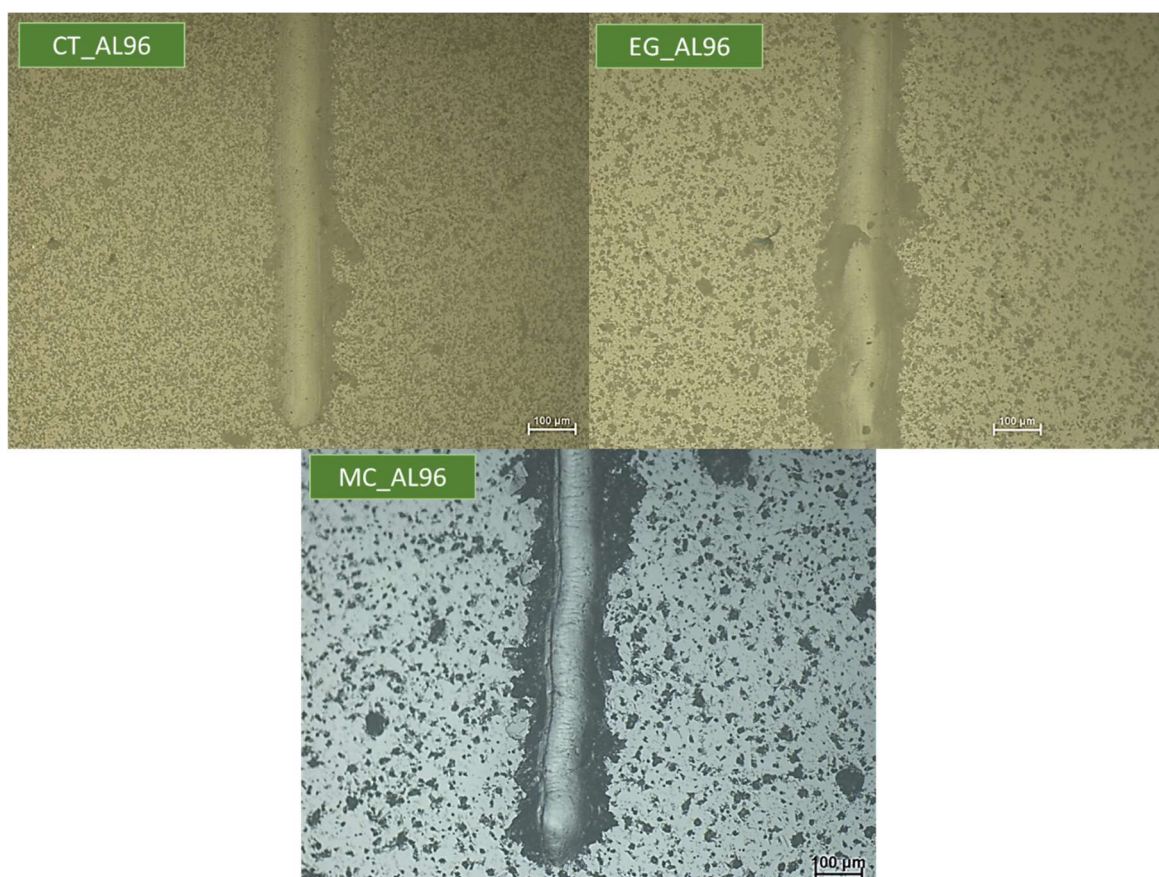


Figura 57. Resposta ao riscamento das aluminas com 96% de pureza nas maiores cargas. Fonte: autor.

As aluminas com 99% de pureza exibiram mecanismos majoritariamente plásticos até cargas intermediárias, a exceção da MC_AL99 (Figura 58), esta, apresentou fratura frágil dominante mesmo nas menores cargas. Nesse material, inclusive, foi possível observar trincas intergranulares e transgranulares (Figura 59). Para as aluminas com 99% de pureza, a perda de matéria, também, foi inversamente proporcional a tenacidade à fratura via indentação, sendo a MC_AL99 a amostra com maior volume perdido e menor tenacidade ($3,15 \text{ MPa.m}^{1/2}$) além de maior tamanho de grão (Figura 23).

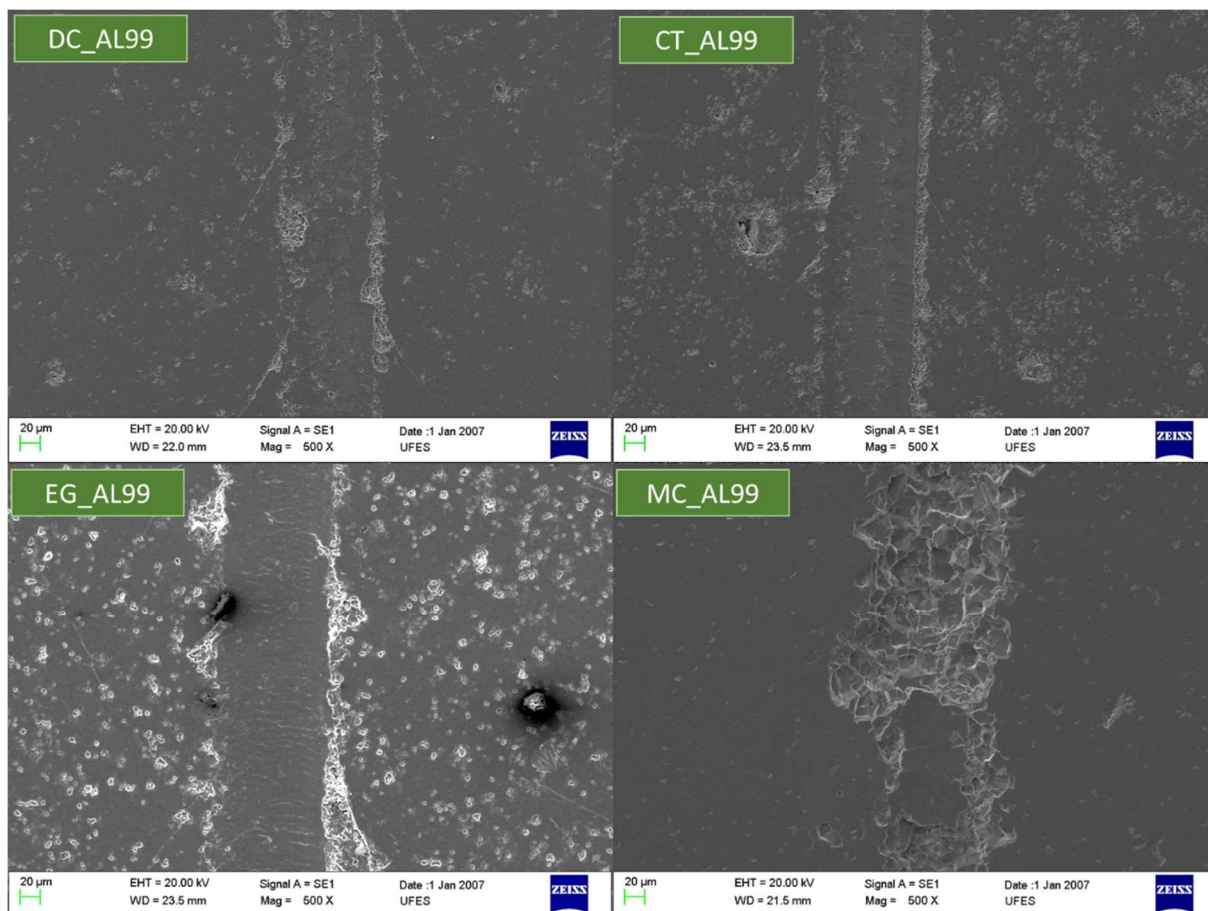


Figura 58. Resposta ao risco, em cargas intermediárias, das aluminas com 99% de pureza. Fonte: autor.

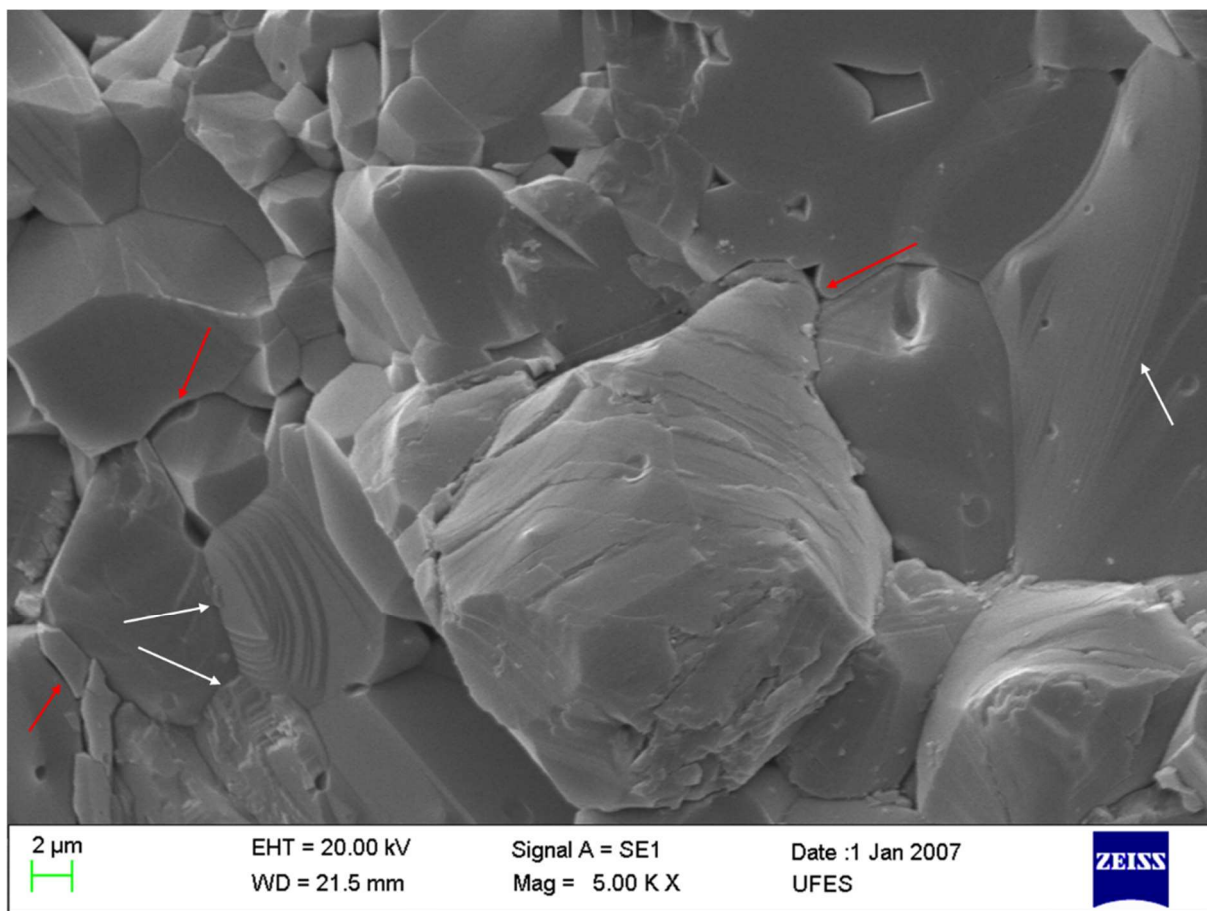


Figura 59. Fraturas intergranulares (setas vermelhas) e transgranulares (setas brancas) na MC_AL99.
Fonte: autor.

Juntamente com a MC_AL99, as amostras: MC_Qtz, MC_SiC, MC_TiO₂ e CR_B4C apresentaram os maiores valores de matéria perdida e baixos valores de tenacidade: 2,22, 3,26, 1,03 e 3,57 MPa.m^{1/2} respectivamente. Na Figura 60, podemos notar a grande similaridade das respostas da MC_Qtz e da MC_SiC, com ambas exibindo trincas Hertzianas no início do risco e destacamento material de maneira frágil no final.

O carbetto de boro apresentou trincamento extenso e alto atrito, condizente com o alto valor de matéria perdida, já a titânia, apesar de possuir um dos maiores valores de volume perdido de material ainda apresentou mecanismos plásticos mesmo nas maiores cargas (Figura 61).

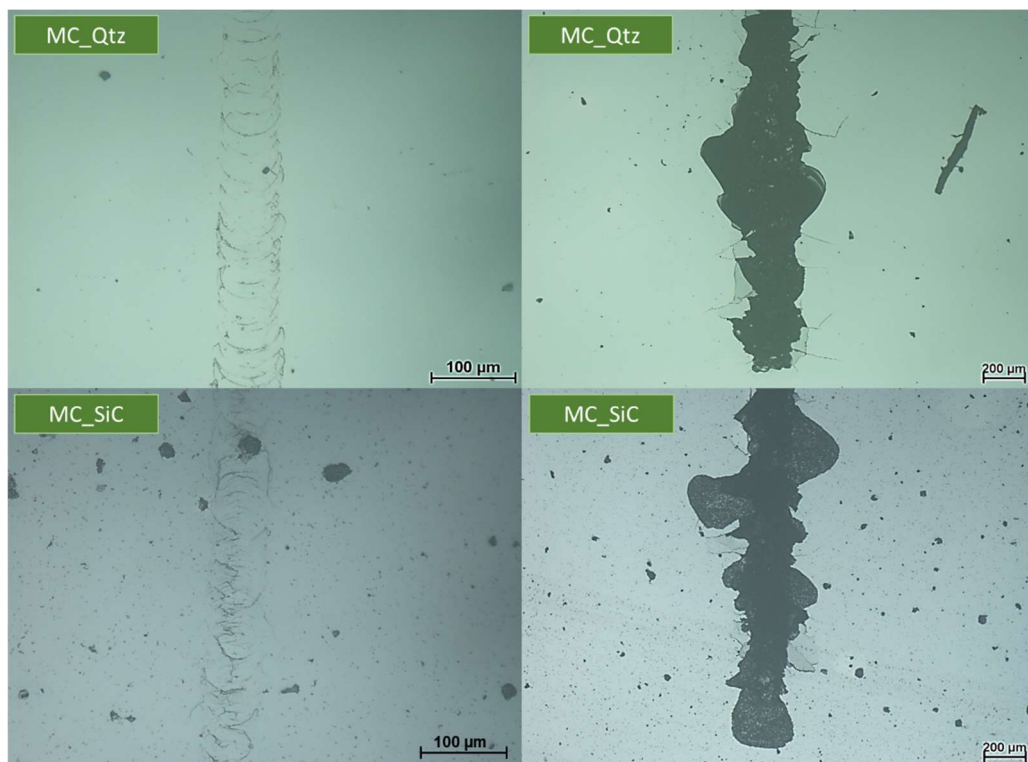


Figura 60. Similaridades entre as amostras de quartzo e carbeto de silício nos ensaios com indentador Rockwell no início do risco (esquerda) e no final (direita). Fonte: autor.

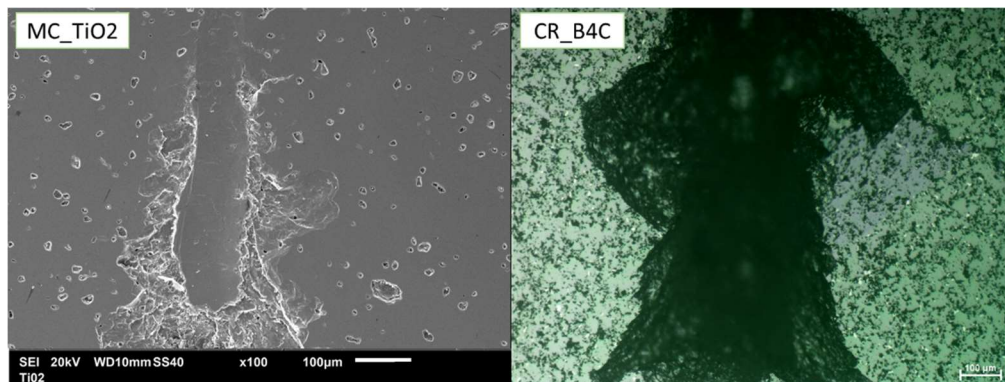


Figura 61. Comportamento da titânia e do carbeto de boro nas maiores cargas com indentador Rockwell. Fonte: autor.

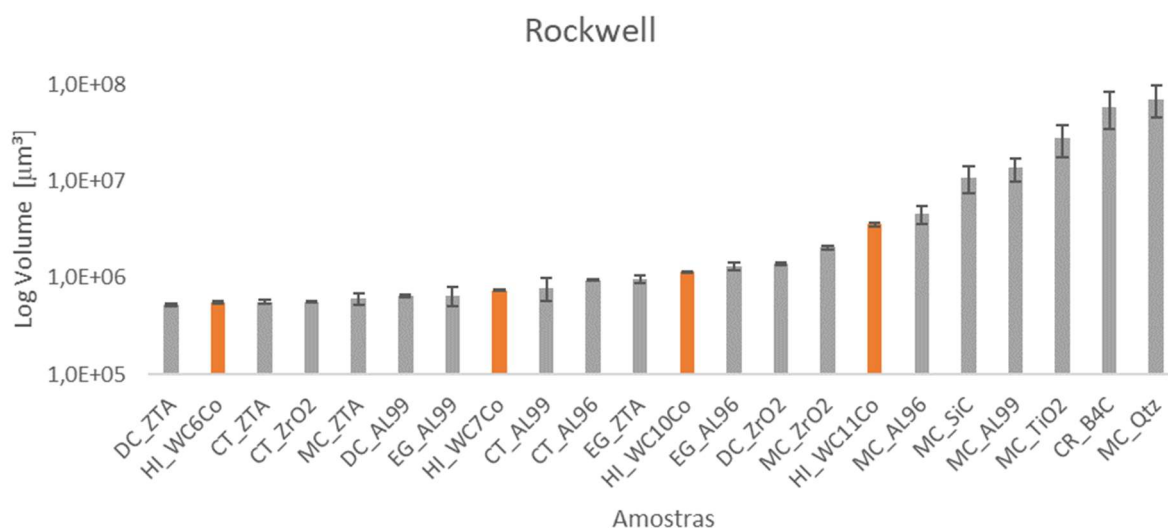


Figura 62. Volume perdido médio e desvio padrão após os ensaios de riscamento com indentador Rockwell C. Fonte: autor.

Também foi realizada a análise do volume perdido em cada etapa do risco: baixas cargas (2 a 33,7 N), cargas intermediárias (33,7 a 66,7 N) e nas maiores cargas (66,7 a 102 N) como mostra a Figura 63. Nota-se que em todos os níveis de carregamento, o aumento do volume perdido com o aumento do percentual de cobalto das amostras de metal duro se manteve. O aumento do percentual de cobalto tende a aumentar os valores de tenacidade (porém, nesse caso, a tenacidade da amostra com 10% foi ligeiramente superior à da amostra com 11%, vide Tabela 4) e reduzir a dureza, o que ocorreu nesse trabalho, porém, mais uma vez, com pequenas diferenças, nas amostras com 10 e 11% (Tabela 5). Mesmo a amostra de metal duro com menor tenacidade (HI_WC6Co) apresentou tenacidade maior que todos os cerâmicos (9,90 MPa.m^{1/2}). Aparentemente, quando já se tem altos valores de tenacidade, esta perde importância, sendo que os valores de desgaste foram melhor correlacionados com a dureza. Outro ponto marcante foi o domínio total dos cerâmicos nas menores cargas e nas cargas intermediárias, o que pode estar relacionado com a dominância de mecanismos menos severos e ausência de fratura frágil na maioria dos materiais nessas cargas, tendo mais uma vez, a alta tenacidade dos metais duros obtendo papel secundário.

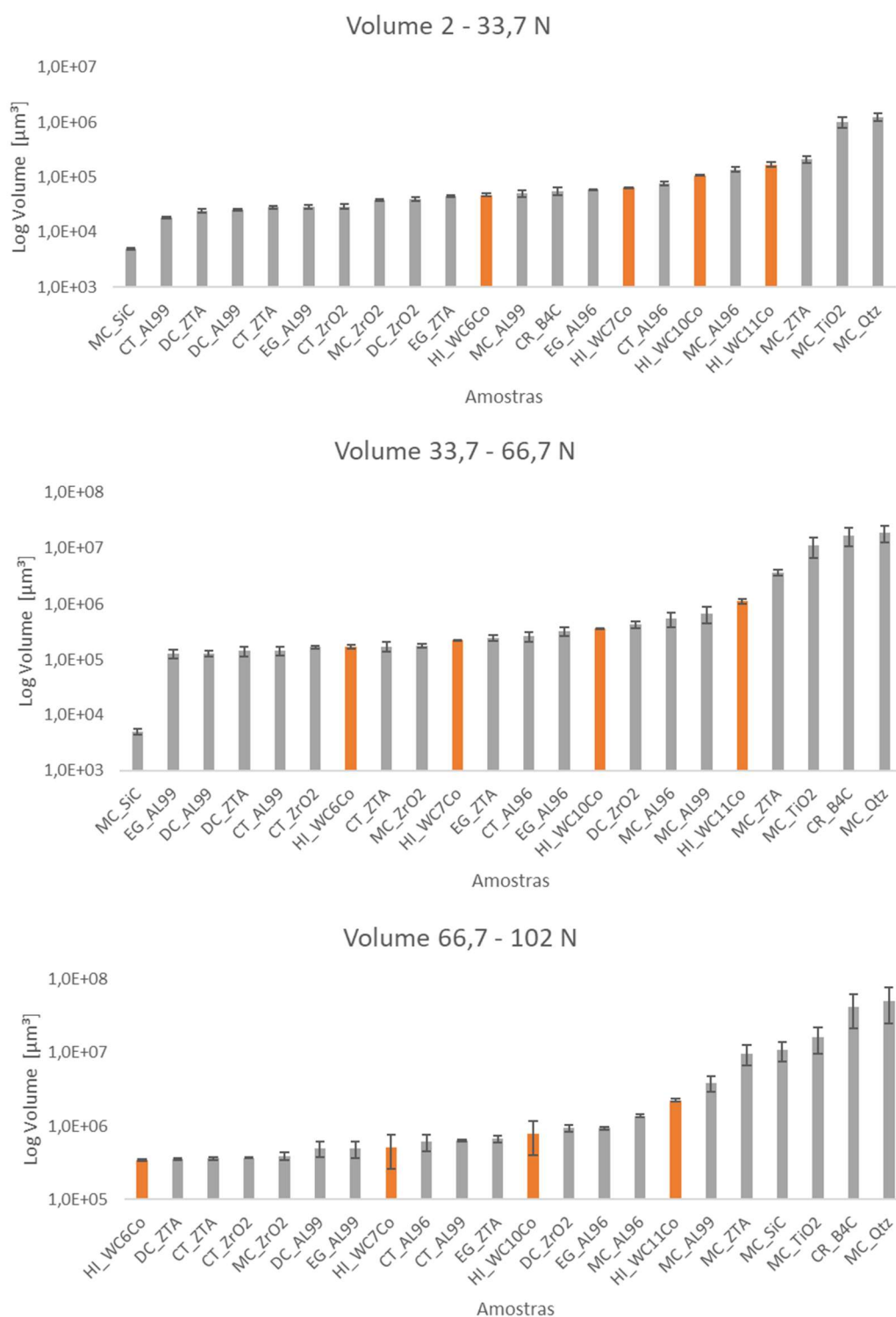


Figura 63. Análise do volume perdido em cada etapa do risco (2 a 33,7N – 33,7 a 66,7 N – 66,7 a 102 N) com indentador Rockwell. Fonte: autor.

Ao observarmos as correlações entre o inverso do volume perdido e as propriedades relevantes ao desgaste (dureza e tenacidade) além da quantidade de Evans e Wilshaw (1976), notam-se tendências fracas de correlação para tenacidade e a

quantidade $H^{1/2}K_C^{3/4}$ e nenhuma correlação com a dureza. Porém, ao investigarmos mais a fundo essas correlações, levando em conta os diferentes níveis de carregamento (Tabela 8) notamos uma clara tendência de aumento da força de correlação entre desgaste e tenacidade com o aumento da carga (aumento de mecanismos frágeis). O inverso ocorreu com a dureza, apresentando as melhores correlações em cargas mais baixas (dominância de plasticidade).

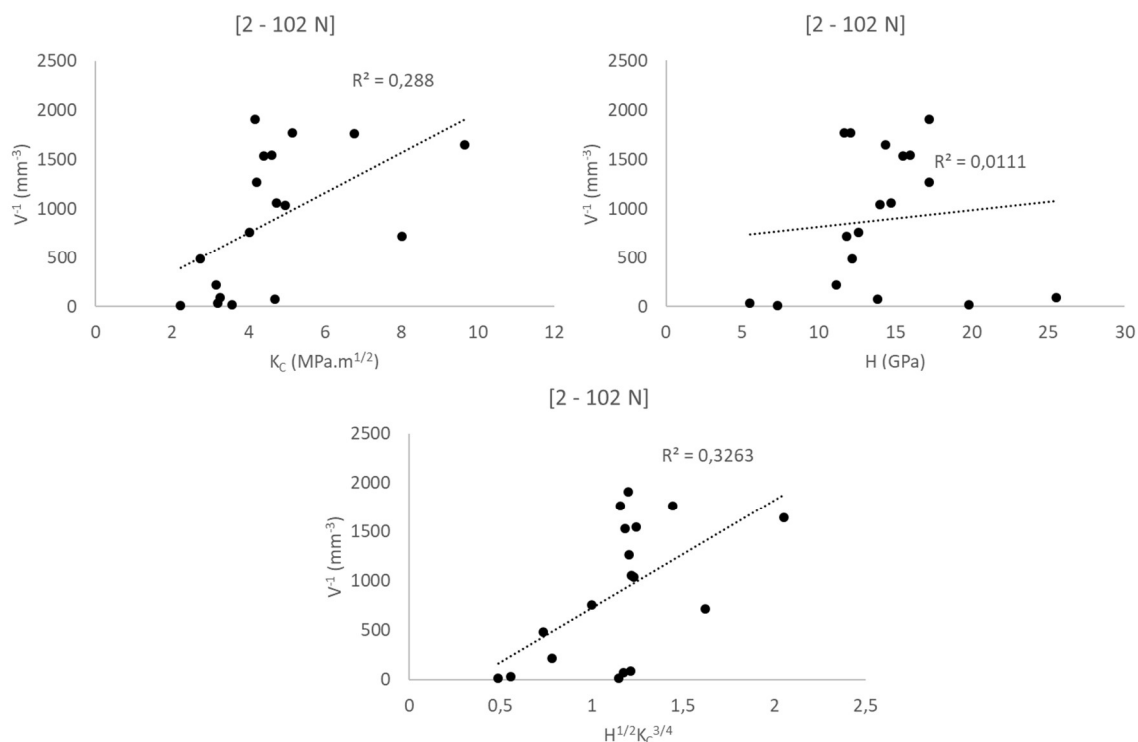


Figura 64. Correlação entre a tenacidade, a dureza, a quantidade $H^{1/2}K_C^{3/4}$ e o inverso do volume perdido dos materiais estudados, exceto os metais duros. Fonte: autor.

Tabela 8. Resumo dos valores de R^2 das correlações com propriedades relevantes ao comportamento tribológico nos ensaios com indentador Rockwell. Fonte: autor.

	R^2					
	Somente cerâmicos			Todos os materiais		
	H	K_C	$H^{1/2}K_C^{3/4}$	H	K_C	$H^{1/2}K_C^{3/4}$
2 - 33,7 N	0,4946	0,0041	0,0471	0,4638	0,0436	0,0035
33,7 - 66,7 N	0,4537	0,0263	0,0058	0,4014	0,027	0,0029
66,7 - 102 N	0,0089	0,3288	0,3513	0,0369	0,0646	0,1259
Total	0,00111	0,288	0,3263	0,0328	0,0497	0,1069

Ao estudar os dados resumidos da Tabela 9, é possível realizar algumas observações. A primeira, é que, na maioria dos ensaios, o coeficiente de atrito permaneceu entre 0,1 e 0,3, à exceção dos ensaios nas amostras de carbetto de silício (MC_SiC) e nas de carbetto de boro (CR_B4C), as quais alcançaram um valor máximo de coeficiente

de atrito de 0,7. Outra observação fora o comportamento dúctil/plástico até as maiores cargas das amostras HI_WC6Co, HI_WC11Co, CT_AL96, CTA_ZTA e CT_ZrO2. Já as amostras, MC_SiC, CR_B4C e MC_Qtz apresentaram comportamento frágil, desde do início do risco, com trincamento lateral severo ao final. As outras amostras apresentaram comportamento intermediário. Talvez a observação mais interessante seja a diferença de comportamento entre fabricantes, como, por exemplo, as amostras de alumina com 96% de pureza (AL96), que, dependendo do fabricante, apresentaram comportamento dúctil/plástico em todas as cargas, ou trincamento a partir de cargas intermediárias. Essas diferenças de comportamento foram observadas, também, nas amostras de alumina com 99% de pureza (AL99) e nas amostras de alumina tenacificada com zircônia (ZTA). Baseado nos dados estudados até o momento, o fabricante (CT) apresentou comportamento mais dúctil que outros fabricantes nas amostras acima citadas.

Tabela 9. Principais resultados obtidos nos ensaios de esclerometria linear com o indentador de diamante Rockwell C. Fonte: autor.

Amostra	Coeficiente de Atrito			Mecanismos de desgaste		
	2 – 33,7 N	33,7 – 66,7 N	66,7 -102 N	2 – 33,7 N	33,7 – 66,7 N	66,7 -102 N
HI_WC6Co	0,16	0,20	0,24	Sulc.	Sulc.	Sulc.
HI_WC7Co	0,16	0,22	0,24	Sulc.	Sulc.	Sulc.
HI_WC10Co	0,14	0,22	0,26	Sulc.	Sulc.	Sulc.
HI_WC11Co	0,14	0,22	0,24	Sulc.	Sulc.	Sulc.
MC_AL96	0,07	0,16	0,16	Sulc.	Sulc.+Trinc.	Sulc.+Trinc.
CT_AL96	0,10	0,15	0,22	Sulc.	Sulc.	Sulc.
EG_AL96	0,12	0,2	0,22	Sulc.	Sulc.	Sulc.+Trinc.
MC_AL99	0,12	0,16	0,18	Sulc.+Trinc.	Sulc.+Trinc.	Trinc. Severo
CT_AL99	0,10	0,18	0,22	Sulc.	Sulc.	Sulc.+Trinc.
DC_AL99	0,10	0,2	0,24	Sulc.	Sulc.+Trinc.	Sulc.+Trinc.
EG_AI99	0,08	0,16	0,22	Sulc.	Sulc.	Sulc.+Trinc.
MC_ZTA	0,10	0,13	0,16	Sulc.	Sulc.	Sulc.+Trinc.
CT_ZTA	0,12	0,18	0,24	Sulc.	Sulc.	Sulc.
DC_ZTA	0,09	0,15	0,22	Sulc.	Sulc.	Sulc.
EG_ZTA	0,10	0,18	0,22	Sulc.	Sulc.	Sulc.+Trinc.
MC_ZrO2	0,08	0,10	0,11	Sulc.	Sulc.	Sulc.
CT_ZrO2	0,11	0,15	0,18	Sulc.	Sulc.	Sulc.
DC_ZrO2	0,1	0,24	0,24	Sulc.	Sulc.	Sulc.
MC_SiC	0,3	0,3	0,7	Trinc.	Trinc.	Trinc. Severo
MC_Qtz	0,09	0,07	0,07	Trinc.	Trinc. Severo	Trinc. Severo
MC_TiO2	0,12	0,2	0,3	Sulc.+Trinc	Sulc.+Trinc	Sulc.+Trinc
CR_B4C	0,3	0,65	0,7	Trinc.	Trinc. Severo	Trinc. Severo

5.2.3 Ensaio com indentador Vickers: volume perdido, mecanismos de desgaste e atrito

Devido as suas características geométricas (alto ângulo de ataque e diminuto raio de ponta) o indentador Vickers é considerado um indentador afiado, induzindo os materiais a mecanismos mais severos, como o trincamento, mesmo em cargas baixas (Figura 65). Essa característica dificultou a observação de diferenças entre fabricantes do mesmo material e até mesmo entre grupos de materiais (Tabela 11), diferentemente do que foi possível analisar com indentador Rockwell. Apesar da severidade do indentador Vickers, os metais duros e as zircônias apresentaram dominância de mecanismos plásticos até as últimas cargas (Figura 66)

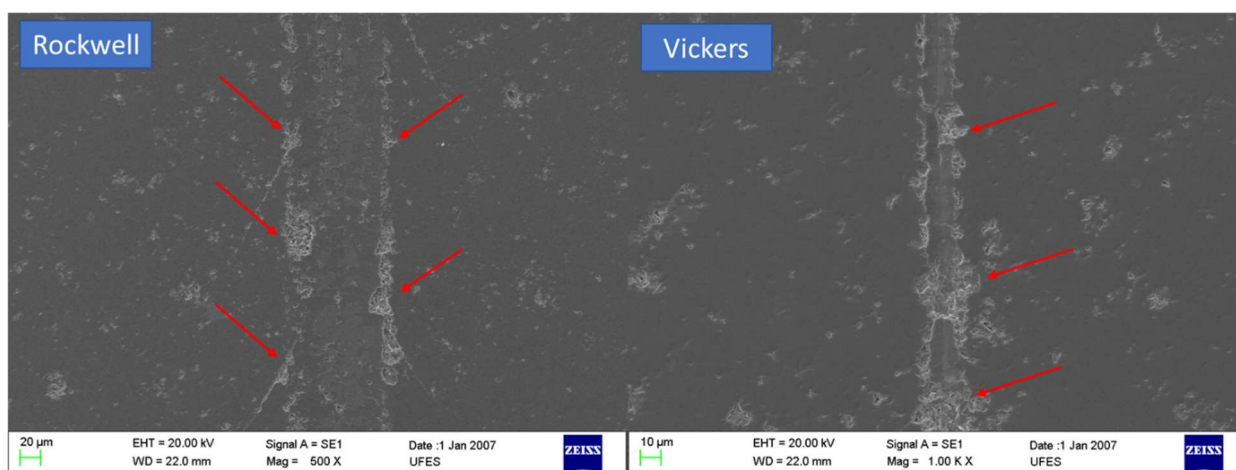


Figura 65. Comparação entre ensaios com indentador Rockwell e Vickers no mesmo material, DC_AL99. A carga normal nesse trecho do risco com indentador Rockwell era, aproximadamente, 70 N, já no Vickers, em torno de 0,5 N.



Figura 66. Deformação plástica na zircônia mesmo nas maiores cargas com indentador Vickers.

Em relação à perda de matéria, os materiais mais tenazes alcançaram as primeiras posições e os menos tenazes, as últimas. As únicas exceções foram o carbetto de boro e MC_AL99, que apesar de frágeis, obtiveram posições intermediárias, entre as ZTA's.

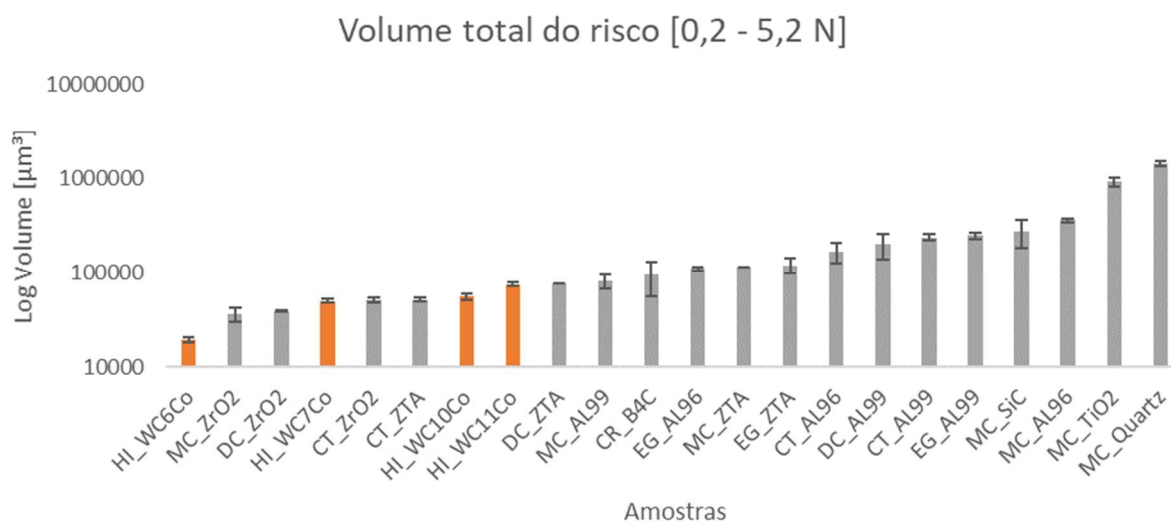


Figura 67. Volume perdido médio e desvio padrão após os ensaios de riscamento com indentador Vickers. Fonte: autor.

Assim como nos ensaios com indentador Rockwell, o volume perdido nos ensaios com indentador Vickers, foram analisados mais a fundo, nos diferentes níveis de carregamento: baixas cargas (0,2 a 1,8 N), cargas intermediárias (1,8 a 3,5 N) e cargas altas (3,5 a 5,2 N). Um ponto de destaque no gráfico das menores cargas foi a

ausência virtual de desgaste na amostra de carbeto de boro. Não foi possível medir o volume (área da seção transversal do risco) nessas cargas, tendo o risco, mesmo com presença de trincamento, apresentado se na ordem da rugosidade da amostra. Esse material apresentou altíssima dureza em baixas cargas, sendo que a dureza média entre 0,2 e 1,8 N foi de 29,24 GPa. Com a aumento do carregamento, o trincamento estendeu-se para além do contato diamante/carbeto de boro aumentando consideravelmente o desgaste, levando o CR_B4C para posições intermediárias na classificação dos materiais. A medida que a carga era aumentada, materiais com maior tenacidade se aproximavam das primeiras posições, sendo que a partir de 1,8 N, e tenacidade foi inversamente proporcional ao volume perdido das zircônias e dos metais duros.

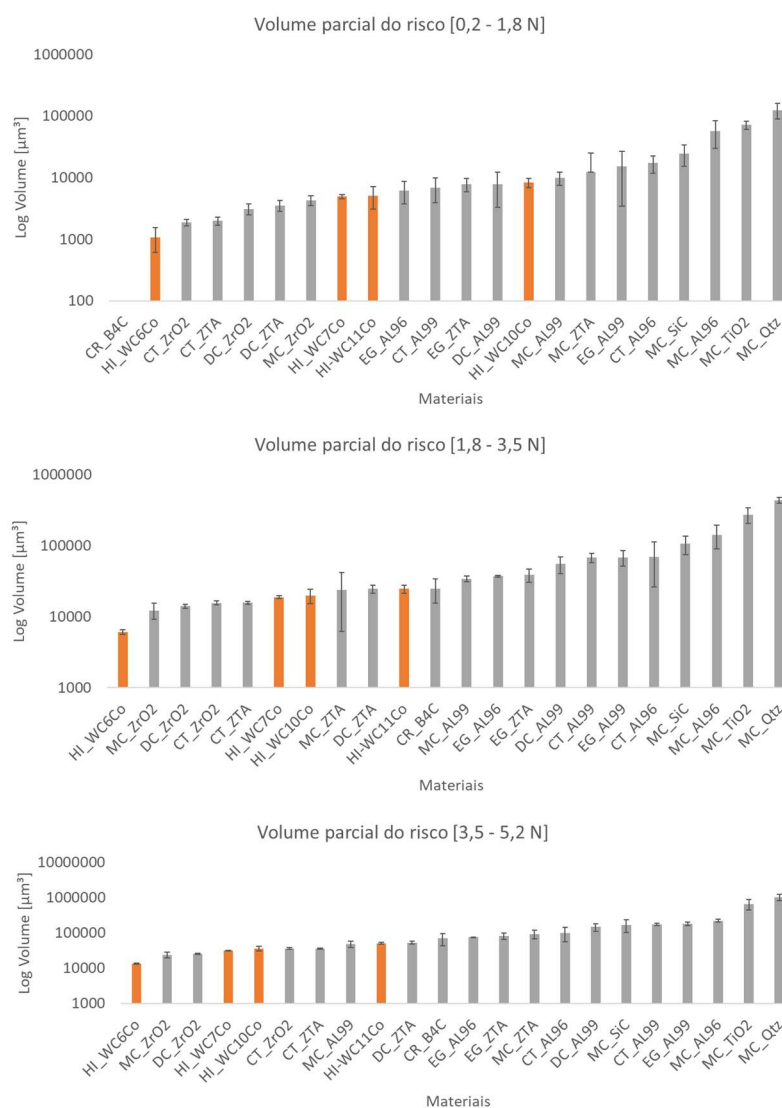


Figura 68. Análise do volume perdido em cada etapa do risco (0,2 a 1,8 N – 1,8 a 3,5 N – 3,5 a 5,2 N) com indentador Vickers. Fonte: autor.

Os ensaios com indentador Vickers apresentaram boa correlação com a tenacidade, chegando a valores de R^2 de 0,73 quando levados em consideração apenas os materiais cerâmicos, além correlação razoável com a quantidade $H^{1/2}K_C^{3/4}$ ($R^2 = 0,54$) porém, nenhuma correlação com a dureza (Figura 69).

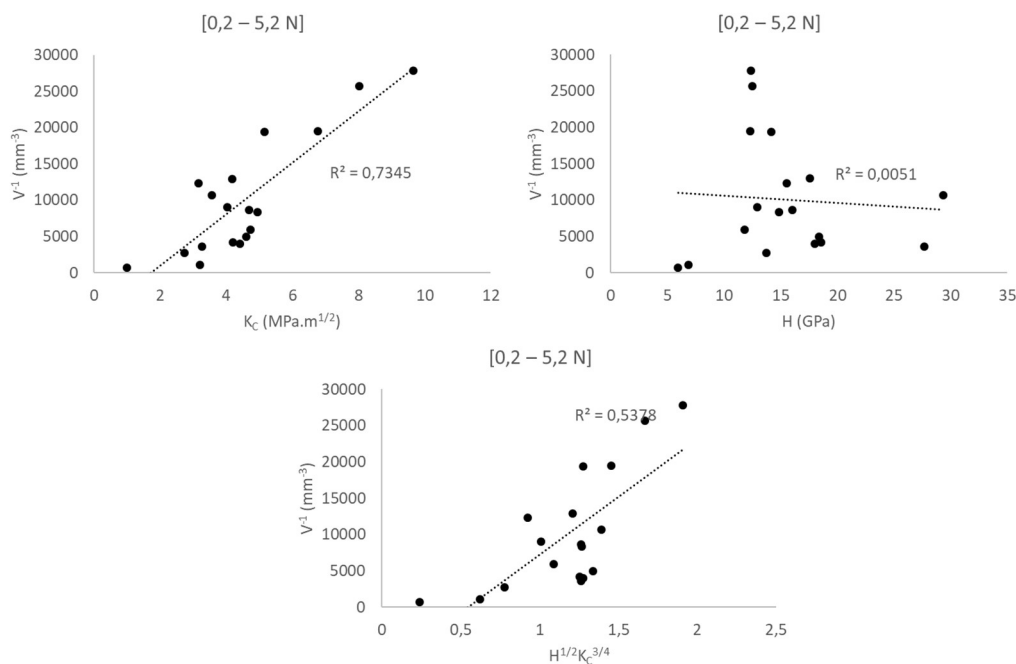


Figura 69. Correlação entre a tenacidade, a dureza, a quantidade $H^{1/2}K_C^{3/4}$ e o inverso do volume perdido dos materiais estudados, exceto os metais duros. Fonte: autor.

Ao verificarmos as correlações em todos os carregamentos (Tabela 10), mais uma vez, foi possível notar o aumento da correlação entre inverso do volume perdido e a tenacidade com o aumento da carga normal. Além de uma pequena correlação ($R^2 = 0,26$) com a dureza nas menores cargas quando apenas os materiais cerâmicos foram levados em conta. A adição de materiais compósitos (metais duros) nas correlações, reduziu os valores de R^2 em todas as situações estudadas.

Tabela 10. Resumo dos valores de R^2 das correlações com propriedades relevantes ao comportamento tribológico nos ensaios com indentador Vickers. Fonte: autor.

	R^2					
	Somente cerâmicos			Todos os materiais		
	H	K_C	$H^{1/2}K_C^{3/4}$	H	K_C	$H^{1/2}K_C^{3/4}$
0 - 1,8 N	0,2569	0,0746	0,2485	0,1946	0,0411	0,1331
1,8 - 3,5 N	0,0002	0,7123	0,5729	0	0,3147	0,3391
3,5 - 5,2 N	0,0071	0,7328	0,5105	0	0,3531	0,4169
Total	0,0051	0,7345	0,5378	0,0034	0,4124	0,4206

No que tange atrito, os ensaios com indentador Vickers apresentaram, em geral, maiores valores em relação aos ensaios com indentador Rockwell, como resume a Tabela 11. Os materiais mais frágeis (MC_AL96, MC_AL99, MC_SiC, MC_TiO₂ e CR_B4C) apresentaram os maiores valores de coeficiente de atrito, a exceção da amostra de quartzo, que apesar de frágil, apresentou baixo coeficiente de atrito em contato com diamante Vickers (0,3) em relação ao demais materiais, que apresentaram valores próximos de 0,4.

Tabela 11. Principais resultados obtidos nos ensaios de esclerometria linear com o indentador de diamante Vickers. Fonte: autor.

Amostra	Coeficiente de atrito			Mecanismos de desgaste		
	2 – 33,7 N	33,7 – 66,7 N	66,7 -102 N	2 – 33,7 N	33,7 – 66,7 N	66,7 -102 N
HI_WC6Co	0,25	0,4	0,4	Sulc.	Sulc.	Sulc.
HI_WC7Co	0,25	0,4	0,4	Sulc.	Sulc.	Sulc.
HI_WC10Co	0,3	0,4	0,4	Sulc.	Sulc.	Sulc.
HI_WC11Co	0,3	0,4	0,4	Sulc.	Sulc.	Sulc.
MC_AL96	0,6	0,6	0,6	Sul.+Trinc.	Sul.+Trinc.	Sul.+Trinc.
CT_AL96	0,6	0,5	0,4	Sul.+Trinc.	Sul.+Trinc.	Sul.+Trinc.
EG_AL96	0,65	0,45	0,4	Sul.+Trinc.	Sul.+Trinc.	Sul.+Trinc.
CT_AL99	0,5	0,4	0,4	Sul.+Trinc.	Sul.+Trinc.	Trinc.
DC_AL99	0,8	0,5	0,45	Trinc.	Trinc. Severo	Trinc. Severo
EG_AL99	0,5	0,4	0,4	Trinc.	Trinc. Severo	Trinc. Severo
MC_AL99	0,4	0,5	0,4	Trinc.	Trinc. Severo	Trinc. Severo
MC_ZTA	0,15	0,28	0,3	Sul.+Trinc.	Sul.+Trinc.	Sul.+Trinc.
CT_ZTA	0,4	0,4	0,4	Sul.+Trinc.	Sul.+Trinc.	Sul.+Trinc.
DC_ZTA	0,4	0,4	0,4	Sul.+Trinc.	Sul.+Trinc.	Sul.+Trinc.
EG_ZTA	0,45	0,4	0,4	Sul.+Trinc.	Sul.+Trinc.	Sul.+Trinc.
MC_ZrO ₂	0,4	0,4	0,4	Sulc.	Sulc.	Sulc.
CT_ZrO ₂	0,25	0,35	0,4	Sulc.	Sulc.	Sulc.
DC_ZrO ₂	0,3	0,35	0,4	Sulc.	Sulc.	Sulc.
MC_SiC	0,4	0,5	0,45	Trinc.	Trinc. Severo	Trinc. Severo
MC_Qtz	0,15	0,25	0,3	Sulc.	Trinc.	Trinc. Severo
MC_TiO ₂	0,5	0,5	0,5	Sul.+Trinc.	Sul.+Trinc.	Sul.+Trinc.
CR_B4C	0,45	0,7	0,7	Trinc. Severo	Trinc. Severo	Trinc. Severo

5.3 ENSAIOS COM O ABRASÔMETRO RODA DE BORRACHA HORIZONTAL

O ensaio roda de borracha descrito na norma ASTM G65-16 (2021), é comumente utilizado para avaliar o comportamento de materiais sujeitos à abrasão a três corpos. O aparato para o ensaio, mostrado esquematicamente na Figura 70, suporta um corpo de prova plano, onde um peso morto atua, pressionando-o contra um disco de aço

revestido de borracha (roda de borracha). Enquanto a roda gira, areia é adicionada no contato, desgastando o corpo de prova. As condições desse ensaio são consideradas como “*low stress scratching abrasion*” ou seja, abrasão de baixa tensão. Esse ensaio é largamente utilizado para classificação de materiais em equipamentos sujeitos a abrasão de baixa tensão, como os chutes nas plantas de mineração e em equipamentos usados para movimentação de terra (STEVENSON e HUTCHINGS, 1996).

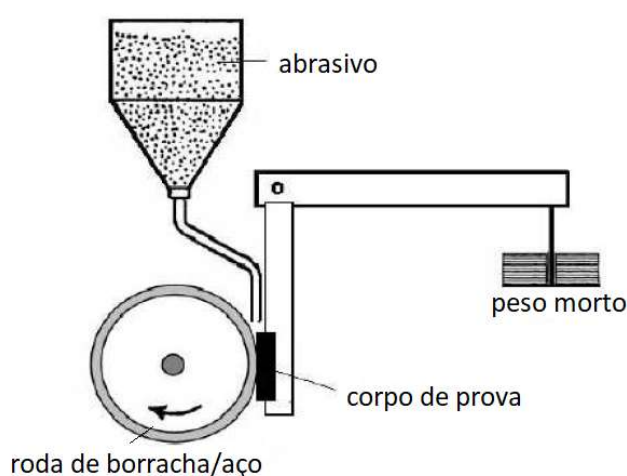


Figura 70. Representação esquemática do equipamento para ensaios roda de borracha. Fonte: (ASTM G65-16 (2021)). Nota: adaptado pelo autor.

Stevenson e Hutchings, em 1996, sugeriram uma modificação importante nesse equipamento, dispondo a amostra horizontalmente (Figura 71), ao invés de verticalmente, como no modelo original. O principal motivo para essa modificação foi a possibilidade de armazenar, quantificar e analisar os abrasivos que realmente entram em contato com o corpo de prova.

O número de abrasivos no contato (N_p) pode ser calculado através da equação:

$$N_p = \frac{Wx}{vm_p} \quad (13)$$

Onde, “W” é o fluxo de abrasivo que realmente entra em contato com a amostra, “x” é o comprimento do contato entre a roda de borracha e o corpo de prova, “v” é a velocidade de deslizamento relativa e “ m_p ” é a massa de uma partícula abrasiva.

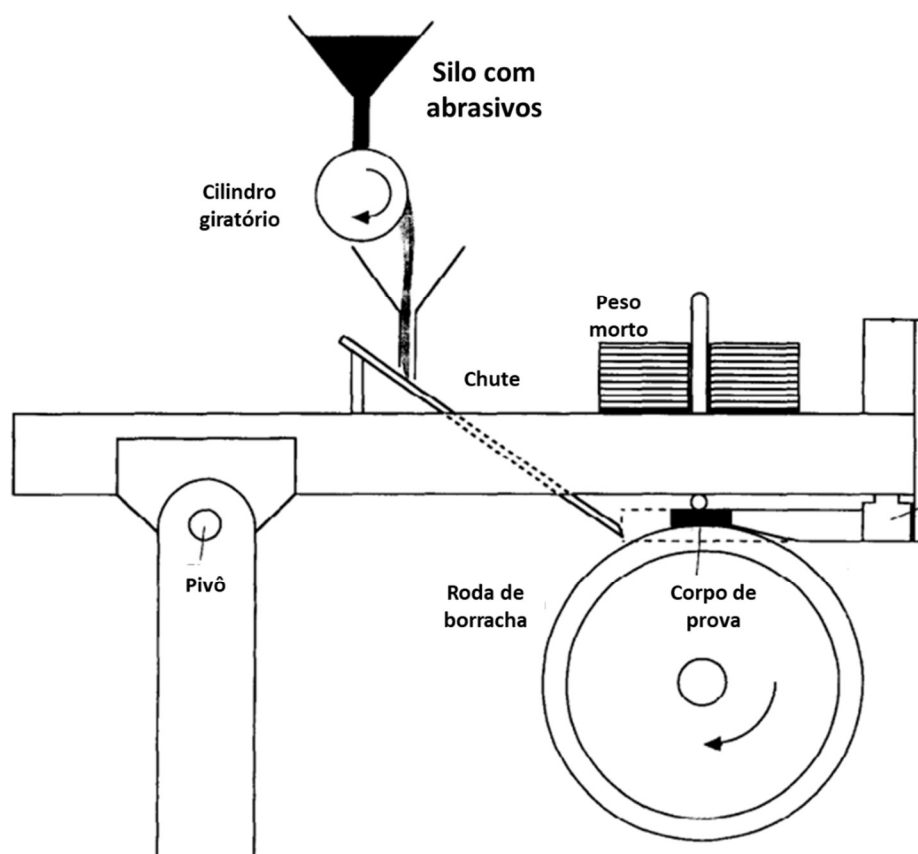


Figura 71. Representação esquemática do equipamento para ensaios tipo roda de borracha modificado. Fonte: (STEVENSON, A. N. J.; HUTCHINGS, 1996). Nota: Adaptado pelo autor.

Um dos poucos trabalhos que investigaram o comportamento de cerâmicos nos ensaios roda de borracha a seco, Gee (1999) aponta a presença de *debris* e fratura intergranular na superfície desgastada da alumina (Figura 72)

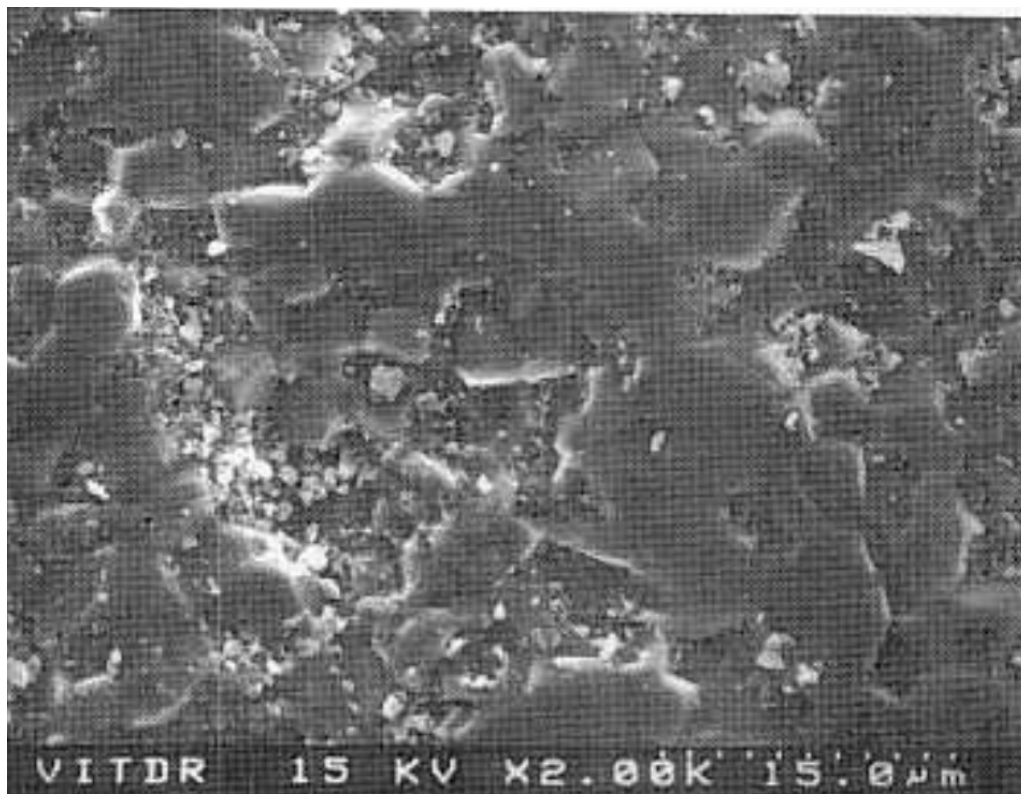


Figura 72. Superfície desgastada na alumina (Vitox) após ensaio tipo roda de borracha a seco (ASTM G65). Fonte: (GEE, 1999). Nota: adaptado pelo autor.

No trabalho de GEE, GANT e ROEBUCK (2007), foi observado a remoção do metal ligante, tanto de metais duros com granulometria fina, quanto com grosseira, em ensaios tipo roda de borracha a seco (Figura 73), quanto em outras configurações estudadas no artigo.

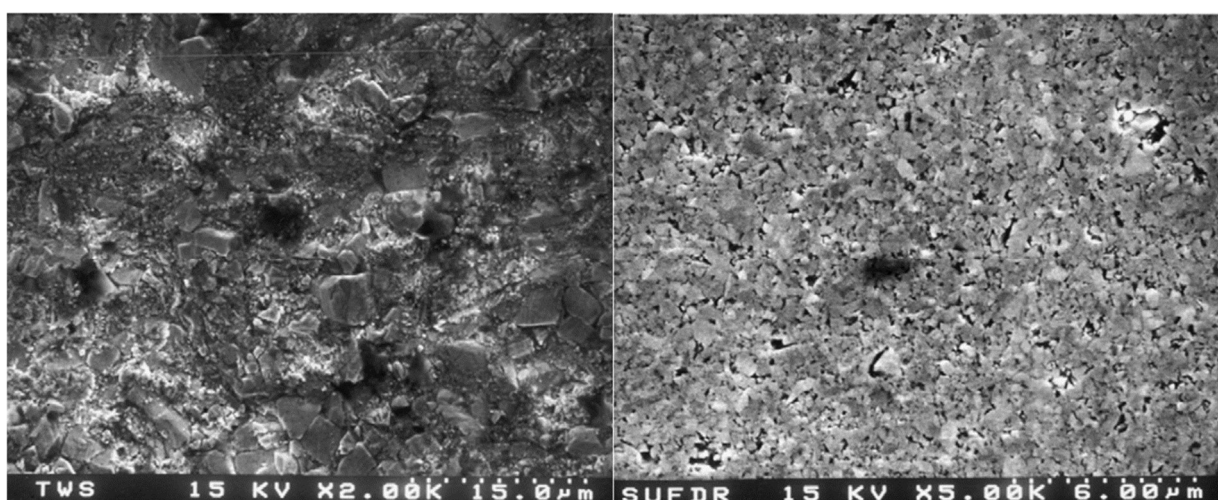


Figura 73. Remoção do metal ligante em amostras de metal duro com granulometria grosseira (esquerda) e fina (direita) em ensaios tipo roda de borracha a seco. Fonte: (GEE, GANT e ROEBUCK, 2007). Nota: adaptado pelo autor.

5.3.1 Experimentos

Os ensaios foram realizados em um abrasômetro tipo roda de borracha horizontal modificado segundo Stevenson e Hutchings (1996) (Figura 74) do Laboratório de Tribologia Corrosão e Materiais (TRICORRMAT).

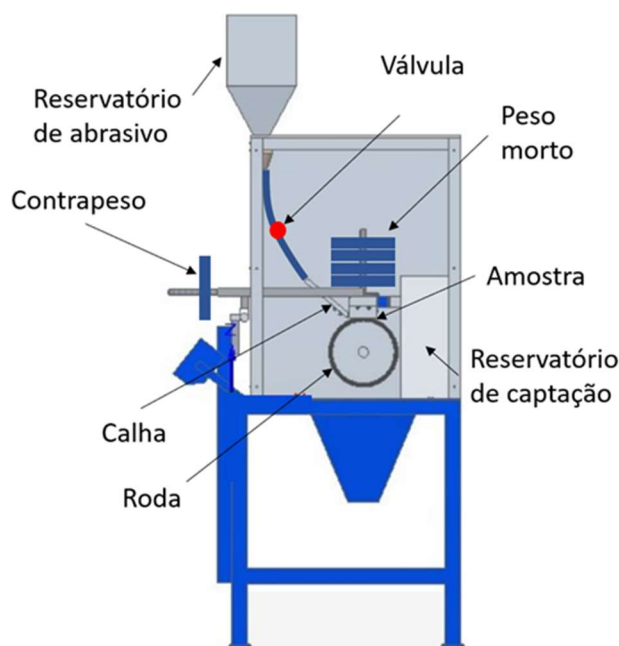


Figura 74. Desenho esquemático do abrasômetro roda de borracha horizontal utilizado. Fonte: (PAIVA, 2021). Nota: adaptado pelo autor.

5.3.1.1 Ajustagem e calibração do abrasômetro roda de borracha

Antes dos ensaios de validação do equipamento e dos ensaios nas amostras de cerâmicos e metal duro, o equipamento foi ajustado/calibrado segundo os critérios da norma ASTM G65.

Em todos os testes utilizou-se como abrasivo a Areia Normal Brasileira do IPT (Instituto de Pesquisa Tecnológica), NBR-7214 de fração média fina com tamanho médio entre 0,3 e 0,6 mm (50 Mesh) e densidade aproximada de 2,6 g/cm³. A umidade relativa da areia foi verificada através da medição da perda de massa após o aquecimento por 1 hora à 120°C em estufa. Como o resultado fora inferior a 0,5% em peso, não houve a necessidade de secar a areia antes de cada ensaio, podendo ser utilizada como disponível. É digno de nota que a areia recomendada pela norma é a

AFS 50/70 fornecida pela U.S. Silica Co. de Ottawa, Illinois, porém, por ser de difícil aquisição, é comum o uso da areia 50 do IPT em estudos tribológicos no Brasil.

A roda do equipamento era revestida com borracha clorobutílica com dureza Shore A de 59 ± 1 (a norma indica entre 58 e 62 Shore A). A roda de borracha foi dressada com uma lima de aço e auxílio de um nível tipo bolha para melhor posicionamento até atingir uma concentricidade máxima de 0,05 mm, medida com relógio comparador Mitutoyo. Após a dressagem, como indicado pela norma, foi realizado um ensaio com amostra de aço ao carbono AISI 1020 segundo o procedimento A da ASTM G65 (carga: 130 N e distancia deslizada: 4309 m) de maneira a “suavizar” e uniformizar a superfície da borracha. A concentricidade foi verificada novamente e apresentando valores máximos de 0,04 mm.

Diferente do abrasômetro de Stevenson e Hutchings (Figura 71) o sistema para o controle do fluxo de abrasivo foi realizado através de uma válvula. A fluxo foi ajustado em aproximadamente 350 g/min (a norma indica entre 300 e 400 g/min). Essa vazão foi medida com diferentes quantidades de abrasivo silo, apresentando variabilidade máxima de 5 g/min. Em todos os ensaios, a exceção dos ensaios onde as condições de Stevenson e Hutchings foram reproduzidas, a rotação da roda foi de 200 rpm.

Finalmente, antes de iniciar os ensaios de validação, foi realizado um ajuste fino e nivelamento do equipamento a fim de obter uma marca de desgaste simétrica.

5.3.1.2 Validação do abrasômetro

Após a ajustagem e calibração do abrasômetro, foram realizados ensaios de validação do equipamento em amostras de aço AISI D2 e H13, segundo o procedimento A e B, respectivamente, da norma ASTM G65.

A Tabela 12 compara as durezas e o volume perdido obtido nos ensaios com os da norma ASTM G65.

Tabela 12. Resultados obtidos em laboratório e comparação com a norma ASTM G65. Fonte: autor.

	Dureza ASTM G65	Dureza Mensurada [HRC]	Vol. Perdido ASTM G65 [mm ³]	Limite de repetibilidade (r) ASTM G65	Limite de reprodutibilidade (R) ASTM G65	Vol. Perdido Abrasômetro [mm ³]
D2	59-60	$61,2 \pm 0,7$	$42,70 \pm 1,10$ - A	3,09	7,31	$31,89 \pm 1,61$ - A
H13	47-48	$50,6 \pm 1,1$	$54,16 \pm 3,66$ - B	10,26	19,04	$64,58 \pm 4,31$ - B

Como ser visto na tabela acima os resultados obtidos na amostra de H13 seguindo o procedimento B da ASTM G65 (carga: 130 N e distância deslizada: 1436 m) estiveram dentro dos limites de repetibilidade e reprodutibilidade. Já nos ensaios na amostra de aço D2 seguindo o procedimento A (carga: 130 N e distância deslizada: 4309 m), a repetibilidade foi atingida (a observar-se o desvio padrão de 1,61) porém o mesmo não aconteceu com a reprodutibilidade. Vale ressaltar que o abrasômetro normatizado pela ASTM G65 tem configuração vertical, o que pode implicar em diferenças quanto a dinâmica do fluxo de abrasivos, além disso, o abrasivo utilizado foi a areia 50 do IPT, sendo que na norma ASTM os ensaios são concretizados com areia AFS 50/70.

Sendo assim, foi realizado um ensaio em amostra de aço AISI 1020 replicando uma das condições do trabalho de Stevenson e Hutchings (1996): velocidade tangencial de $0,6 \text{ m.s}^{-1}$, carga normal de 98,1 N e vazão de abrasivo de $1,1 \text{ g.s}^{-1}$. Como resultado, uma taxa de desgaste de $613 \pm 42 \text{ } \mu\text{g/m}^{-1}$ foi alcançada. Deve-se salientar o caráter complexo desses ensaios ao analisarmos dois gráficos extraídos do referido artigo (Figura 75). As setas vermelhas nos gráficos indicam a mesma condição de ensaios (velocidade tangencial de $0,6 \text{ m.s}^{-1}$, carga normal de 98,1 N e vazão de abrasivo de $1,1 \text{ g.s}^{-1}$), logo, em um mesmo equipamento, com amostras de um mesmo material e com os mesmo abrasivos, taxas de desgaste distintas foram obtidas, sendo a primeira (esquerda), aproximadamente $470 \text{ } \mu\text{g/m}^{-1}$ e a segunda (direita) $350 \text{ } \mu\text{g/m}^{-1}$. Desta maneira, se torna plausível a obtenção resultados diferentes em um equipamento diferente, com abrasivos diferentes (areia 50 IPT e areia AFS 50/70). Também, acerca dos abrasivos, o artigo não deixa claro que usa areia AFS 50/70 nesses ensaios (variando a velocidade e a carga normal), levando a crer em outras partes do texto que usou areia com tamanho entre 90 e $150 \text{ } \mu\text{m}$.

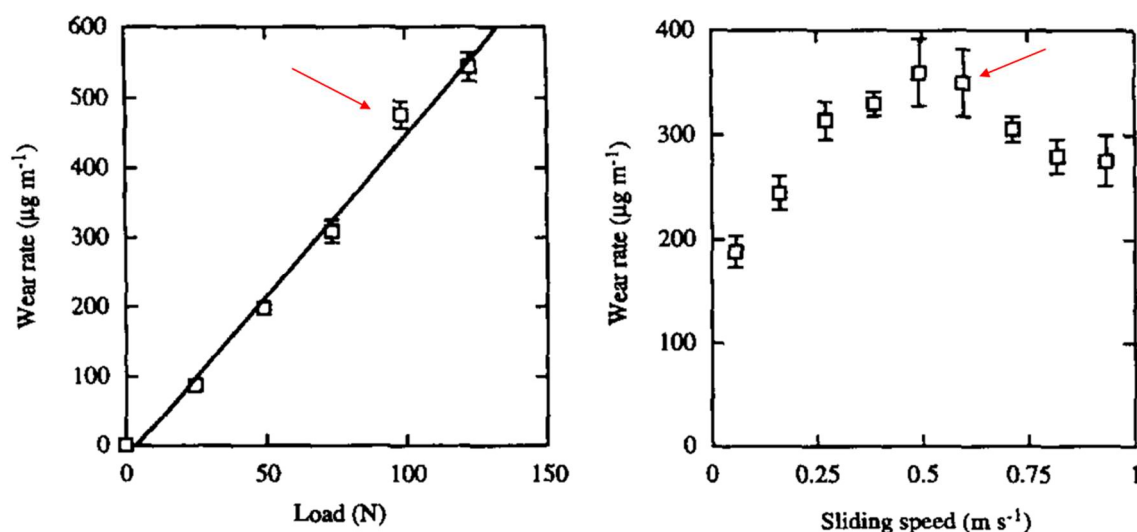


Figura 75. Variação da taxa de desgaste com a carga normal (esquerda) e com a velocidade tangencial da roda (direita). Fonte: (Stevenson e Hutchings, 1996). Nota: Adaptado pelo autor.

5.3.1.3 Procedimento experimental

Três amostras de cada material foram ensaiadas, totalizando 51 ensaios, nas mesmas condições: o procedimento B da norma ASTM G65 (carga normal: 130 N, distância deslizada: 1436 m e rotação da roda: 200 rpm).

O procedimento B foi escolhido devido a sua distância deslizada ser três vezes menor em relação ao procedimento A, gerando, por consequência, uma marca de desgaste menor, não ultrapassando assim, o comprimento máximo das amostras (40 mm). Já a motivação para a aquisição de amostras com tamanho reduzido (40 x 19 x 5 mm) se deu por dois motivos: o custo e a menor probabilidade de fratura da amostra durante a fixação no porta amostras.

Devido à complexidade desse tipo de ensaio, sua condução se deu de maneira muito mais criteriosa que os ensaios anteriores. Sendo assim, a ordem de execução dos ensaios foi aleatorizada, para reduzir a influência de possíveis alterações do sistema tribológico que possam vir a ocorrer durante a condução dos ensaios. O diâmetro da roda foi medido após cada ensaio e o tempo de ensaio recalculado de maneira que a distância deslizada fosse a mesma, 1436 m. O aspecto da marca de desgaste e formato da roda foram acompanhados, sendo realizado o procedimento de dressagem da roda, descrito anteriormente, caso fosse necessário.

Os abrasivos que passaram pelo contato amostra/roda foram captados durante os ensaios e tiveram sua massa mensurada em balança de precisão visando determinar a carga normal média em cada abrasivo durante os ensaios de acordo com a equação 13 fornecida por Stevenson e Hutchings (1996). Os resultados dos cálculos se encontram na tabela abaixo:

Tabela 13. Cargas por partícula estimadas pela equação de Stevenson e Hutchings (1996). Fonte: autor.

Amostra	Carga por partícula (N)	Desvio padrão
DC_ZTA	0,49	0,05
DC_ZrO2	0,54	0,10
EG_ZTA	0,57	0,05
MC_AL96	0,59	0,11
HI_WC7Co	0,60	0,06
CR_B4C	0,60	0,15
MC_AL99	0,61	0,10
MC_ZTA	0,61	0,10
MC_ZrO2	0,62	0,09
DC_AL99	0,63	0,12
CT_AL99	0,64	0,05
CT_AL96	0,64	0,07
EG_AL99	0,66	0,16
CT_ZrO2	0,71	0,05
HI_WC10Co	0,74	0,25
EG_AL96	0,74	0,15
CT_ZTA	0,74	0,10

5.3.2 Resultados dos ensaios e mecanismos de desgaste

No gráfico de colunas da Figura 76, temos, em ordem crescente, os valores da matéria perdida durante os ensaios roda de borracha horizontal para cada material. É possível notar o pequeno volume perdido nos metais duros, formando a primeira e segunda posição no gráfico, seguido das ZTA's e zircônias (materiais com tenacidade relativamente alta em relação aos cerâmicos) logo após, temos as aluminas com 96 e 99% de pureza e o carbeto de boro entre elas. Ao observarmos esses resultados já temos um indício de uma correlação razoável entre tenacidade e desgaste. Outro ponto digno de nota, são os altos valores de matéria removida nas aluminas do fabricante MC.

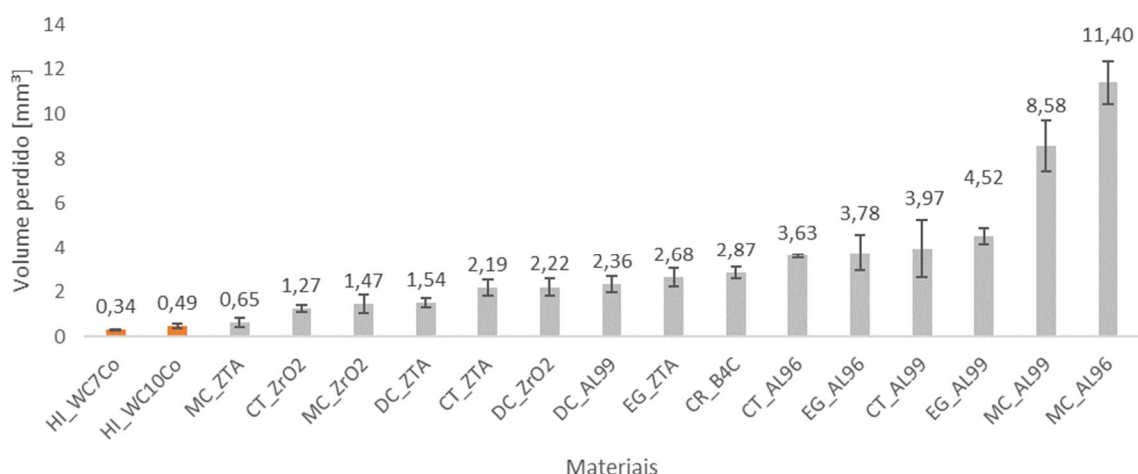


Figura 76. Volume perdido médio e desvio padrão após os ensaios roda de borracha horizontal segundo o procedimento B na norma ASTM G5. Fonte: autor.

Quanto aos mecanismos de desgaste, nas amostras de metal duro (Figura 77), foi evidenciado o micromecanismo de riscamento nos menores aumentos, sendo este mais proeminente nas amostras com 7% de cobalto. Nos maiores aumentos, não foi notada a presença de trincamento nos grãos de WC, apesar de o aspecto na superfície desgastada indicar remoção de material via mecanismos frágeis. Também não foi observada a remoção do cobalto, diferente do que foi observado por GEE, GANT e ROEBUCK (2007), Figura 73.

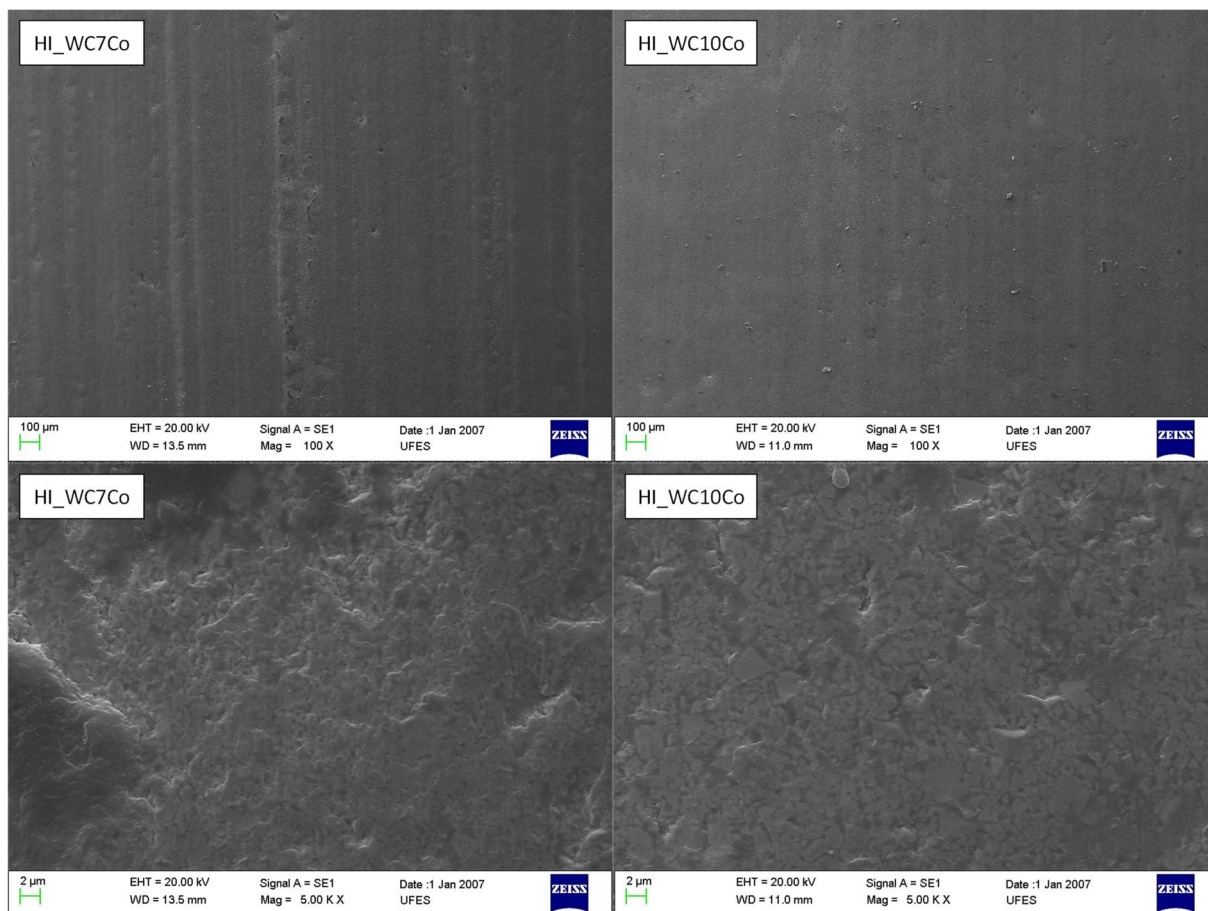


Figura 77. MEV – Riscamento nas amostras de metal dura em baixas magnificações (100X) e destacamento frágil em maiores ampliações (5000X). Fonte: autor.

Em relação ao comportamento das ZTA's, nas menores ampliações (Figura 78), todas apresentaram mecanismos semelhantes, microriscamento e remoção de material via mecanismos frágeis.

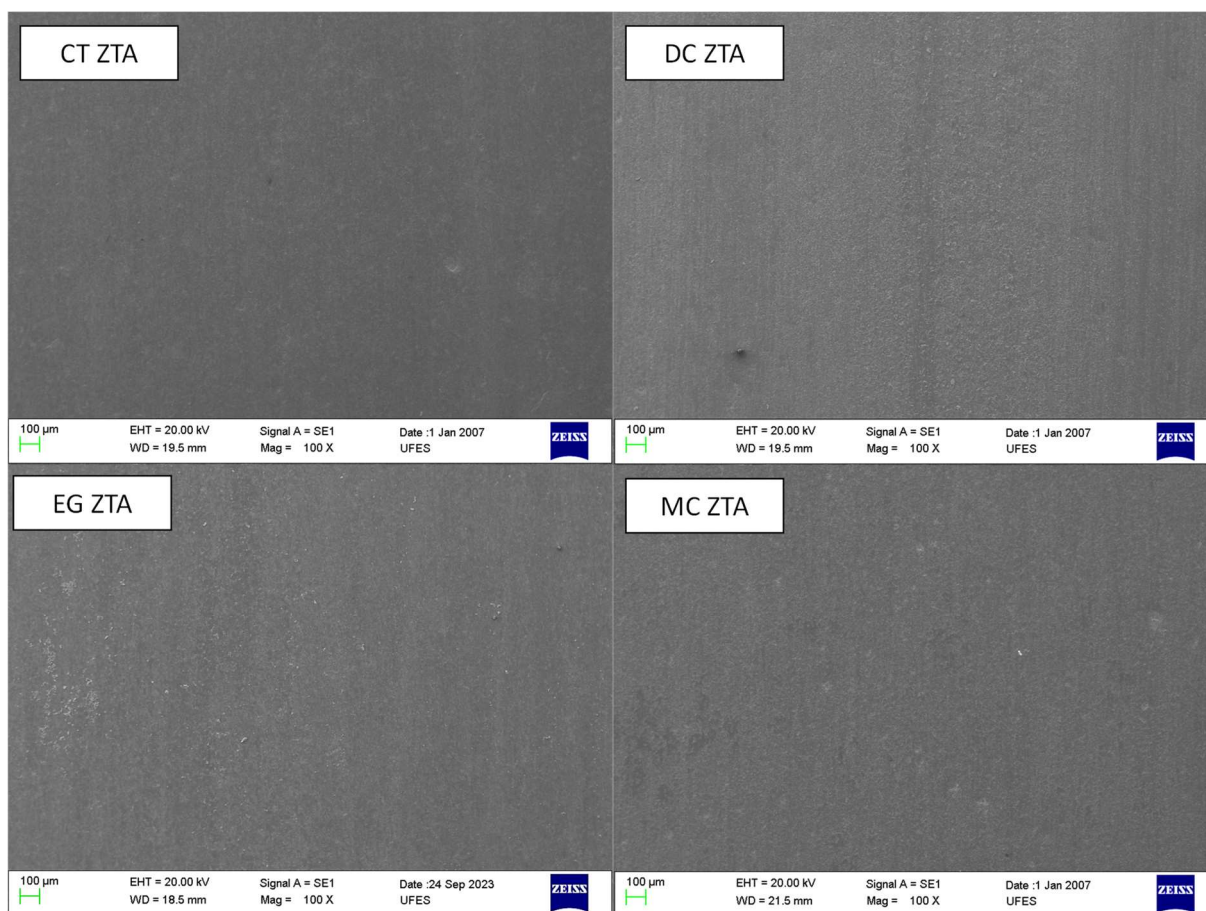


Figura 78. MEV – Riscamento e destacamento frágil de matéria nas ZTA's em menores aumentos (100X). Fonte: autor.

As ZTA's também apresentaram aspecto frágil semelhante nos maiores aumentos (Figura 79). Apesar na grande semelhança no que tange aos mecanismos de desgaste, as ZTA's obtiveram resultados dissimilares nos ensaios tipo roda de borracha: a MC_ZTA logrou o terceiro menor volume de matéria perdida ($0,65 \text{ mm}^3$), sendo a primeira colocação entre os cerâmicos. A DC_ZTA obteve $1,54 \text{ mm}^3$ tendo o segundo menor volume entre as ZTA's e o quarto entre os cerâmicos, ficando atrás de duas zircônias. A CT_ZTA alcançou $2,19 \text{ mm}^3$ ficando logo atrás da DC_ZTA e por último, a EG_ZTA, com volume perdido ($2,68 \text{ mm}^3$) quatro vezes maior que a MC_ZTA.

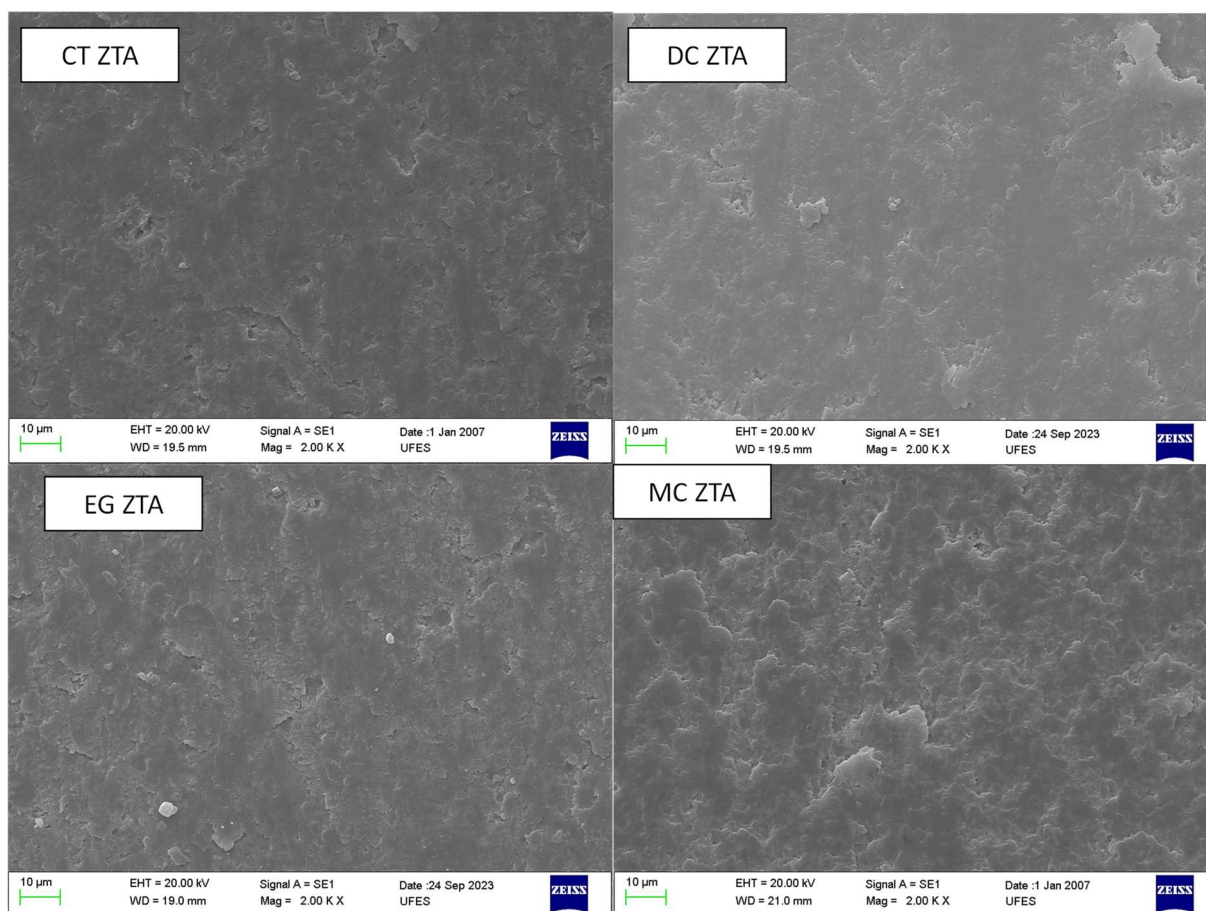


Figura 79. MEV – Aspecto frágil das ZTA's em maiores magnificações (2000X). Fonte: autor.

A Tabela 14 apresenta os valores de desgaste e as propriedades relevantes desse grupo de materiais.

Tabela 14. Volume perdido e propriedades relevantes das ZTA's. *Durezas estimadas para a carga por partícula calculada. Fonte: autor.

Material	MC_ZTA	DC_ZTA	CT_ZTA	EG_ZTA
V (mm ³)	0,65 ± 0,21	1,54 ± 0,20	2,19 ± 0,35	2,68 ± 0,41
H (GPa)	15,21*	15,00*	15,64*	15,42*
Kc (MPa.m ^{1/2})	4,68 ± 0,31	4,17 ± 0,39	5,15 ± 0,75	4,95 ± 0,52
ρ (g/cm ³)	4,209 ± 0,006	4,112 ± 0,032	3,954 ± 0,012	4,084 ± 0,014

Nota-se (Tabela 14) que a densidade é a única propriedade que apresenta alguma correlação com o volume perdido. Uma das hipóteses plausíveis seria a menor

porosidade nas amostras mais densas e/ou o maior percentual de zircônia nas ZTA's mais densas.

Em relação ao comportamento das zircônias, estas apresentaram mecanismos de desgaste semelhantes, em todos os aumentos estudados, com microriscamento bem definido, melhor visto em menores aumentos, e riscos com interior dúctil e trincamento nas bordas como podemos observar nos maiores aumentos (Figura 80).

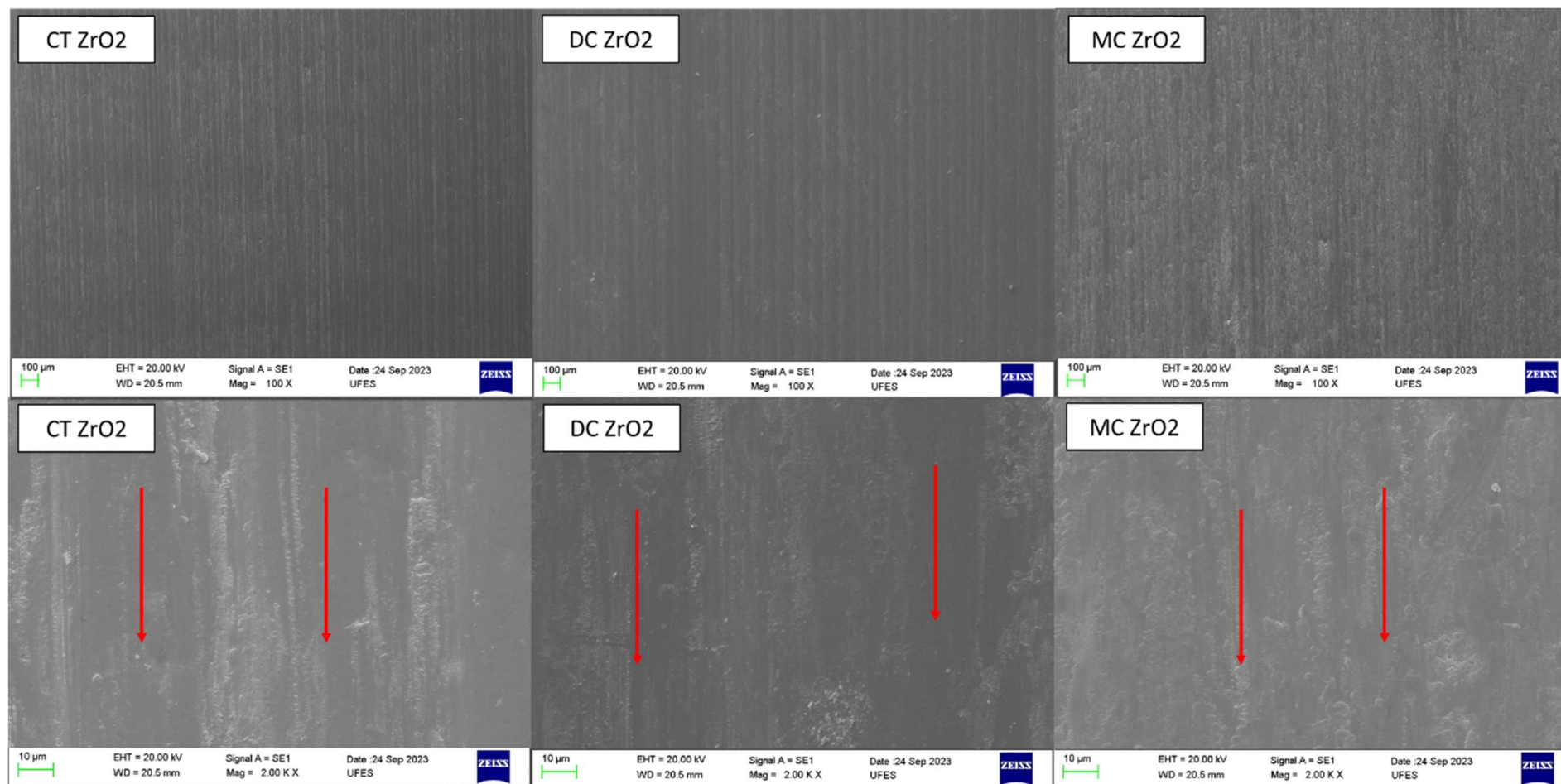


Figura 80. MEV – Riscamento plástico nas zircônias em 100 e em 2000X. As setas vermelhas foram posicionadas no centro dos riscos e indicam o sentido destes. Fonte: autor.

A MC_ZrO₂ apresentou a maior dureza, maior tenacidade e maior densidade entre as zircônias, porém não obteve o menor desgaste, ficando atrás da CT_ZrO₂. No entanto, a diferença entre essas se encontrava entre as barras de erro (Tabela 15). A amostra DC_ZrO₂ apresentou uma perda de material 74% maior que a amostra com menor desgaste (CT_ZrO₂) apesar de sua maior tenacidade medida. Costa, Pandolfelli e de Mello (1997), em ensaios abrasivos a dois e três corpos em diferentes níveis de severidade com diferentes tipos de zircônias, observaram correlações entre tenacidade e desgaste apenas em ensaios a dois corpos em condições de moderada severidade, nos outros ensaios, nenhuma correlação foi observada, sendo que na maioria das vezes, a amostra com maior dureza obteve menor taxa de desgaste.

Tabela 15. Volume perdido e propriedades relevantes das Zircônias. Fonte: autor.

Material	CT_ZrO ₂	MC_ZrO ₂	DC_ZrO ₂
V (mm ³)	1,27 ± 0,15	1,47 ± 0,42	2,22 ± 0,37
H (GPa)	11,77*	12,46*	10,77*
K _c (MPa.m ^{1/2})	6,76 ± 0,60	9,65 ± 0,26	8,01 ± 0,58
ρ (g/cm ³)	6,023 ± 0,006	6,031 ± 0,006	5,976 ± 0,017

Os mecanismos de desgaste das aluminas, em baixo aumento, foram similares, a exceção da alumina da fabricante MC, que apresentou superfície com aspecto rugoso ante as demais, indicando a remoção generalizada de material via mecanismos frágeis (Figura 81).

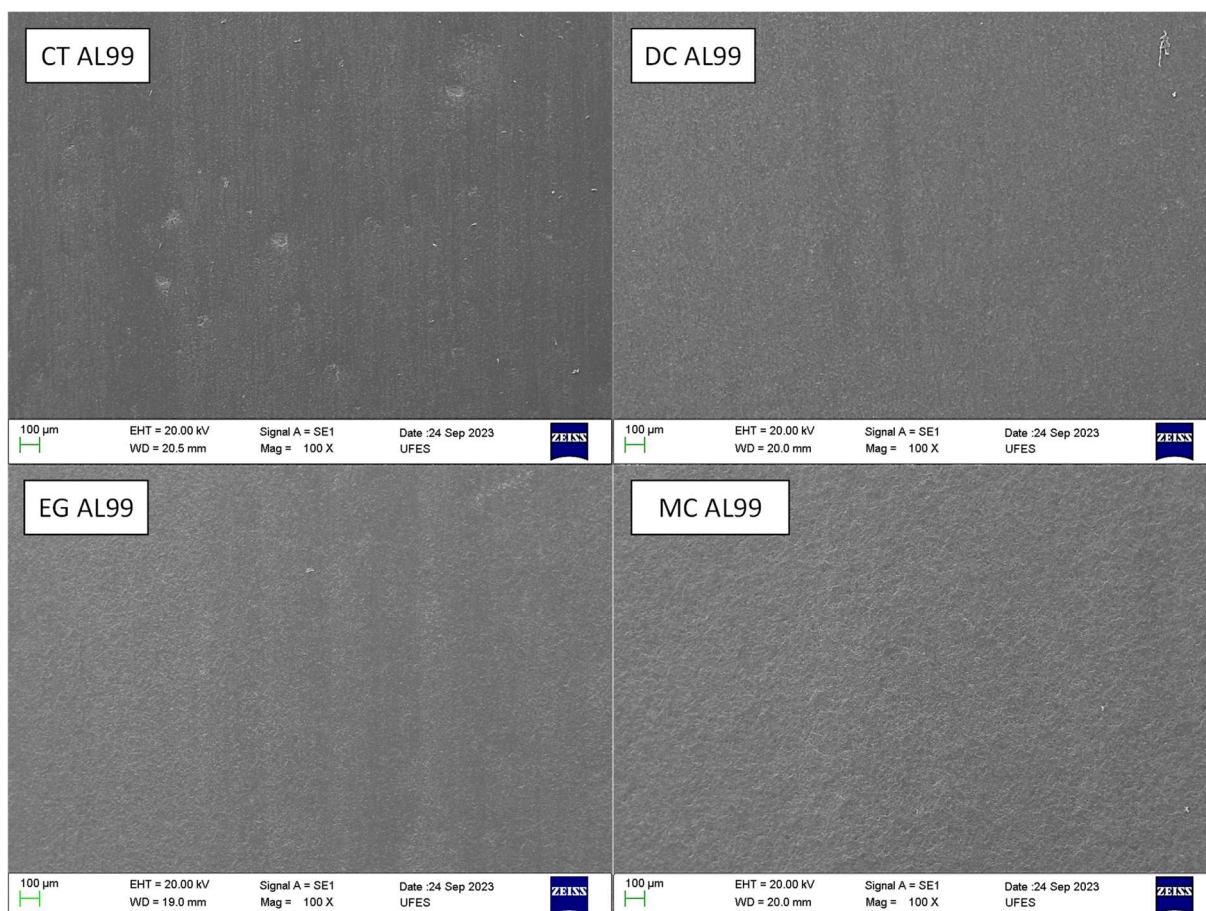


Figura 81. MEV – Microriscamento bem definido nas aluminas no aumento de 100x, a exceção da MC_AL99. Fonte: autor.

Já nos maiores aumentos, o aspecto superficial de todas as amostras foi similar, apresentando superfície irregular e destacamento de matéria, mesmo assim, na MC_AL99 foi possível notar a presença de regiões facetadas, indicando a presença de mecanismos de maior fragilidade (Figura 82) e trincamento aparentemente intergranular, como indicado pelas setas vermelhas na Figura 83, ainda nessa figura, nota-se semelhança com o mecanismo *flake-formation* citado primeiramente por Kato em 1990. A região central da imagem remete à região após a remoção da partícula (*flake*), ver Figura 4, e, ao redor, pequenas partículas de material, similares as “*flakes*” vistas na Figura 5. Essa mesma imagem (Figura 83), apesar de maior aumento, mostrou-se similar a um dos poucos registros de degaste da alumina em ensaio roda de borracha a seco (Figura 72).

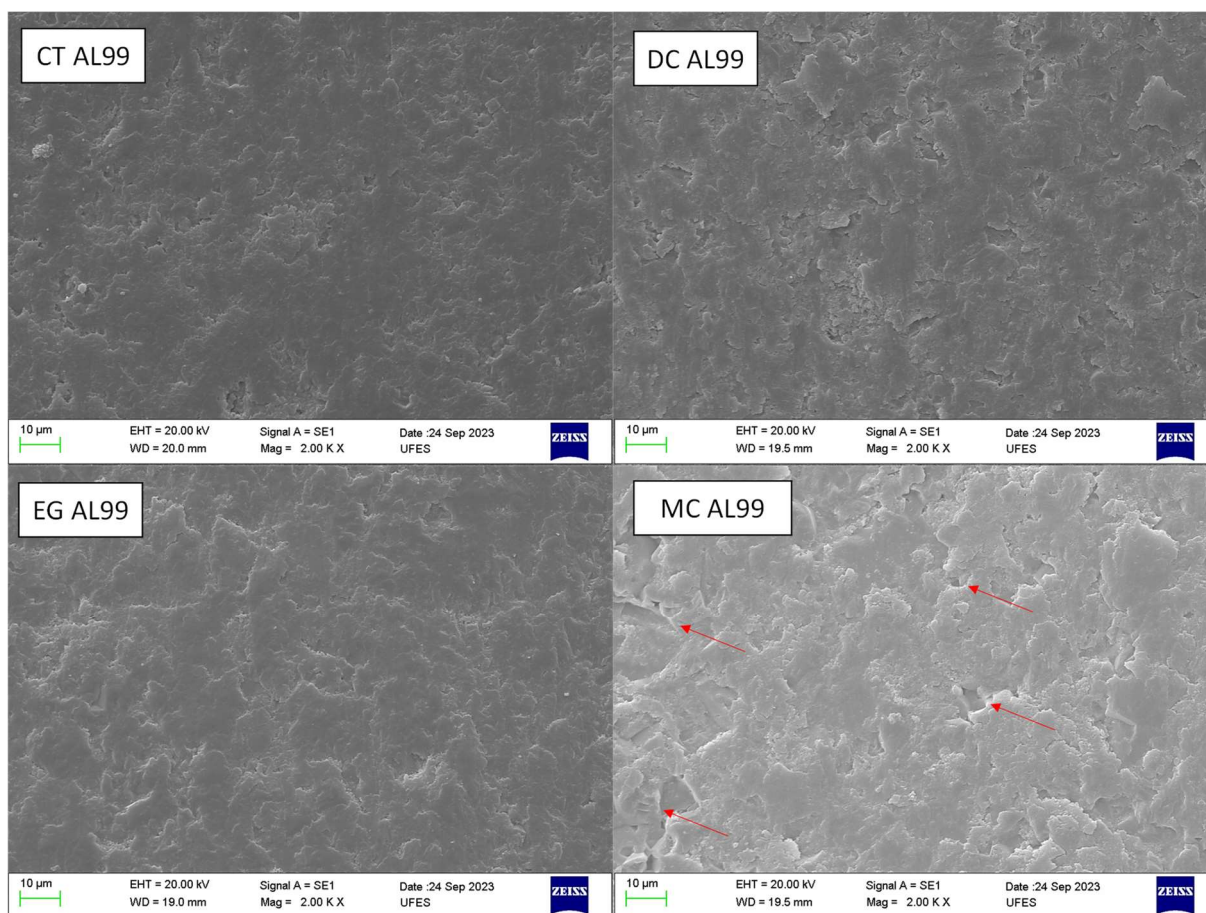


Figura 82. MEV – Destacamento de matéria nas aluminas e regiões facetas (setas vermelhas) na MC_AL99. Fonte: autor.



Figura 83. MEV – Trincamento intergranular e possível *Flake formation* na MC_AL99. Fonte: autor.

Como pode ser observado pela Tabela 16, A MC_AL99 exibiu o maior volume perdido, sendo quase 4 vezes maior que a amostra com menor desgaste (DC_AL99). Esse material obteve a menor tenacidade medida ($3,15 \text{ MPa.m}^{1/2}$) além do maior tamanho de grão entre as aluminas com 99% de pureza. A baixa tenacidade e granulometria grosseira são fatores, já bem discutidos na literatura, que tendem a reduzir o desempenho de cerâmicos quando submetidos ao desgaste abrasivo.

Tabela 16. Volume perdido e propriedades relevantes das Aluminas com 99% de pureza. Fonte: autor.

Material	DC_AL99	CT_AL99	EG_AL99	MC_AL99
V (mm ³)	2,36 ± 0,35	3,97 ± 1,30	4,51 ± 0,77	8,58 ± 1,13
H (GPa)	17,06*	16,94*	16,61*	16,57*
K _c (MPa.m ^{1/2})	4,61 ± 0,43	4,20 ± 0,49	4,40 ± 0,16	3,15 ± 0,46
ρ (g/cm ³)	3,871 ± 0,011	3,868 ± 0,008	3,866 ± 0,006	3,926 ± 0,002

Nas aluminas com 96% de pureza, apenas na do fabricante CT foi perceptível a presença dos microriscamentos. Nos outros materiais, a superfície apresentava destacamento generalizado (Figura 84). Porém, a MC_AL96, além do destacamento generalizado, apresentava um destacamento mais profundo, facetado, melhor visto nos maiores aumentos (Figura 85). A amostra do fabricante CT, também apresentou esse destacamento facetado, mais frágil, porém em menor diâmetro e quantidade.

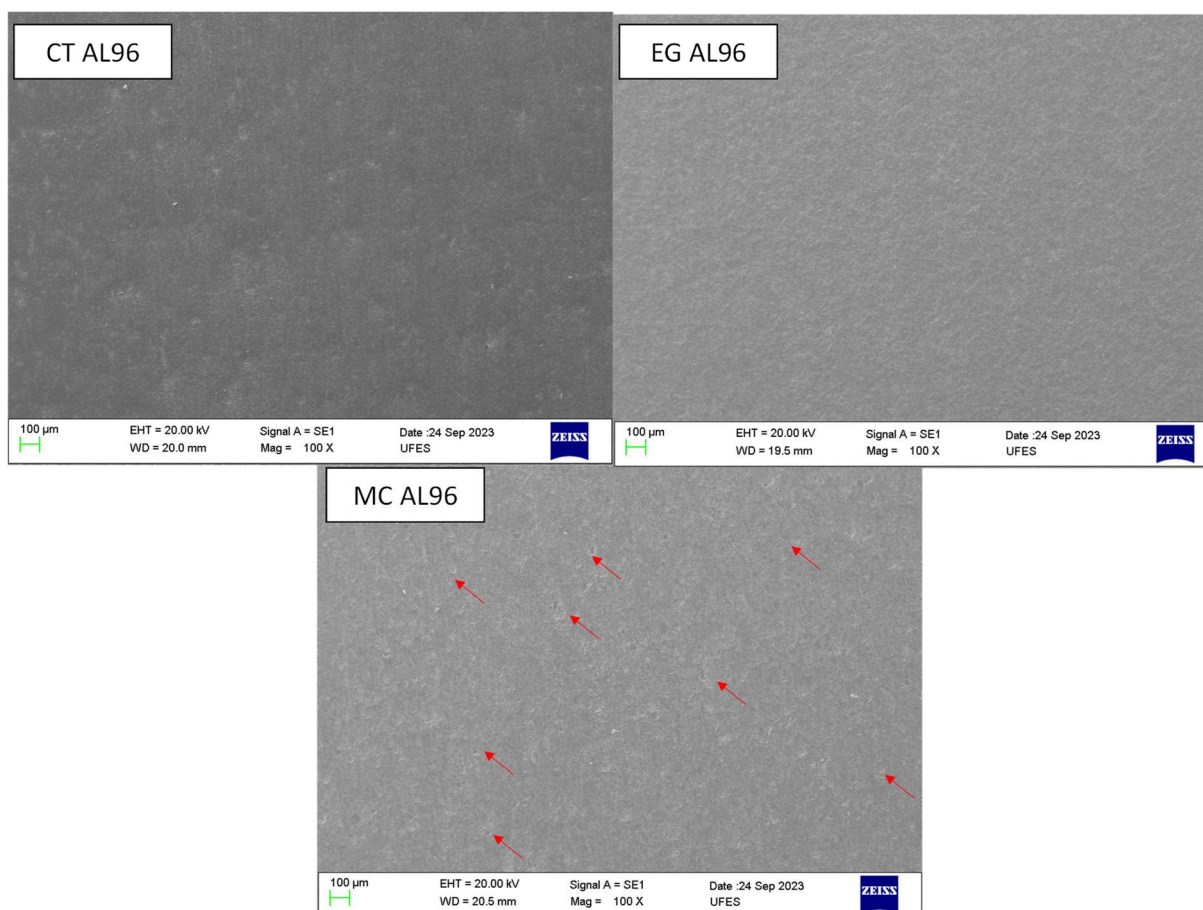


Figura 84. MEV – Riscamento na CT_AL96 e remoção de material generalizada na EG_AL96 e MC_AL96. Aumento: 100X. Fonte: autor.

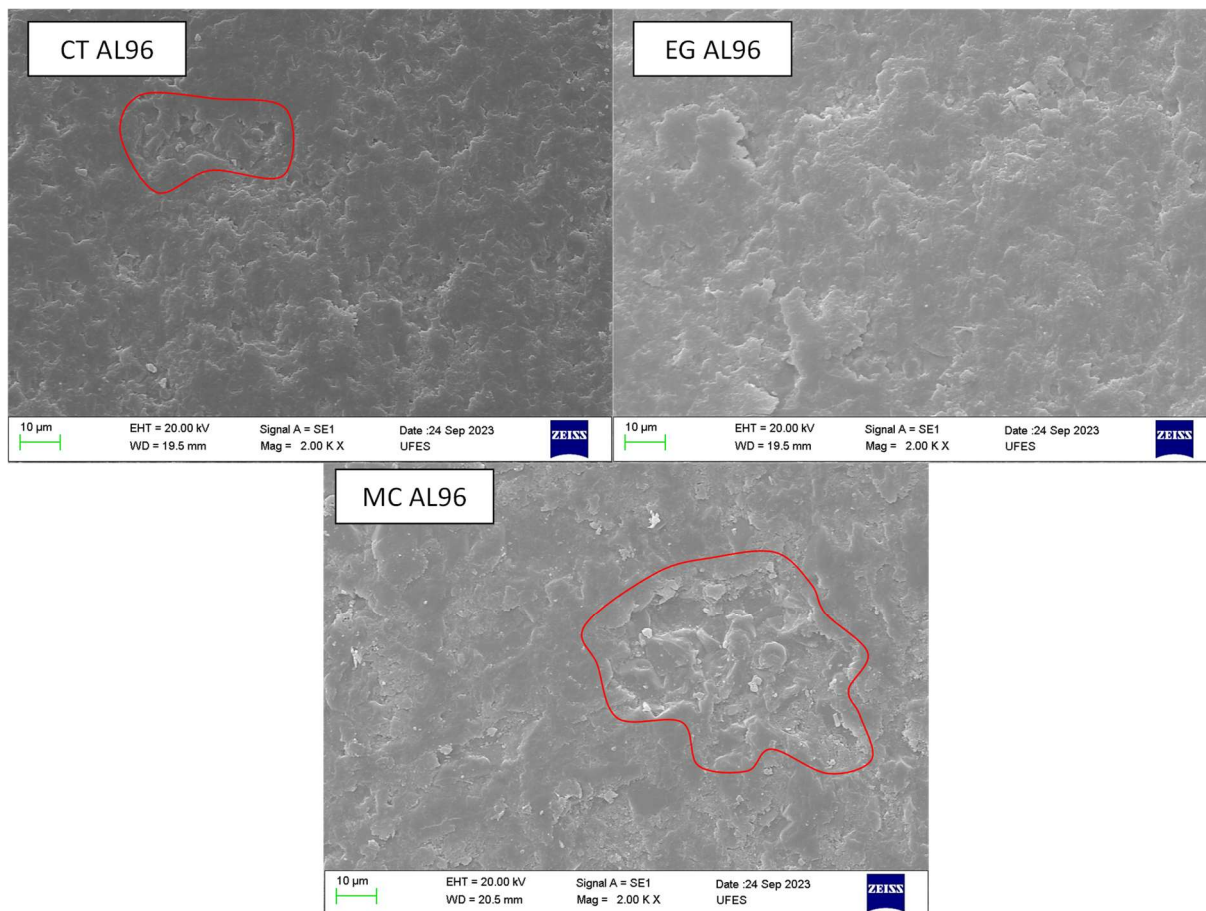


Figura 85. Destacamento de material de maneira frágil resultando em regiões facetadas na CT_AL96 e MC_AL96 e ausências dessas regiões mais frágeis na EG_AL96. Fonte: autor.

Conforme exibido na Tabela 17, nas aluminas com 96% de pureza a resistência ao desgaste apresentou correlação direta com a tenacidade e correlação inversa com a dureza. As aluminas, juntamente com o carbetto de boro, estão entre os materiais mais frágeis analisados no ensaio tipo roda de borracha horizontal, sendo assim, a tenacidade à fratura via indentação (K_C) ganha maior relevância em termos de resistência ao desgaste. O elevado desgaste da MC_AL96, o maior entre todos os cerâmicos estudados, pode ser explicado pelo maior tamanho de grão em relação as outras aluminas e a menor tenacidade, da mesma forma que a MC_AL99.

Tabela 17. Volume perdido e propriedades relevantes das Aluminas com 96% de pureza. Fonte: autor.

Material	CT_AL96	EG_AL96	MC_AL96
V (mm ³)	3,63 ± 0,07	3,77 ± 0,82	11,40 ± 0,96
H (GPa)	11,89	13,76	14,74
K _c (MPa.m ^{1/2})	4,73 ± 0,16	4,02 ± 0,38	2,72 ± 0,57
ρ (g/cm ³)	3,731 ± 0,003	3,692 ± 0,004	3,706 ± 0,001

Finalmente, o carbetto de boro, material com tenacidade à fratura via indentação igual a $3,57 \pm 0,78$ e dureza entre 2515 e 4907 HV, a depender da carga aplicada, sendo 3698 HV (36,27 GPa) a dureza estimada para as cargas atuantes nos abrasivos durante o ensaio roda de borracha, apresentou predominância de mecanismos frágeis como podemos observar nas imagens da Figura 86 em vários aumentos. Nesta figura, na imagem no canto superior esquerdo, podemos perceber riscos transversais na amostra de carbetto de boro, essa direção não tem relação com os riscos das partículas, que tinham direção perpendicular, mas sim com a rugosidade da amostra como recebida. Apesar do comportamento mais frágil observado entre todos os materiais estudados no ensaio roda de borracha, ainda sim foi possível notar a presença de mecanismos puramente dúcteis, como mostra a Figura 87.

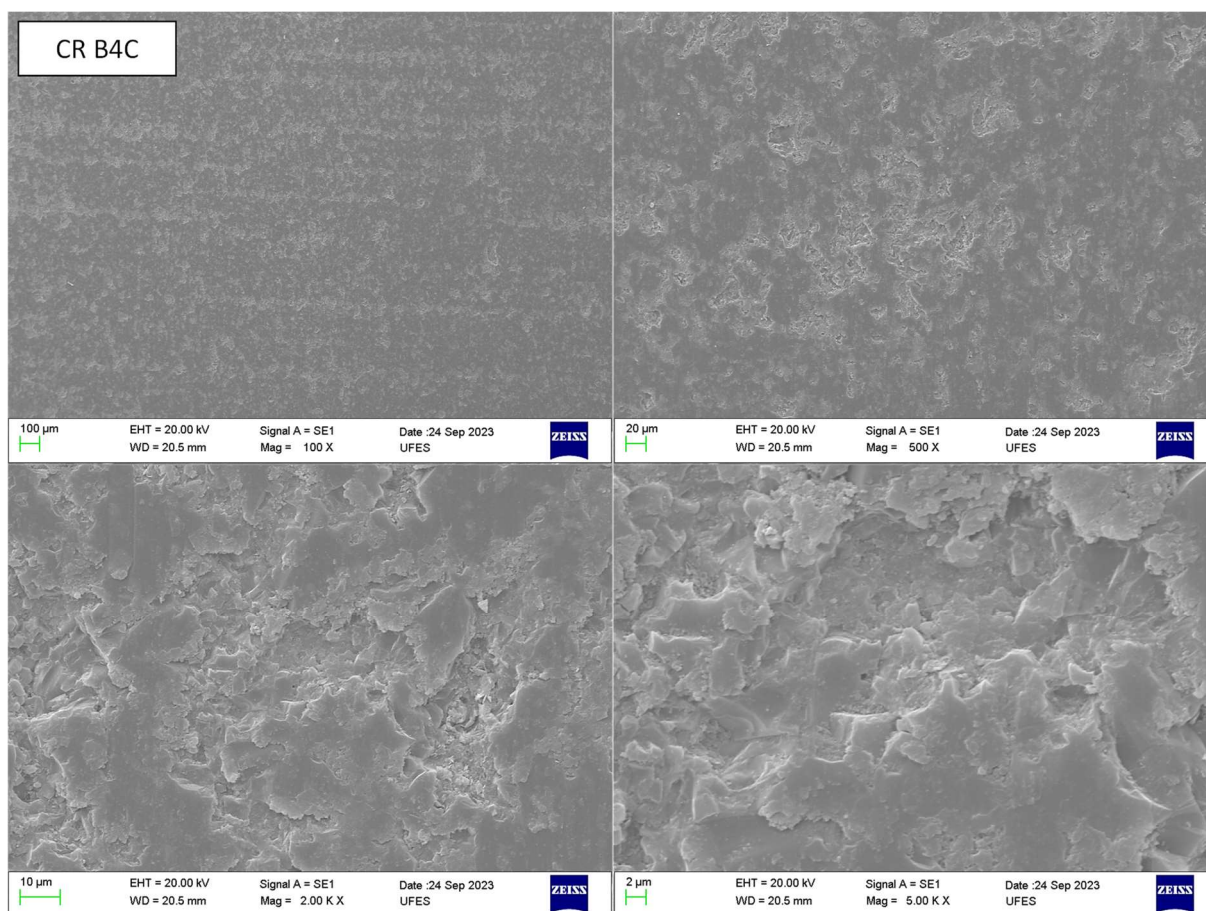


Figura 86. MEV – Dominância de mecanismos frágeis no carbeto de boro em várias magnificações.
Fonte: autor.

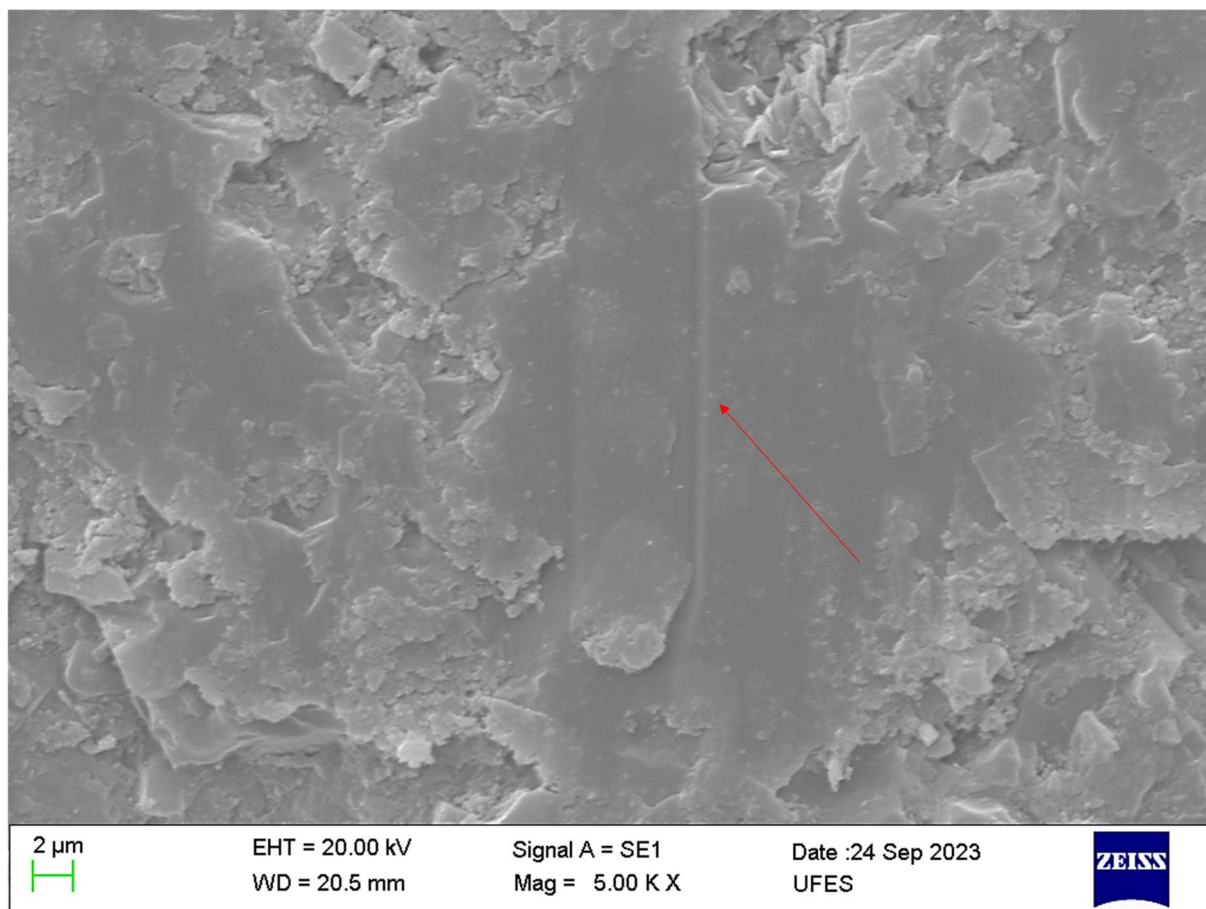


Figura 87. MEV - Sulcamento plástico no carbeto de boro (CR_B₄C) apesar de comportamento majoritariamente frágil. Fonte: autor.

Os gráficos da Figura 88 apresentam as correlações entre a tenacidade via indentação, a dureza, a quantidade $H^{1/2}K_C^{3/4}$ e o inverso do volume perdido (resistência ao desgaste) dos materiais puramente cerâmicos estudados. Não foram levados em consideração os dados das duas amostras de metal duro, pois estas compreendem o grupo dos compósitos. A priori, os valores do R^2 foram baixos para todas as correlações, porém, foi observado que, nas três correlações, a MC_ZTA se distanciou dos outros materiais. Essa ZTA, apesar de dureza e tenacidade medianas, ostentou a maior resistência ao desgaste entre os cerâmicos (menor volume perdido), sendo assim, as correlações abaixo exibidas não foram capazes de explicar seu comportamento. Posto isto, novos gráficos foram construídos, agora, sem considerar os dados referentes à MC_ZTA (Figura 89). Com essa modificação, os valores das correlações aumentaram consideravelmente, chegando a valores de R^2 de 0,49 para a tenacidade à fratura via indentação e a 0,45 para a quantidade $H^{1/2}K_C^{3/4}$. Já a dureza, não apresentou correlação alguma com a resistência ao desgaste, alcançando valores de R^2 de apenas 0,04. Apesar de não serem materiais puramente cerâmicos, tendo

adição de 7 e 10% de cobalto, o acréscimo dos metais duros nas correlações resultou em melhores valores de R^2 para K_C ($R^2 = 0,66$) e $H^{1/2}K_C^{3/4}$ ($R^2 = 0,71$) (Figura 90).

A correlação razoável dos ensaios roda de borracha (três corpos) com a quantidade $H^{1/2}K_C^{3/4}$ oriunda de ensaios em materiais cerâmicos a dois corpos pode ser explicada pela dominância do mecanismo de microriscamento frágil, um mecanismo de desgaste comum em ensaios a dois corpos, na maioria das amostras ensaiadas no roda de borracha horizontal.

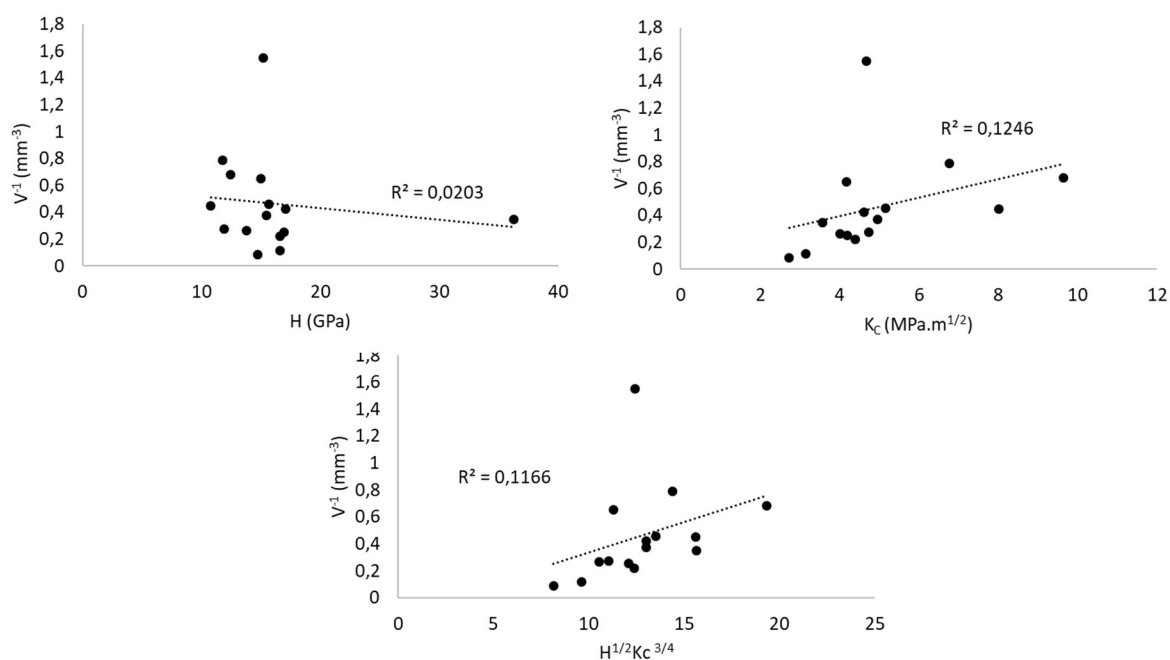


Figura 88. Correlação entre a tenacidade, a dureza, a quantidade $H^{1/2}K_C^{3/4}$ e o inverso do volume perdido dos materiais puramente cerâmicos. Fonte: autor.

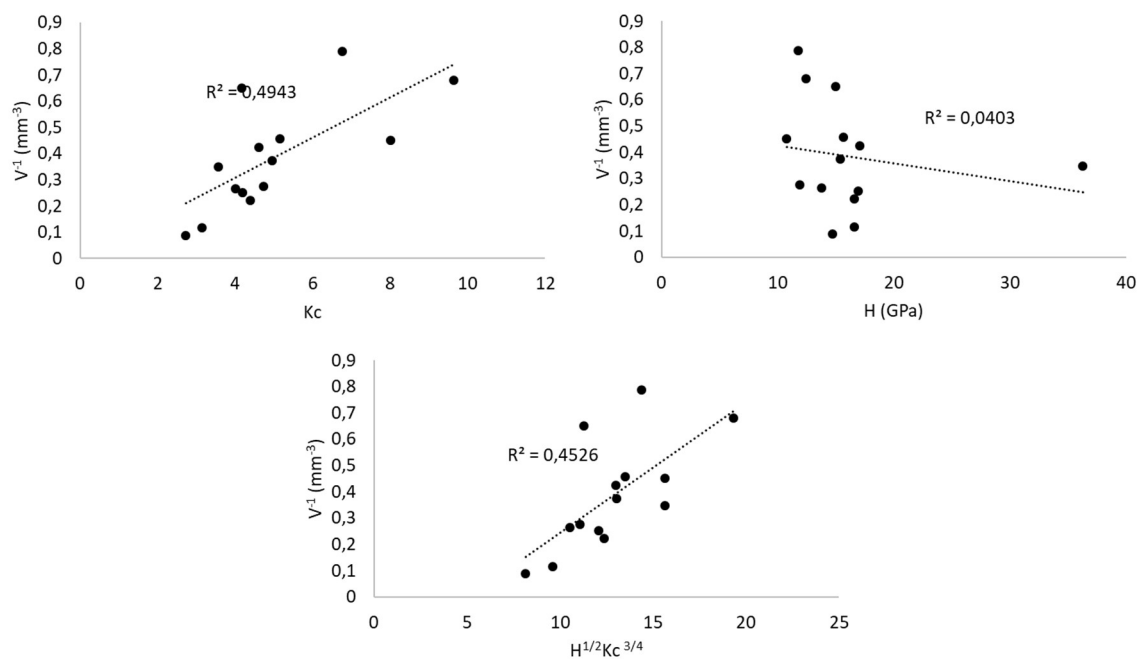


Figura 89. Correlação entre a tenacidade, a dureza, a quantidade $H^{1/2}Kc^{3/4}$ e o inverso do volume perdido dos materiais puramente cerâmicos, exceto a MC_ZTA. Fonte: autor.

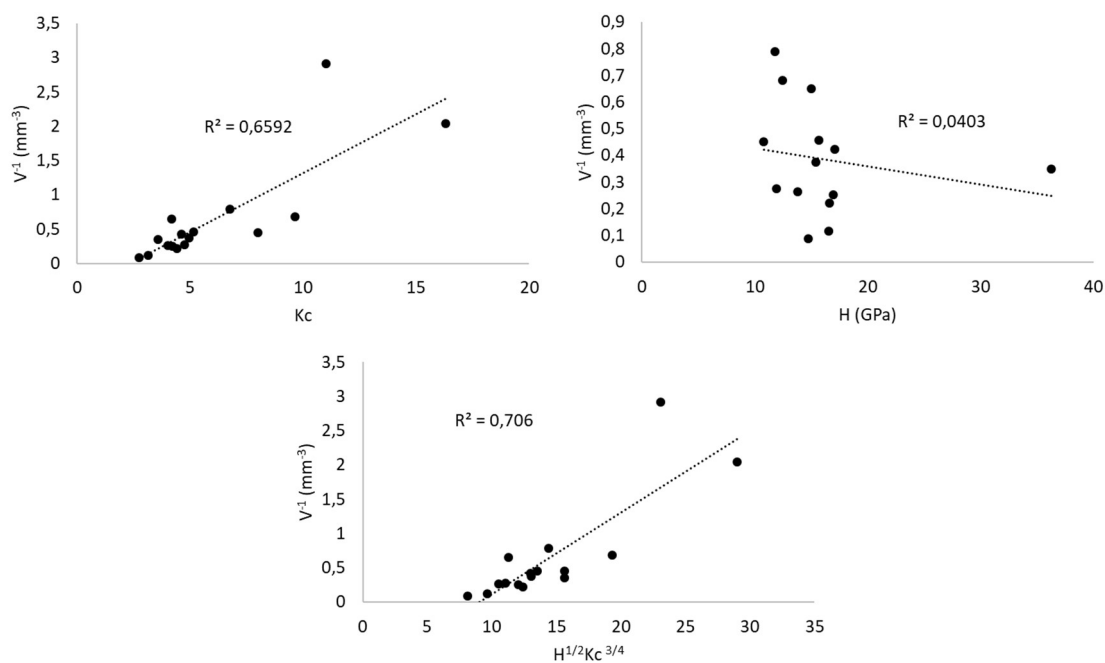


Figura 90. Correlação entre a tenacidade, a dureza, a quantidade $H^{1/2}Kc^{3/4}$ e o inverso do volume perdido dos materiais estudados, inclusive os metais duros. Fonte: autor.

Contudo, os resultados dessas correlações foram totalmente opostos aos das correlações com dados da literatura feitas no capítulo 3 (ver Figura 11) onde houvera

certa correlação entre dureza e desgaste, porém muito dependente de dois pontos no gráfico, e nenhuma correlação entre tenacidade e a quantidade $H^{1/2}K_C^{3/4}$. Essa divergência talvez possa ser explicada pelas diferentes configurações dos ensaios, pois, enquanto os dados da literatura são originários de ensaios tipo roda de borracha vertical e, em sua maioria utilizando o procedimento A da norma ASTM G65, este trabalho fez uso do procedimento B, além de utilizar o abrasômetro na configuração horizontal.

5.4 CONSIDERAÇÕES GERAIS E CORRELAÇÕES ENTRE ENSAIOS

A Tabela 18 apresenta o resumo dos valores do coeficiente R^2 para as correlações entre o volume total perdido (ou do dano) dos respectivos ensaios e as propriedades, H , K_C e $H^{1/2}K_C^{3/4}$.

Podemos observar, com auxílio dessa tabela, que em todos os ensaios as correlações com a dureza foram muito baixas, apresentando um R^2 médio de 0,02 quando todos os materiais eram levados em consideração e 0,016, quando somente os cerâmicos puros. Em todos os ensaios, com exceção de alguns materiais, foi notada a presença de destacamento de material via mecanismos frágeis. Esse destacamento, muitas das vezes, se estendeu muito além da largura do risco, ou das regiões das indentações, assim, também, supõe-se que tenha acontecido nos ensaios roda de borracha. Sendo assim, o volume originado por esses destacamentos, supera em muitas vezes o volume das indentações e sulcamentos plásticos, que são controlados pela dureza do material, fazendo com que esta tenha sua importância reduzida quando analisamos o aspecto geral (volume total) do desgaste. Essa mesma hipótese explica os maiores valores de R^2 para a tenacidade (K_C).

O maior coeficiente de correlação ($R^2 = 0,73$) foi obtido entre o volume total dos ensaios de riscamento com indentador Vickers em materiais cerâmicos e a tenacidade à fratura via indentação (K_C). O indentador Vickers, como já explanado anteriormente, além de sua altíssima dureza, é um indentador afiado e com maior ângulo de ataque, em relação ao Rockwell, levando a mecanismos de desgaste mais severos. Em materiais frágeis, como os cerâmicos puros, esse mecanismo severo principal é o trincamento lateral. Uma das maneiras de conter esse tipo de trincamento, assim como qualquer trincamento, é uma alta tenacidade à fratura (aqui, estimada através

da tenacidade à fratura via indentação). Logo, quanto maior o valor da tenacidade, em teoria, menor o dano e o volume perdido de material.

Independente do conjunto de materiais escolhido (somente cerâmicos ou todos os materiais), o indentador Rockwell apresentou baixas correlações com a tenacidade. Esse indentador, ao contrário do Vickers, não é um indentador afiado, temo raio de ponta de 200 μm , o que leva a mecanismos menos severos e presença de plasticidade mesmos em materiais frágeis e cargas elevadas como mostram a Figura 58 e a Figura 61 para a titânia e para a MC_AL99, respectivamente.

Tabela 18. Resumo das correlações entre o inverso do volume perdido ou do dano total e as propriedades H , K_C e $H^{1/2}K_C^{3/4}$. Fonte: autor.

	R^2					
	Todos os materiais*			Somente cerâmicos puros*		
	H	K_C	$H^{1/2}K_C^{3/4}$	H	K_C	$H^{1/2}K_C^{3/4}$
Múltiplas Indentações	0,01	0,47	0,54	0,01	0,39	0,30
Riscamento Rockwell	0,03	0,05	0,11	0,01	0,29	0,33
Riscamento Vickers	0,00	0,41	0,42	0,01	0,73	0,54
Roda de borracha	0,04	0,66	0,71	0,04	0,49	0,45
R^2 médio	0,02	0,38	0,43	0,016	0,48	0,40

Nos gráficos da Figura 91 temos as correlações entre os resultados do ensaio roda de borracha horizontal e os ensaios de riscamento e múltiplas indentações apenas com os materiais puramente cerâmicos (ao adicionarmos os metais duros, as correlações não apresentaram alterações significantes). Como os resultados de carga por partícula do ensaio roda de borracha ficaram entre 0,49 e 0,74 N, os volumes perdidos dos ensaios Vickers e Rockwell utilizados nas correlações foram os das menores cargas (0,2 – 1,8 N e 2 – 33,7 N, respectivamente). Ao observarmos os resultados, o único ensaio que apresentou correlação razoável com o ensaio roda de borracha fora o ensaio de riscamento com indentador de diamante Vickers ($R^2 = 0,62$). Como foi apresentado na seção 5.3.2, a maioria dos materiais, quando avaliados no ensaio roda de borracha, apresentou o micromecanismo de riscamento, visível principalmente nos menores aumentos. Isso pode ser uma das razões que explicam essa correlação alta em relação aos outros ensaios.

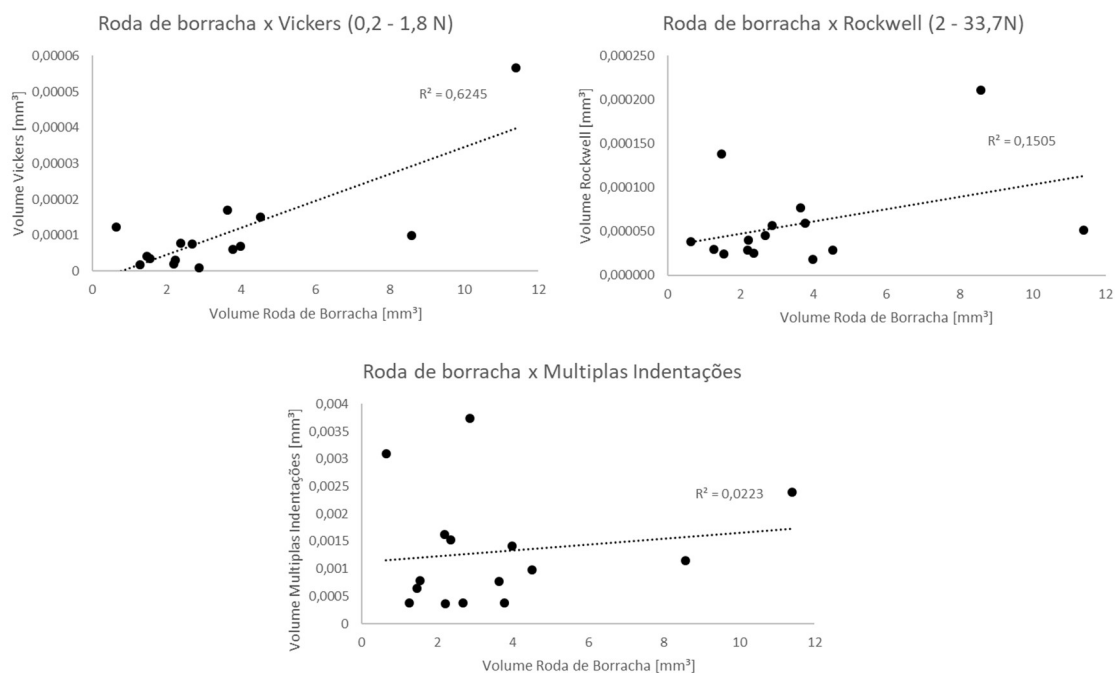


Figura 91. Correlações entre os resultados do ensaio roda de borracha horizontal e os ensaios de riscamento e múltiplas indentações apenas para materiais puramente cerâmicos. Fonte: autor.

6. CONCLUSÕES

A tenacidade à fratura via indentação se mostrou um método razoável para a classificação de cerâmicos, demonstrado pelos maiores valores de correlação apresentados nos ensaios de riscamento com indentador Vickers, que, teoricamente, é o ensaio mais severo, onde a tenacidade à fratura teria maior relevância.

O uso de dois modelos para estimar a dureza em carga específica (Meyer e PSR modificado) se mostrou eficaz, atingindo um R^2 médio de $0,84 \pm 0,16$.

Nos ensaios com indentador Rockwell foi possível perceber diferenças entre materiais similares que não foram perceptíveis nos outros ensaios.

Os materiais cerâmicos apresentaram melhor desempenho em situações de baixa severidade (baixas cargas e indentadores não afiados). O contrário aconteceu com os metais duros.

A amostra de ZTA do fabricante MC apresentou valores de volume perdido próximos aos dos metais duros no ensaio roda de borracha, seguido das zircônias e outras ZTA's, apresentando melhor desempenho entre os cerâmicos.

Considerando os resultados dos ensaios e a maior susceptibilidade à corrosão e custo dos metais duros, se torna plausível a substituição desse por materiais cerâmicos em situações onde o desgaste é abrasivo é menos severo.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Realizar o ensaio roda borracha em meios corrosivos e com abrasivos menos duros.

Realizar a ceramografia de todas as amostras, para calcular, e introduzir como parâmetro nas correlações, aspectos microestruturais como a porosidade e o tamanho de grão.

Realizar ensaios de difração de raios-X e análise química para melhor caracterizar as diferentes amostras estudadas.

Realizar ensaios de múltiplas indentações com metodologia diferente, no grau de superposição máximo (100%) e variar a quantidade de indentações.

Realizar ensaios de riscamento alternados em cargas próximas as cargas individuais por partícula calculadas no ensaio roda de borracha

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLIEGRO, R. A.; COFFIN, L. B.; TINKLEPAUGH, J. R. Pressure-sintered silicon carbide. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 39, n. 11, p. 386-389, 1956.

ASTM G171-03(2017), Standard Test Method for Scratch Hardness of Materials Using a Diamond Stylus, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org

ASTM G65-16e1, Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org

AXEN, N.; KAHLMAN, L.; HUTCHINGS, I. M. Correlations between tangential force and damage mechanisms in the scratch testing of ceramics. *Tribology international*, v. 30, n. 7, p. 467-474, 1997.

BORTOLETO, E. M. Influence of microstructure and WC particle size distribution on the wear resistance of WC/Co hardmetals based on Scratch Tests. *TriboBR*, Florianópolis, 2018.

CALLISTER JR, William D.; RETHWISCH, David G. *Callister's materials science and engineering*. John Wiley & Sons, 2020.

CARTER, C. Barry *et al.* *Ceramic materials: science and engineering*. New York: springer, 2007.

CETR-UMT & CETR- APEX. Multi-Specimen Test System – User Manual, 2009.

CHALLEN, J. M., & OXLEY, P. L. B. (1979). An explanation of the different regimes of friction and wear using asperity deformation models. *Wear*, 53(2), 229-243. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(79\)90080-2](https://doi.org/10.1016/0043-1648(79)90080-2).

CHEN, S. Y., FARRIS, T. N., & CHANDRASEKAR, S. (1991). Sliding microindentation fracture of brittle materials. *Tribology transactions*, 34(2), 161-168. <https://doi.org/10.1080/10402009108982023>.

CHEN, Wei *et al.* Abrasion wear resistance of wall lining materials in bins and chutes during iron ore mining. *International Journal of Mineral Processing*, v. 167, p. 42-48, 2017.

CHERMANT, J. L., & Osterstock, F. (1976). Fracture toughness and fracture of WC-Co composites. *Journal of Materials Science*, 11(10), 1939-1951. DOI: 10.1007/BF00708272.

CHINN, Richard E. *Ceramography: preparation and analysis of ceramic microstructures*. ASM international, 2002.

CHIANG, S. S.; MARSHALL, D. B.; EVANS, A. G. The response of solids to elastic/plastic indentation. I. Stresses and residual stresses. *Journal of Applied Physics*, v. 53, n. 1, p. 298-311, 1982.

COOK, Robert F.; PHARR, George M. Direct observation and analysis of indentation cracking in glasses and ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 73, n. 4, p. 787-817, 1990.

DESA, O.; BAHADUR, S. Material removal and subsurface damage studies in dry and lubricated single-point scratch tests on alumina and silicon nitride. *Wear*, p. 1264-1275, 1999.

DEVORE, J. L. *Probabilidade e Estatística para Engenharia e Ciências*, 2014.

DOI, H. *et al.* A systematic investigation of elastic moduli of WC-Co alloys. *Metallurgical and Materials Transactions B*, v. 1, p. 1417-1425, 1970.

DOWSON, D. *History of tribology*, London: Longman, 1979. 677 pp.

DUTRA, L. A. *et al.* Correlation among abrasive wear tests. *Lubrication Science*, v. 25, n. 2, p. 173-184, 2013.

ENGQVIST, H., *Microstructural Aspects on Wear of Cemented Carbides*, at the Department of Materials Physics – Tribomaterials Group. 2000, Uppsala University: Uppsala. p. 39.

EVANS, A. G., & CHARLES, E. A. (1976). Fracture toughness determinations by indentation. *Journal of the American Ceramic society*, 59(7-8), 371-372. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1976.tb10991.x>.

EVANS, A. G.; WILSHAW, To R. Quasi-static solid particle damage in brittle solids — I. Observations analysis and implications. *Acta Metallurgica*, v. 24, n. 10, p. 939-956, 1976.

FREITAG, Douglas W. Opportunities for Advanced Ceramics to Meet the Needs of the Industries of the Future. Office of Industrial Technologies, 1998.

GANT, A. J., GEE, M. G., & MAY, A. T. (2004). The evaluation of tribo-corrosion synergy for WC–Co hardmetals in low stress abrasion. *Wear*, 256(5), 500-516. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2003.04.001>.

GATTI, Thiago. Abrasão-Corrosão do Metal Duro: Efeito da Dureza, Composição Química, Força Normal e pH do Meio. USP, 2023.

GEE, M. G. (2010). Model scratch corrosion studies for WC/Co hardmetals. *Wear*, 268(9-10), 1170-1177. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.01.004>.

GEE, M. G. *et al.* Abrasion and reciprocating wear of hardmetals and ceramics. 1999.

GEE, M., MINGARD, K., NUNN, J., ROEBUCK, B., & GANT, A. (2017). In situ scratch testing and abrasion simulation of WC/Co. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 62, 192-201. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2016.06.004>.

GHOSH, Dipankar *et al.* Dynamic indentation response of fine-grained boron carbide. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 90, n. 6, p. 1850-1857, 2007.

GOGOTSI, George A. Fracture toughness of ceramics and ceramic composites. *Ceramics international*, v. 29, n. 7, p. 777-784, 2003.

GONG, Jianghong; WU, Jianjun; GUAN, Zhenduo. Examination of the indentation size effect in low-load Vickers hardness testing of ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 19, n. 15, p. 2625-2631, 1999.

HOGAN, J. D. *et al.* Fracture and fragmentation of quartz and albite during single-diamond sliding-point contact. *Engineering Fracture Mechanics*, v. 96, p. 165-178, 2012.

HOKKIRIGAWA, K., e KATO, K. (1988). An experimental and theoretical investigation of ploughing, cutting and wedge formation during abrasive wear. *Tribology international*, 21(1), 51-57. [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(88\)90128-4](https://doi.org/10.1016/0301-679X(88)90128-4).

HOLMBERG, Kenneth; ERDEMIR, Ali. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. *Friction*, v. 5, p. 263-284, 2017.

HUTCHINGS, Ian; SHIPWAY, Philip. Tribology: friction and wear of engineering materials. Butterworth-Heinemann, 2017..

JACOBSON S., OLSSON M., HEDENQVIST P. and VINGSBO O. ASM Handbook, Vol. 18, Friction, Lubrication and Wear Technology, ASM International, USA, 1992, pp. 430-437.

JIANG, Danyu. Recent progresses in the phenomenological description for the indentation size effect in microhardness testing of brittle ceramics. Journal of Advanced Ceramics, v. 1, p. 38-49, 2012.

JIANG, Li *et al.* Effects of sintering temperature and particle size on the translucency of zirconium dioxide dental ceramic. Journal of Materials Science: Materials in Medicine, v. 22, p. 2429-2435, 2011.

KALIN, Mitjan; JAHANMIR, Said; DRAŽIČ, Goran. Wear mechanisms of glass-infiltrated alumina sliding against alumina in water. Journal of the American Ceramic Society, v. 88, n. 2, p. 346-352, 2005.

KATO, K. Tribology of Ceramics. Wear, v. 136, p. 117-133, 1990.

KUN LEE, Seung *et al.* Scratch damage in zirconia ceramics. Journal of the American Ceramic Society, v. 83, n. 6, p. 1428-1432, 2000.

LAWN, B. R., & SWAIN, M. V. (1975). Microfracture beneath point indentations in brittle solids. Journal of materials science, 10(1), 113-122. <https://doi.org/10.1007/BF00541038>.

LAWN, Brian; WILSHAW, Rodney. Indentation fracture: principles and applications. Journal of materials science, v. 10, n. 6, p. 1049-1081, 1975.

LIU, Kui *et al.* Effect of Co content on microstructure and mechanical properties of ultrafine grained WC-Co cemented carbide sintered by spark plasma sintering. Ceramics International, v. 44, n. 15, p. 18711-18718, 2018

MAGNOL, R. V. CARACTERIZAÇÃO Tribológica de Formação Ferrífera Bandada Através do Ensaio de Esclerometria Linear. 2018.

MAGNOL, R. V., MACEDO, M. Q., de MACÊDO, M. C. S., & SCANDIAN, C. (2019). Tribological characterization of jaspilite by linear scratch test. Wear, 426, 142-150. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.01.105>.

MAGNOL, R. V. *et al.* Liquid media effect on the abrasion response of WC/Co hardmetal with different cobalt percent. *Wear*, v. 477, p. 203815, 2021.

MARSHALL, D. B.; LAWN, Brian R. Residual stress effects in sharp contact cracking. *Journal of Materials Science*, v. 14, n. 8, p. 2001-2012, 1979.

MARTIN, Hans-Peter; FENG, Bing; MICHAELIS, Alexander. Pressureless sintering and properties of boron carbide composite materials. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, v. 17, n. 2, p. 407-412, 2020. GUBERNAT, Agnieszka *et al.* Hot pressing of tungsten carbide with and without sintering additives. *International Journal of refractory metals and hard materials*, v. 43, p. 193-199, 2014.

MATWEB: Material Property Data. MatWeb Material Property Data, 1996. Disponível em: <www.matweb.com>. Acesso em: 12 de abril de 2023.

MCCOLM, I. J. Ceramic hardness. Springer Science & Business Media, 2013.

MEDVEDOVSKI, Eugene. Alumina–mullite ceramics for structural applications. *Ceramics International*, v. 32, n. 4, p. 369-375, 2006.

MEDVEDOVSKI, Eugene. Wear-resistant engineering ceramics. *Wear*, v. 249, p. 821-828, 2001.

MULLIGAN, Anthony C.; PATTERSON, Mark CL. USE OF CERAMICS FOR GEOTHERMAL AND MINING APPLICATIONS.

PAIVA, Natália Ferreira. Implementação de melhorias em abrasômetro roda de borracha horizontal e sua validação experimental, 2021. Projeto de Graduação. Universidade Federal do Espírito Santo.

PONTON, C. B.; RAWLINGS, R. D. Vickers indentation fracture toughness test Part 1 Review of literature and formulation of standardised indentation toughness equations. *Materials Science and Technology*. v. 5, n. 9, p. 865-872, 1989

QUINN, George D.; BRADT, Richard C. On the Vickers indentation fracture toughness test. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 90, n. 3, p. 673-680, 2007.

RAVICHANDRAN, K. S. Fracture toughness of two phase WC-Co cermets. *Acta Metallurgica et Materialia*, v. 42, n. 1, p. 143-150, 1994.

RICE, Roy W.; SPERONELLO, Barry K. Effect of microstructure on rate of machining of ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 59, n. 7-8, p. 330-333, 1976.

RICE, Roy W.; FREIMAN, Stephen W.; BECHER, Paul F. Grain-size dependence of fracture energy in ceramics: I, experiment. *Journal of the American ceramic society*, v. 64, n. 6, p. 345-350, 1981.

RUBIO, J. *et al.* Characterization and sintering behaviour of submicrometre titanium dioxide spherical particles obtained by gas-phase hydrolysis of titanium tetrabutoxide. *Journal of Materials Science*, v. 32, p. 643-652, 1997.

SARE, I. R.; CONSTANTINE, A. G. Development of methodologies for the evaluation of wear-resistant materials for the mineral industry. *Wear*, v. 203, p. 671-678, 1997.

SERGEJEV, Fjodor; ANTONOV, Maksim. Comparative study on indentation fracture toughness measurements of cemented carbides. *Proc. Estonian Acad. Sci. Eng*, v. 12, n. 4, p. 388-398, 2006.

SHIN, Dong-Woo; ORR, K. K.; SCHUBERT, Helmut. Microstructure-Mechanical Property Relationships in Hot Isostatically Pressed Alumina and Zirconia-Toughened Alumina. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 73, n. 5, p. 1181-1188, 1990.

SILVA JUNIOR, W. M.; COSTA, H. L.; DE MELLO, J. D. B. Transitions in abrasive wear mechanisms: Effect of the superimposition of interactions. *Wear*, v. 271, n. 5-6, p. 977-986, 2011.

SILVA JUNIOR, Washington Martins da. *Simulação do desgaste abrasivo via interações múltiplas*, 2008.

SPERO, CDJRK et al. Review of test methods for abrasive wear in ore grinding. *Wear*, v. 146, n. 2, p. 389-408, 1991.

STEVENSON, A. N. J.; HUTCHINGS, I. M. Development of the dry sand/rubber wheel abrasion test. *Wear*, v. 195, n. 1-2, p. 232-240, 1996.

STREY, N. F.; SCANDIAN, C. Tribological transitions during sliding of zirconia against alumina and ZTA in water. *Wear*, v. 376, p. 343-351, 2017.

STREY, Nathan Fantecelle. *Tribologia de cerâmicos dissimilares no deslizamento em água*. UFES, 2015.

SWAIN, M. V. (1979). Microfracture about scratches in brittle solids. Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences, 366(1727), 575-597. <https://doi.org/10.1098/rspa.1979.0070>.

VARGAS-GONZALEZ, Lionel; SPEYER, Robert F.; CAMPBELL, James. Flexural strength, fracture toughness, and hardness of silicon carbide and boron carbide armor ceramics. International Journal of Applied Ceramic Technology, v. 7, n. 5, p. 643-651, 2010.

WANG, Xiaotong *et al.* Wear-resistant ultra-fine-grained ceramics. Acta materialia, v. 53, n. 2, p. 271-277, 2005.

YALAMAÇ, Emre; TRAPANI, Antonio; AKKURT, Sedat. Sintering and microstructural investigation of gamma–alpha alumina powders. Engineering Science and

ZHENG, Y. F., FARGAS, G., LAVIGNE, O., & LLANES, L. (2020). Indentation and scratch testing of a WC-6% wtCo cemented carbide: Corrosion effects on load-bearing capability and induced damage. Ceramics International, 46(11), 17591-17598. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.04.059>.

ZHENG, Y., FARGAS RIBAS, G., BESHARATLOO, H., ROA ROVIRA, J. J., LAVIGNE, O., & LLANES PITARCH, L. M. (2019). Small-scale assessment of corrosion-induced damage in hardmetals. In Proceedings book (pp. 1-6).

ZHU, Tianbin *et al.* Microstructure and mechanical properties of ZTA composites fabricated by oscillatory pressure sintering. Ceramics International, v. 44, n. 1, p. 505-510, 2018.

ZUM GAHR, K. H. (1981). Formation of wear debris by the abrasion of ductile metals. Wear, 74(2), 353-373. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(81\)90173-3](https://doi.org/10.1016/0043-1648(81)90173-3).

ZUM GAHR, K.-H. Microstructure and wear of materials. Elsevier, 1987.

ZUÑEGA, J. C. P., GEE, M. G., WOOD, R. J. K., & WALKER, J. (2012). Scratch testing of WC/Co hardmetals. Tribology international, 54, 77-86. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2012.02.027>.

APÊNDICE A – DADOS DE TENACIDADE À FRATURA VIA INDENTAÇÃO MEDIDOS

Tabela 19. Tenacidade à fratura via indentação, utilizando a equação de Evans e Charles (1976), dureza e respectiva carga normal ensaiada.

Material	Amostra	Carga (kgf)	Dureza (HV)	K _{IC} E&C
EG_AL96	1	0,6	1405,10	4,53
EG_AL96	2	0,6	1337,72	3,91
EG_AL96	3	0,6	1449,04	3,53
EG_AL96	4	0,6	1429,89	4,21
EG_AL96	5	0,6	1414,63	4,32
EG_AL96	6	0,6	1311,66	3,88
EG_AL96	7	0,6	1376,09	3,86
EG_AL96	8	0,6	1376,58	3,59
EG_AL96	9	0,6	1260,09	3,74
EG_AL96	10	0,6	1440,20	4,64
CT_AL96	1	0,6	1493,44	4,78
CT_AL96	2	0,6	1463,27	4,63
CT_AL96	3	0,6	1394,18	4,65
CT_AL96	4	0,6	1430,40	4,82
CT_AL96	5	0,6	1450,09	4,92
CT_AL96	6	0,6	1843,08	4,46
CT_AL96	7	0,6	1478,78	5,03
CT_AL96	8	0,6	1448,52	4,64
CT_AL96	9	0,6	1562,50	4,73
CT_AL96	10	0,6	1479,32	4,68
DC_AL99	1	0,6	1785,93	4,71
DC_AL99	2	0,6	2021,62	4,85
DC_AL99	3	0,6	1573,69	3,90
DC_AL99	4	0,6	1965,92	4,16
DC_AL99	5	0,6	2083,31	4,25
DC_AL99	6	0,6	1923,64	5,14
DC_AL99	7	0,6	1758,35	4,82
DC_AL99	8	0,6	1871,92	4,92
DC_AL99	9	0,6	1789,52	5,10
DC_AL99	10	0,6	1755,56	4,26
EG_AL99	1	0,6	1899,09	4,36
EG_AL99	2	0,6	1713,11	4,22
EG_AL99	3	0,6	1927,65	4,10
EG_AL99	4	0,6	1633,33	4,41
EG_AL99	5	0,6	1763,26	4,54

EG_AL99	6	0,6	1800,33	4,33
EG_AL99	7	0,6	1963,44	4,58
EG_AL99	8	0,6	1888,93	4,55
EG_AL99	9	0,6	1840,83	4,55
EG_AL99	10	0,6	1689,17	4,36
EG_ZTA	1	2	1406,82	4,44
EG_ZTA	2	2	1402,44	4,26
EG_ZTA	3	2	1327,08	5,20
EG_ZTA	4	2	1327,83	5,57
EG_ZTA	5	2	1360,85	4,98
EG_ZTA	6	2	1342,27	5,49
EG_ZTA	7	2	1248,19	4,40
EG_ZTA	8	2	1361,37	5,32
EG_ZTA	9	2	1411,76	5,45
EG_ZTA	10	2	1383,01	4,36
CT_ZTA	1	2	1373,71	6,33
CT_ZTA	2	2	1284,93	4,96
CT_ZTA	3	2	1333,88	4,87
CT_ZTA	4	2	1343,80	5,37
CT_ZTA	5	2	1358,50	4,75
CT_ZTA	6	2	1383,81	6,38
CT_ZTA	7	2	1371,60	4,49
CT_ZTA	8	2	1211,47	3,97
CT_ZTA	9	2	1324,07	5,04
CT_ZTA	10	2	1331,11	5,36
DC_ZTA	1	2	1678,95	3,87
DC_ZTA	2	2	1720,06	4,00
DC_ZTA	3	2	1666,52	4,30
DC_ZTA	4	2	1690,08	4,58
DC_ZTA	5	2	1632,09	3,72
DC_ZTA	6	2	1709,00	4,37
DC_ZTA	7	2	1648,30	3,46
DC_ZTA	8	2	1678,95	4,51
DC_ZTA	9	2	1739,48	4,25
DC_ZTA	10	2	1724,14	4,62
CT_AL99	1	0,7	1805,29	3,78
CT_AL99	2	0,7	1785,92	4,92
CT_AL99	3	0,7	1692,38	4,28
CT_AL99	4	0,7	1710,24	4,34
CT_AL99	5	0,7	1698,51	3,58
CT_AL99	6	0,7	1841,50	4,27
CT_AL99	7	0,7	1911,40	4,14
CT_AL99	8	0,7	1786,58	3,46

CT_AL99	9	0,7	1734,08	4,90
CT_AL99	10	0,7	1752,61	4,39
DC_ZTA	1	2	1690,80	3,90
DC_ZTA	2	2	1646,91	3,69
DC_ZTA	3	2	1726,74	4,47
DC_ZTA	4	2	1624,24	4,05
DC_ZTA	5	2	1678,59	5,35
DC_ZTA	6	2	1715,25	4,43
DC_ZTA	7	2	1655,62	4,14
DC_ZTA	8	2	1746,66	4,19
DC_ZTA	9	2	1786,37	4,85
DC_ZTA	10	2	1717,47	3,50
DC_ZrO2	1	5	1212,14	8,74
DC_ZrO2	2	5	1205,11	7,61
DC_ZrO2	3	5	1205,11	7,76
DC_ZrO2	4	5	1250,16	8,18
DC_ZrO2	5	5	1226,26	7,47
DC_ZrO2	6	5	1209,93	8,64
DC_ZrO2	7	5	1225,14	7,70
DC_ZrO2	8	5	1201,41	7,73
DC_ZrO2	9	5	1226,97	8,95
DC_ZrO2	10	5	1191,62	7,28
CT_ZrO2	1	5	1282,87	8,10
CT_ZrO2	2	5	1257,60	7,32
CT_ZrO2	3	5	1266,87	6,79
CT_ZrO2	4	5	1262,30	6,84
CT_ZrO2	5	5	1270,29	6,62
CT_ZrO2	6	5	1237,34	6,54
CT_ZrO2	7	5	1258,04	6,57
CT_ZrO2	8	5	1268,06	6,56
CT_ZrO2	9	5	1272,37	6,50
CT_ZrO2	10	5	1262,30	5,78
CR_B4C	1	0,65	2927,88	3,11
CR_B4C	2	0,5	2022,74	3,26
CR_B4C	3	0,5	2216,02	2,81
CR_B4C	4	0,5	2989,89	4,48
CR_B4C	5	0,5	2794,57	4,43
CR_B4C	6	0,5	2797,64	4,68
CR_B4C	7	0,5	2423,46	4,17
CR_B4C	8	0,5	2347,25	2,95
CR_B4C	9	0,5	2863,32	3,06
CR_B4C	10	0,5	2306,45	2,71
ZTA	2	10	1514,20	5,97

ZTA	3	10	1519,41	5,12
ZTA	4	10	1190,81	5,42
ZTA	5	10	1349,35	5,00
ZTA	6	10	1180,86	5,68
ZTA	7	10	1409,05	5,98
ZTA	8	10	1347,51	4,46
ZTA	9	10	1582,51	5,55
ZTA	10	10	1514,34	5,70
SiC	1	8	2520,11	3,10
SiC	2	8	2426,25	3,20
SiC	3	8	2584,38	3,20
SiC	4	8	2533,63	3,86
SiC	5	8	2645,12	3,38
SiC	6	8	2490,81	3,11
SiC	7	8	2480,83	2,98
SiC	8	8	2436,83	3,29
SiC	9	8	2521,43	3,47
SiC	10	8	2519,13	2,98
AL99	1	0,2	1915,43	3,57
AL99	2	0,2	1721,00	3,10
AL99	3	0,2	1811,15	2,44
AL99	4	0,2	1925,11	2,39
AL99	5	0,2	1856,27	3,43
AL99	6	0,2	1792,31	2,78
AL99	7	0,2	1700,09	2,94
AL99	8	0,2	1721,00	2,74
AL99	9	0,2	1802,32	3,22
AL99	10	0,2	1760,35	2,35
MC_ZrO2	1	4	1557,31	9,35
MC_ZrO2	2	4	1347,27	9,83
MC_ZrO2	3	4	1410,03	9,32
MC_ZrO2	4	4	1368,77	9,75
MC_ZrO2	5	4	1348,36	9,72
MC_ZrO2	6	4	1334,65	9,91
MC_ZrO2	7	4	1322,38	9,35
MC_ZrO2	8	4	1392,12	9,97
MC_ZrO2	9	4	1394,22	9,82
MC_ZrO2	10	4	1365,06	9,46
MC_AL99	1	0,3	1723,73	2,86
MC_AL99	2	0,3	1725,65	2,52
MC_AL99	3	0,3	1822,80	3,52
MC_AL99	4	0,3	1697,18	2,61
MC_AL99	5	0,3	1684,13	3,41

MC_AL99	6	0,3	1881,57	3,26
MC_AL99	7	0,3	1892,56	3,95
MC_AL99	8	0,3	1872,85	2,69
MC_AL99	9	0,3	1741,14	3,26
MC_AL99	10	0,3	1672,15	3,40
MC_ZTA	1	1	1674,31	5,26
MC_ZTA	2	1	1596,63	4,71
MC_ZTA	3	1	1565,70	4,86
MC_ZTA	4	1	1525,10	4,88
MC_ZTA	5	1	1607,93	4,28
MC_ZTA	6	1	1544,53	4,84
MC_ZTA	7	1	1451,35	4,23
MC_ZTA	8	1	1235,62	4,50
MC_ZTA	9	1	1522,92	4,50
MC_ZTA	10	1	1489,86	4,79
MC_AL96	1	0,2	1376,42	1,72
MC_AL96	2	0,2	1354,06	2,90
MC_AL96	3	0,2	1402,79	2,79
MC_AL96	4	0,2	1428,15	2,95
MC_AL96	5	0,2	1307,82	2,35
MC_AL96	6	0,2	1196,63	2,25
MC_AL96	7	0,2	1422,84	3,49
MC_AL96	8	0,2	1450,56	3,12
MC_AL96	9	0,2	1263,18	2,25
MC_AL96	10	0,2	1594,75	3,46
HI_WC7Co	1	4	1732,38	11,63
HI_WC7Co	2	4	1656,84	11,31
HI_WC7Co	3	4	1710,61	11,26
HI_WC7Co	4	4	1727,89	11,45
HI_WC7Co	5	4	1673,81	10,49
HI_WC7Co	6	4	1683,66	10,42
HI_WC7Co	7	4	1662,80	11,39
HI_WC7Co	8	4	1691,30	10,91
HI_WC7Co	9	4	1630,66	10,48
HI_WC7Co	10	4	1687,22	10,85
HI_WC10Co	1	31,25	1251,50	16,52
HI_WC10Co	2	31,25	1259,68	17,18
HI_WC10Co	3	31,25	1237,48	16,81
HI_WC10Co	4	31,25	1244,95	16,03
HI_WC10Co	5	31,25	1239,72	16,11
HI_WC10Co	6	31,25	1224,10	15,09
HI_WC10Co	7	31,25	1244,10	16,72
HI_WC10Co	8	31,25	1237,45	16,01

HI_WC10Co	9	31,25	1258,53	15,97
HI_WC10Co	10	31,25	1229,22	16,46
MC_TiO2	1	0,1	743,30	1,32
MC_TiO2	2	0,1	764,94	1,26
MC_TiO2	3	0,1	682,38	0,77
MC_TiO2	4	0,1	697,53	1,08
MC_TiO2	5	0,1	768,88	0,89
MC_TiO2	6	0,1	697,53	1,05
MC_TiO2	7	0,1	716,74	0,92
MC_TiO2	8	0,1	709,66	1,49
MC_TiO2	9	0,1	830,26	0,69
MC_TiO2	10	0,1	682,38	0,88

APÊNDICE B – DADOS DE DUREZA VICKERS MEDIDOS

Tabela 20. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra MC_ZTA. Fonte: Autor.

Material	Amostra	Carga [kgf]	Diagonal 1 [mm]	Diagonal 2 [mm]	Diagonal média [mm]	Dureza [HV]
MC_ZTA	1	0,025	0,00632	0,00608	0,0062	1206,03
MC_ZTA	2	0,025	0,00604	0,00608	0,00606	1262,40
MC_ZTA	3	0,025	0,0066	0,00651	0,006555	1078,94
MC_ZTA	4	0,025	0,00614	0,00621	0,006175	1215,82
MC_ZTA	5	0,025	0,0065	0,00635	0,006425	1123,04
MC_ZTA	6	0,025	0,00611	0,00615	0,00613	1233,73
MC_ZTA	7	0,025	0,00649	0,00643	0,00646	1110,90
MC_ZTA	8	0,025	0,00648	0,00649	0,006485	1102,36
MC_ZTA	9	0,025	0,00598	0,00602	0,006	1287,77
MC_ZTA	10	0,025	0,00621	0,00619	0,0062	1206,03
MC_ZTA	1	0,05	0,00789	0,00799	0,00794	1470,72
MC_ZTA	2	0,05	0,00783	0,0083	0,008065	1425,49
MC_ZTA	3	0,05	0,00708	0,00771	0,007395	1695,49
MC_ZTA	4	0,05	0,00796	0,00764	0,0078	1523,99
MC_ZTA	5	0,05	0,00804	0,00811	0,008075	1421,96
MC_ZTA	6	0,05	0,0071	0,00759	0,007345	1718,65
MC_ZTA	7	0,05	0,00823	0,00785	0,00804	1434,37
MC_ZTA	8	0,05	0,00795	0,00729	0,00762	1596,84
MC_ZTA	9	0,05	0,00779	0,00789	0,00784	1508,48

MC_ZTA	10	0,05	0,00801	0,00756	0,007785	1529,87
MC_ZTA	1	0,1	0,01011	0,01001	0,01006	1832,34
MC_ZTA	2	0,1	0,01085	0,01087	0,01086	1572,33
MC_ZTA	3	0,1	0,00998	0,01156	0,01077	1598,71
MC_ZTA	4	0,1	0,01045	0,01112	0,010785	1594,27
MC_ZTA	5	0,1	0,01027	0,0108	0,010535	1670,83
MC_ZTA	6	0,1	0,01226	0,0116	0,01193	1302,93
MC_ZTA	7	0,1	0,01013	0,01057	0,01035	1731,10
MC_ZTA	8	0,1	0,00983	0,01005	0,00994	1876,85
MC_ZTA	9	0,1	0,0108	0,00971	0,010255	1763,32
MC_ZTA	10	0,1	0,01046	0,01082	0,01064	1638,02
MC_ZTA	1	0,2	0,01478	0,01423	0,014505	1762,77
MC_ZTA	2	0,2	0,01525	0,01476	0,015005	1647,25
MC_ZTA	3	0,2	0,01481	0,01452	0,014665	1724,52
MC_ZTA	4	0,2	0,01426	0,01436	0,01431	1811,14
MC_ZTA	5	0,2	0,01441	0,01473	0,01457	1747,08
MC_ZTA	6	0,2	0,01517	0,01517	0,01517	1611,61
MC_ZTA	7	0,2	0,01543	0,01522	0,015325	1579,18
MC_ZTA	8	0,2	0,01506	0,01477	0,014915	1667,19
MC_ZTA	9	0,2	0,01456	0,01478	0,01467	1723,34
MC_ZTA	10	0,2	0,01721	0,0185	0,017855	1163,35
MC_ZTA	1	1	0,03441	0,03441	0,03441	1566,15
MC_ZTA	2	1	0,03462	0,03399	0,034305	1575,75
MC_ZTA	3	1	0,03394	0,03358	0,03376	1627,04
MC_ZTA	4	1	0,03481	0,03591	0,03536	1483,12
MC_ZTA	5	1	0,03444	0,03452	0,03448	1559,79
MC_ZTA	6	1	0,03516	0,0349	0,03503	1511,20
MC_ZTA	7	1	0,03519	0,03526	0,035225	1494,51
MC_ZTA	8	1	0,03498	0,03476	0,03487	1525,10
MC_ZTA	9	1	0,03501	0,03509	0,03505	1509,48
MC_ZTA	10	1	0,0348	0,03522	0,03501	1512,93

Tabela 21. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra EG_ZTA. Fonte: Autor.

Material	Amostra	Carga [kgf]	Diagonal 1 [mm]	Diagonal 2 [mm]	Diagonal média [mm]	Dureza [HV]
EG_ZTA	1	1	0,03594	0,0356	0,03577	1.449,32
EG_ZTA	2	1	0,03609	0,0367	0,036395	1.399,97
EG_ZTA	3	1	0,03507	0,03576	0,035415	1.478,53
EG_ZTA	4	1	0,03464	0,0352	0,03492	1.520,74
EG_ZTA	5	1	0,03476	0,03536	0,03506	1.508,62
EG_ZTA	6	1	0,03573	0,03548	0,035605	1.462,79

EG_ZTA	7	1	0,03466	0,03516	0,03491	1.521,61
EG_ZTA	8	1	0,035	0,03618	0,03559	1.464,02
EG_ZTA	9	1	0,03594	0,03538	0,03566	1.458,28
EG_ZTA	10	1	0,03658	0,03636	0,03647	1.394,22
EG_ZTA	1	0,2	0,0144	0,01567	0,015035	1.640,69
EG_ZTA	2	0,2	0,01723	0,01648	0,016855	1.305,50
EG_ZTA	3	0,2	0,01466	0,01544	0,01505	1.637,42
EG_ZTA	4	0,2	0,01654	0,01695	0,016745	1.322,71
EG_ZTA	5	0,2	0,0146	0,01507	0,014835	1.685,23
EG_ZTA	6	0,2	0,01741	0,01847	0,01794	1.152,36
EG_ZTA	7	0,2	0,01382	0,01455	0,014185	1.843,21
EG_ZTA	8	0,2	0,01469	0,01526	0,014975	1.653,86
EG_ZTA	9	0,2	0,01495	0,01523	0,01509	1.628,75
EG_ZTA	10	0,2	0,01488	0,01419	0,014535	1.755,51
EG_ZTA	1	0,025	0,00532	0,00533	0,005325	1.634,95
EG_ZTA	2	0,025	0,00607	0,00589	0,00598	1.296,41
EG_ZTA	3	0,025	0,00544	0,00553	0,005485	1.540,96
EG_ZTA	4	0,025	0,00548	0,005522	0,005501	1.532,00
EG_ZTA	5	0,025	0,00495	0,00546	0,005205	1.711,20
EG_ZTA	6	0,025	0,00465	0,00497	0,00481	2.003,79
EG_ZTA	7	0,025	0,0054	0,00554	0,00547	1.549,42
EG_ZTA	8	0,025	0,00521	0,00526	0,005235	1.691,65
EG_ZTA	9	0,025	0,00552	0,00539	0,005455	1.557,95
EG_ZTA	10	0,025	0,00487	0,00509	0,00498	1.869,32
EG_ZTA	1	0,05	0,00778	0,00821	0,007995	1.450,56
EG_ZTA	2	0,05	0,00751	0,00802	0,007765	1.537,77
EG_ZTA	3	0,05	0,0073	0,00754	0,00742	1.684,09
EG_ZTA	4	0,05	0,00747	0,00756	0,007515	1.641,78
EG_ZTA	5	0,05	0,00745	0,0077	0,007575	1.615,88
EG_ZTA	6	0,05	0,00765	0,00784	0,007745	1.545,72
EG_ZTA	7	0,05	0,00845	0,00825	0,00835	1.329,84
EG_ZTA	8	0,05	0,00756	0,00755	0,007555	1.624,44
EG_ZTA	9	0,05	0,00797	0,0076	0,007785	1.529,88
EG_ZTA	10	0,05	0,00726	0,00702	0,00714	1.818,77
EG_ZTA	1	0,1	0,01099	0,01082	0,010905	1.559,38
EG_ZTA	2	0,1	0,01115	0,01088	0,011015	1.528,39
EG_ZTA	3	0,1	0,01109	0,01083	0,01096	1.543,77
EG_ZTA	4	0,1	0,011	0,01116	0,01108	1.510,51
EG_ZTA	5	0,1	0,01129	0,01135	0,01132	1.447,14
EG_ZTA	6	0,1	0,01095	0,01113	0,01104	1.521,48
EG_ZTA	7	0,1	0,01058	0,0112	0,01089	1.563,68
EG_ZTA	8	0,1	0,01128	0,01079	0,011035	1.522,86
EG_ZTA	9	0,1	0,01139	0,01197	0,01168	1.359,31
EG_ZTA	10	0,1	0,0117	0,01127	0,011485	1.405,86

Tabela 22. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra CT_ZTA. Fonte: Autor.

Material	Amostra	Carga [kgf]	Diagonal 1 [mm]	Diagonal 2 [mm]	Diagonal média [mm]	Dureza [HV]
CT_ZTA	1	0,025	0,00585	0,00552	0,005685	1434,44
CT_ZTA	2	0,025	0,00493	0,00496	0,004945	1895,88
CT_ZTA	3	0,025	0,00525	0,00506	0,005155	1744,56
CT_ZTA	4	0,025	0,00432	0,0044	0,00436	2438,77
CT_ZTA	5	0,025	0,00489	0,00477	0,00483	1987,23
CT_ZTA	6	0,025	0,0049	0,00526	0,00508	1796,45
CT_ZTA	7	0,025	0,00484	0,00512	0,00498	1869,32
CT_ZTA	8	0,025	0,00498	0,00518	0,00508	1796,45
CT_ZTA	9	0,025	0,00505	0,00525	0,00515	1747,95
CT_ZTA	10	0,025	0,00561	0,00575	0,00568	1436,97
CT_ZTA	1	0,05	0,00887	0,0088	0,008835	1187,85
CT_ZTA	2	0,05	0,00742	0,00798	0,0077	1563,84
CT_ZTA	3	0,05	0,00726	0,00721	0,007235	1771,32
CT_ZTA	4	0,05	0,00715	0,00776	0,007455	1668,32
CT_ZTA	5	0,05	0,0077	0,00737	0,007535	1633,08
CT_ZTA	6	0,05	0,00763	0,00757	0,0076	1605,26
CT_ZTA	7	0,05	0,00767	0,00739	0,00753	1635,25
CT_ZTA	8	0,05	0,00743	0,00748	0,007455	1668,32
CT_ZTA	9	0,05	0,00819	0,0079	0,008045	1432,59
CT_ZTA	10	0,05	0,0825	0,00787	0,00806	1427,26
CT_ZTA	1	0,1	0,01134	0,01135	0,011345	1440,77
CT_ZTA	2	0,1	0,01134	0,01158	0,01146	1412,00
CT_ZTA	3	0,1	0,01115	0,0109	0,011025	1525,62
CT_ZTA	4	0,1	0,01085	0,01135	0,0111	1505,07
CT_ZTA	5	0,1	0,01114	0,01102	0,01108	1510,51
CT_ZTA	6	0,1	0,01145	0,01154	0,011495	1403,41
CT_ZTA	7	0,1	0,01056	0,01094	0,01075	1604,67
CT_ZTA	8	0,1	0,01098	0,00989	0,010435	1703,02
CT_ZTA	9	0,1	0,01083	0,01046	0,010645	1636,49
CT_ZTA	10	0,1	0,01133	0,01104	0,011185	1482,28
CT_ZTA	1	0,2	0,0162	0,01708	0,01664	1339,45
CT_ZTA	2	0,2	0,01561	0,01534	0,015475	1548,72
CT_ZTA	3	0,2	0,01474	0,01503	0,014885	1673,92
CT_ZTA	4	0,2	0,01404	0,01549	0,014765	1701,24
CT_ZTA	5	0,2	0,01674	0,01647	0,016605	1345,10
CT_ZTA	6	0,2	0,01489	0,01609	0,01549	1545,72
CT_ZTA	7	0,2	0,01622	0,01735	0,016785	1316,41

CT_ZTA	8	0,2	0,01579	0,01564	0,015715	1501,77
CT_ZTA	9	0,2	0,01493	0,01568	0,015305	1583,31
CT_ZTA	10	0,2	0,01528	0,01572	0,0155	1543,73
CT_ZTA	1	1	0,03629	0,03483	0,03556	1466,49
CT_ZTA	2	1	0,04219	0,0417	0,041945	1054,01
CT_ZTA	3	1	0,04119	0,04044	0,040815	1113,18
CT_ZTA	4	1	0,03829	0,03865	0,03847	1253,02
CT_ZTA	5	1	0,03866	0,03893	0,038795	1232,12
CT_ZTA	6	1	0,03646	0,03733	0,036895	1362,29
CT_ZTA	7	1	0,03763	0,03717	0,0374	1325,75
CT_ZTA	8	1	0,03744	0,03785	0,037645	1308,55
CT_ZTA	9	1	0,03628	0,03678	0,03653	1389,65
CT_ZTA	10	1	0,03618	0,03609	0,036135	1420,19

Tabela 23. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra DC_ZTA. Fonte: Autor.

Material	Amostra	Carga [kgf]	Diagonal 1 [mm]	Diagonal 2 [mm]	Diagonal média [mm]	Dureza [HV]
DC_ZTA	1	0,025	0,00691	0,0072	0,007055	931,43
DC_ZTA	2	0,025	0,00547	0,00567	0,00557	1494,28
DC_ZTA	3	0,025	0,0059	0,0059	0,0059	1331,80
DC_ZTA	4	0,025	0,00611	0,00614	0,006125	1235,75
DC_ZTA	5	0,025	0,00571	0,00586	0,005785	1385,28
DC_ZTA	6	0,025	0,00602	0,00611	0,006065	1260,32
DC_ZTA	7	0,025	0,00582	0,00611	0,005965	1302,93
DC_ZTA	8	0,025	0,00614	0,00638	0,00626	1183,03
DC_ZTA	9	0,025	0,00585	0,00566	0,005755	1399,76
DC_ZTA	10	0,025	0,0057	0,00605	0,005875	1343,16
DC_ZTA	1	0,05	0,00752	0,00725	0,007385	1700,09
DC_ZTA	2	0,05	0,00737	0,0072	0,007285	1747,09
DC_ZTA	3	0,05	0,00779	0,00773	0,00776	1539,75
DC_ZTA	4	0,05	0,0079	0,00798	0,00794	1470,73
DC_ZTA	5	0,05	0,00781	0,00759	0,0077	1563,84
DC_ZTA	6	0,05	0,00749	0,00751	0,0075	1648,36
DC_ZTA	7	0,05	0,00772	0,00785	0,007785	1529,88
DC_ZTA	8	0,05	0,00813	0,00772	0,007925	1476,30
DC_ZTA	9	0,05	0,00741	0,00759	0,0075	1648,36
DC_ZTA	10	0,05	0,0079	0,00774	0,00782	1516,21
DC_ZTA	1	0,1	0,01068	0,01041	0,010545	1667,67
DC_ZTA	2	0,1	0,01043	0,01018	0,010305	1746,25

DC_ZTA	3	0,1	0,01068	0,01111	0,010895	1562,24
DC_ZTA	4	0,1	0,01109	0,01076	0,010925	1553,68
DC_ZTA	5	0,1	0,01095	0,01056	0,010755	1603,18
DC_ZTA	6	0,1	0,0106	0,01053	0,010565	1661,36
DC_ZTA	7	0,1	0,01101	0,01056	0,010785	1594,27
DC_ZTA	8	0,1	0,01065	0,01068	0,010665	1630,35
DC_ZTA	9	0,1	0,01121	0,01082	0,011015	1528,39
DC_ZTA	10	0,1	0,01123	0,01077	0,011	1532,56
DC_ZTA	1	0,2	0,01484	0,01469	0,014765	1701,24
DC_ZTA	2	0,2	0,01474	0,01437	0,014555	1750,69
DC_ZTA	3	0,2	0,01462	0,01455	0,014585	1743,49
DC_ZTA	4	0,2	0,01365	0,01428	0,013965	1901,74
DC_ZTA	5	0,2	0,01415	0,01423	0,01419	1841,91
DC_ZTA	6	0,2	0,0141	0,01414	0,01412	1860,22
DC_ZTA	7	0,2	0,01405	0,01355	0,0138	1947,49
DC_ZTA	8	0,2	0,01417	0,01367	0,01392	1914,06
DC_ZTA	9	0,2	0,01415	0,01449	0,01432	1808,62
DC_ZTA	10	0,2	0,01403	0,01445	0,01424	1829,00
DC_ZTA	1	1	0,03161	0,03226	0,031935	1818,32
DC_ZTA	2	1	0,03211	0,03227	0,03219	1789,62
DC_ZTA	3	1	0,03265	0,03326	0,032955	1707,50
DC_ZTA	4	1	0,03207	0,03246	0,032265	1781,31
DC_ZTA	5	1	0,03105	0,03237	0,03171	1844,21
DC_ZTA	6	1	0,03279	0,03265	0,03272	1732,12
DC_ZTA	7	1	0,03188	0,03248	0,03218	1790,74
DC_ZTA	8	1	0,03215	0,03166	0,031905	1821,74
DC_ZTA	9	1	0,03161	0,03186	0,031735	1841,31
DC_ZTA	10	1	0,03223	0,03238	0,032305	1776,90

Tabela 24. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra CT_ZrO2. Fonte: Autor.

Material	Amostra	Carga [kgf]	Diagonal 1 [mm]	Diagonal 2 [mm]	Diagonal média [mm]	Dureza [HV]
CT_ZrO2	1	0,025	0,00663	0,00705	0,00684	990,90
CT_ZrO2	2	0,025	0,00644	0,00698	0,00671	1029,67
CT_ZrO2	3	0,025	0,00701	0,00656	0,006785	1007,03
CT_ZrO2	4	0,025	0,00698	0,00672	0,00685	988,012
CT_ZrO2	5	0,025	0,00679	0,00691	0,00685	988,012
CT_ZrO2	6	0,025	0,00626	0,0063	0,00628	1175,50
CT_ZrO2	7	0,025	0,00661	0,00667	0,00664	1051,49

CT_ZrO2	8	0,025	0,00638	0,00628	0,00633	1157,01
CT_ZrO2	9	0,025	0,00663	0,00657	0,0066	1064,28
CT_ZrO2	10	0,025	0,00663	0,00707	0,00685	988,01
CT_ZrO2	1	0,05	0,00859	0,00903	0,00881	1194,60
CT_ZrO2	2	0,05	0,00909	0,00912	0,009105	1118,44
CT_ZrO2	3	0,05	0,00878	0,00895	0,008865	1179,82
CT_ZrO2	4	0,05	0,00869	0,00856	0,008625	1246,39
CT_ZrO2	5	0,05	0,00882	0,00887	0,008845	1185,16
CT_ZrO2	6	0,05	0,00878	0,00899	0,008885	1174,51
CT_ZrO2	7	0,05	0,00868	0,00894	0,00881	1194,59
CT_ZrO2	8	0,05	0,00863	0,00907	0,00885	1183,82
CT_ZrO2	9	0,05	0,00862	0,0088	0,00871	1222,1
CT_ZrO2	10	0,05	0,00846	0,00911	0,008785	1201,41
CT_ZrO2	1	0,1	0,012	0,01204	0,01202	1283,49
CT_ZrO2	2	0,1	0,01208	0,01212	0,0121	1266,58
CT_ZrO2	3	0,1	0,01201	0,01215	0,01208	1270,77
CT_ZrO2	4	0,1	0,0121	0,01226	0,01218	1249,99
CT_ZrO2	5	0,1	0,01203	0,0127	0,012365	1212,87
CT_ZrO2	6	0,1	0,01202	0,0125	0,01226	1233,73
CT_ZrO2	7	0,1	0,01195	0,01228	0,012115	1263,44
CT_ZrO2	8	0,1	0,01217	0,01224	0,012205	1244,88
CT_ZrO2	9	0,1	0,01222	0,01208	0,01215	1256,17
CT_ZrO2	10	0,1	0,01203	0,01236	0,012195	1246,92
CT_ZrO2	1	0,2	0,01699	0,01769	0,01734	1233,48
CT_ZrO2	2	0,2	0,01741	0,01746	0,017435	1220,08
CT_ZrO2	3	0,2	0,01703	0,01719	0,01711	1266,87
CT_ZrO2	4	0,2	0,01685	0,01694	0,016895	1299,32
CT_ZrO2	5	0,2	0,01682	0,01722	0,01702	1280,31
CT_ZrO2	6	0,2	0,01724	0,01747	0,017355	1231,35
CT_ZrO2	7	0,2	0,01723	0,01738	0,017305	1238,48
CT_ZrO2	8	0,2	0,01674	0,01733	0,017035	1278,05
CT_ZrO2	9	0,2	0,01753	0,01751	0,01752	1208,27
CT_ZrO2	10	0,2	0,01815	0,0182	0,018175	1122,75
CT_ZrO2	1	1	0,03822	0,03809	0,038155	1273,79
CT_ZrO2	2	1	0,03741	0,03776	0,037585	1312,72
CT_ZrO2	3	1	0,03698	0,03827	0,037625	1309,93
CT_ZrO2	4	1	0,03731	0,03841	0,03786	1293,72
CT_ZrO2	5	1	0,03792	0,03803	0,037975	1285,90
CT_ZrO2	6	1	0,03783	0,03826	0,038045	1281,17
CT_ZrO2	7	1	0,03779	0,03772	0,037755	1300,93
CT_ZrO2	8	1	0,0378	0,03796	0,03788	1292,35
CT_ZrO2	9	1	0,03755	0,03765	0,0376	1311,67
CT_ZrO2	10	1	0,03766	0,03866	0,03816	1273,46

Tabela 25. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra MC_ZrO2. Fonte: Autor.

Material	Amostra	Carga [kgf]	Diagonal 1 [mm]	Diagonal 2 [mm]	Diagonal média [mm]	Dureza [HV]
MC_ZrO2	1	0,025	0,00657	0,00607	0,00632	1160,67
MC_ZrO2	2	0,025	0,0063	0,00599	0,006145	1227,72
MC_ZrO2	3	0,025	0,00583	0,00601	0,00592	1322,82
MC_ZrO2	4	0,025	0,0056	0,00578	0,00569	1431,92
MC_ZrO2	5	0,025	0,00568	0,00546	0,00557	1494,28
MC_ZrO2	6	0,025	0,0062	0,00576	0,00598	1296,41
MC_ZrO2	7	0,025	0,00665	0,00632	0,006485	1102,36
MC_ZrO2	9	0,025	0,00587	0,00627	0,00607	1258,25
MC_ZrO2	1	0,05	0,00871	0,00853	0,00862	1247,84
MC_ZrO2	2	0,05	0,00867	0,00867	0,00867	1233,49
MC_ZrO2	3	0,05	0,00812	0,00818	0,00815	1395,91
MC_ZrO2	4	0,05	0,00869	0,00864	0,008665	1234,91
MC_ZrO2	5	0,05	0,00865	0,00881	0,00873	1216,59
MC_ZrO2	6	0,05	0,00878	0,00851	0,008645	1240,63
MC_ZrO2	7	0,05	0,00809	0,00809	0,00809	1416,70
MC_ZrO2	8	0,05	0,00829	0,00892	0,008605	1252,19
MC_ZrO2	9	0,05	0,00857	0,00826	0,008415	1309,38
MC_ZrO2	10	0,05	0,00875	0,00847	0,00861	1250,74
MC_ZrO2	1	0,1	0,01237	0,01195	0,01216	1254,11
MC_ZrO2	2	0,1	0,01231	0,01245	0,01238	1209,94
MC_ZrO2	3	0,1	0,01232	0,01247	0,012395	1207,01
MC_ZrO2	4	0,1	0,01195	0,01207	0,01201	1285,63
MC_ZrO2	5	0,1	0,01207	0,01187	0,01197	1294,24
MC_ZrO2	6	0,1	0,01297	0,01218	0,012575	1172,70
MC_ZrO2	7	0,1	0,01237	0,01196	0,012165	1253,08
MC_ZrO2	8	0,1	0,01184	0,01162	0,01173	1347,74
MC_ZrO2	9	0,1	0,01117	0,0118	0,011485	1405,86
MC_ZrO2	10	0,1	0,01164	0,01154	0,01159	1380,50
MC_ZrO2	1	0,2	0,0166	0,01603	0,016315	1393,35
MC_ZrO2	2	0,2	0,01677	0,01728	0,017025	1279,56
MC_ZrO2	3	0,2	0,01734	0,01734	0,01734	1233,49
MC_ZrO2	4	0,2	0,01689	0,01716	0,017025	1279,56
MC_ZrO2	5	0,2	0,01793	0,01766	0,017795	1171,22
MC_ZrO2	6	0,2	0,01783	0,01772	0,017775	1173,85
MC_ZrO2	7	0,2	0,01758	0,0173	0,01744	1219,38
MC_ZrO2	8	0,2	0,01728	0,01799	0,017635	1192,57
MC_ZrO2	9	0,2	0,01802	0,01785	0,017935	1153,00
MC_ZrO2	10	0,2	0,01763	0,0178	0,017715	1181,82
MC_ZrO2	1	1	0,03774	0,03797	0,037855	1294,07
MC_ZrO2	2	1	0,03902	0,03807	0,038545	1248,15

MC_ZrO2	3	1	0,03946	0,03983	0,039645	1179,85
MC_ZrO2	4	1	0,03805	0,03836	0,038205	1270,47
MC_ZrO2	5	1	0,03844	0,03778	0,03811	1276,81
MC_ZrO2	6	1	0,03813	0,03813	0,03813	1275,47
MC_ZrO2	7	1	0,03796	0,03835	0,038155	1273,80
MC_ZrO2	8	1	0,03775	0,03775	0,03775	1301,28
MC_ZrO2	9	1	0,03812	0,03815	0,038135	1275,13
MC_ZrO2	10	1	0,03801	0,03779	0,0379	1291,00

Tabela 26. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra DC_ZrO2. Fonte: Autor.

Material	Amostra	Carga [kgf]	Diagonal 1 [mm]	Diagonal 2 [mm]	Diagonal média [mm]	Dureza [HV]
DC_ZrO2	1	0,025	0,00616	0,00617	0,006165	1219,77
DC_ZrO2	2	0,025	0,00625	0,0062	0,006225	1196,37
DC_ZrO2	1	0,025	0,00731	0,00754	0,007425	840,91
DC_ZrO2	2	0,025	0,00724	0,00704	0,00714	909,38
DC_ZrO2	3	0,025	0,00731	0,00712	0,007215	890,58
DC_ZrO2	4	0,025	0,00746	0,00736	0,00741	844,32
DC_ZrO2	5	0,025	0,00723	0,0073	0,007265	878,36
DC_ZrO2	6	0,025	0,00737	0,0075	0,007435	838,65
DC_ZrO2	7	0,025	0,00727	0,00718	0,007225	888,11
DC_ZrO2	8	0,025	0,00704	0,00724	0,00714	909,38
DC_ZrO2	1	0,05	0,00928	0,0093	0,00929	1074,34
DC_ZrO2	2	0,05	0,01018	0,01038	0,01028	877,38
DC_ZrO2	3	0,05	0,00921	0,00936	0,009285	1075,50
DC_ZrO2	4	0,05	0,00938	0,00962	0,0095	1027,37
DC_ZrO2	5	0,05	0,00946	0,00939	0,009425	1043,78
DC_ZrO2	6	0,05	0,00952	0,00988	0,0097	985,44
DC_ZrO2	7	0,05	0,00961	0,00938	0,009495	1028,45
DC_ZrO2	8	0,05	0,00994	0,00969	0,009815	962,48
DC_ZrO2	9	0,05	0,00976	0,00925	0,009505	1026,29
DC_ZrO2	10	0,05	0,00966	0,00975	0,009705	984,42
DC_ZrO2	1	0,1	0,013	0,01268	0,01284	1124,79
DC_ZrO2	2	0,1	0,01217	0,01243	0,0123	1225,73
DC_ZrO2	3	0,1	0,01236	0,01286	0,01261	1166,20

DC_ZrO2	4	0,1	0,01292	0,01193	0,012425	1201,19
DC_ZrO2	5	0,1	0,01257	0,01203	0,0123	1225,73
DC_ZrO2	6	0,1	0,0129	0,01275	0,012825	1127,43
DC_ZrO2	7	0,1	0,01266	0,0125	0,01258	1171,77
DC_ZrO2	8	0,1	0,0123	0,01238	0,01234	1217,79
DC_ZrO2	9	0,1	0,01258	0,01215	0,012365	1212,87
DC_ZrO2	10	0,1	0,01217	0,01258	0,012375	1210,91
DC_ZrO2	1	0,2	0,01802	0,01749	0,017755	1176,50
DC_ZrO2	2	0,2	0,01692	0,01639	0,016655	1337,04
DC_ZrO2	3	0,2	0,01684	0,01705	0,016945	1291,67
DC_ZrO2	4	0,2	0,01683	0,01634	0,016585	1348,35
DC_ZrO2	5	0,2	0,01663	0,0166	0,016615	1343,48
DC_ZrO2	6	0,2	0,01649	0,01679	0,01664	1339,45
DC_ZrO2	7	0,2	0,01665	0,01772	0,017185	1255,84
DC_ZrO2	8	0,2	0,01709	0,0171	0,017095	1269,10
DC_ZrO2	9	0,2	0,01667	0,01681	0,01674	1323,50
DC_ZrO2	10	0,2	0,01711	0,01719	0,01715	1260,97
DC_ZrO2	1	1	0,0371	0,03849	0,037795	1298,18
DC_ZrO2	2	1	0,03915	0,03903	0,03909	1213,59
DC_ZrO2	3	1	0,03845	0,03845	0,03845	1254,33
DC_ZrO2	4	1	0,03908	0,03937	0,039225	1205,25
DC_ZrO2	5	1	0,03924	0,03888	0,03906	1215,46
DC_ZrO2	6	1	0,0388	0,03816	0,03848	1252,37
DC_ZrO2	7	1	0,03855	0,03869	0,03862	1243,31
DC_ZrO2	8	1	0,03824	0,03844	0,03834	1261,53
DC_ZrO2	9	1	0,0375	0,03829	0,037895	1291,34
DC_ZrO2	10	1	0,03913	0,03837	0,03875	1234,98

Tabela 27. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra EG_AL99. Fonte: Autor.

Material	Amostra	Carga [kgf]	Diagonal 1 [mm]	Diagonal 2 [mm]	Diagonal média [mm]	Dureza [HV]
EG_AL99	1	0,025	0,00542	0,00537	0,005395	1592,80
EG_AL99	2	0,025	0,00618	0,00592	0,00605	1266,58
EG_AL99	3	0,025	0,00618	0,00624	0,00621	1202,15
EG_AL99	4	0,025	0,00581	0,00596	0,005885	1338,60
EG_AL99	5	0,025	0,00591	0,0059	0,005905	1329,55
EG_AL99	6	0,025	0,00591	0,00567	0,00579	1382,89
EG_AL99	7	0,025	0,00602	0,00582	0,00592	1322,82
EG_AL99	8	0,025	0,00546	0,00572	0,00559	1483,61
EG_AL99	9	0,025	0,00598	0,00588	0,00593	1318,36
EG_AL99	10	0,025	0,00592	0,00583	0,005875	1343,16

EG_AL99	1	0,05	0,0086	0,00804	0,00832	1339,45
EG_AL99	2	0,05	0,00749	0,0076	0,007545	1628,75
EG_AL99	3	0,05	0,00789	0,00757	0,00773	1551,72
EG_AL99	4	0,05	0,00774	0,00811	0,007925	1476,30
EG_AL99	5	0,05	0,008	0,00802	0,00801	1445,13
EG_AL99	6	0,05	0,00831	0,00767	0,00799	1452,38
EG_AL99	7	0,05	0,00738	0,00752	0,00745	1670,56
EG_AL99	8	0,05	0,00772	0,00806	0,00789	1489,43
EG_AL99	9	0,05	0,00804	0,0081	0,00807	1423,73
EG_AL99	10	0,05	0,00785	0,00781	0,00783	1512,34
EG_AL99	1	0,1	0,01073	0,01062	0,010675	1627,30
EG_AL99	2	0,1	0,01048	0,00964	0,01006	1832,35
EG_AL99	3	0,1	0,01076	0,01033	0,010545	1667,67
EG_AL99	4	0,1	0,01039	0,01021	0,0103	1747,95
EG_AL99	5	0,1	0,01022	0,01035	0,010285	1753,05
EG_AL99	6	0,1	0,01043	0,01033	0,01038	1721,11
EG_AL99	7	0,1	0,0108	0,01063	0,010715	1615,17
EG_AL99	8	0,1	0,01079	0,01082	0,010805	1588,38
EG_AL99	9	0,1	0,01019	0,01022	0,010205	1780,65
EG_AL99	10	0,1	0,01063	0,01017	0,0104	1714,50
EG_AL99	1	0,2	0,01327	0,01356	0,013415	2060,88
EG_AL99	2	0,2	0,01523	0,0145	0,014865	1678,43
EG_AL99	3	0,2	0,01455	0,0147	0,014625	1733,97
EG_AL99	4	0,2	0,01355	0,01357	0,01356	2017,04
EG_AL99	5	0,2	0,0143	0,01466	0,01448	1768,87
EG_AL99	6	0,2	0,01403	0,0136	0,013815	1943,26
EG_AL99	7	0,2	0,01423	0,01405	0,01414	1854,96
EG_AL99	8	0,2	0,01495	0,01437	0,01466	1725,70
EG_AL99	9	0,2	0,01358	0,01336	0,01347	2044,08
EG_AL99	10	0,2	0,01332	0,01315	0,013235	2117,32
EG_AL99	1	1	0,03213	0,03281	0,03247	1758,89
EG_AL99	2	1	0,03387	0,03335	0,03361	1641,60
EG_AL99	3	1	0,03304	0,03292	0,03298	1704,91
EG_AL99	4	1	0,03279	0,03207	0,03243	1763,23
EG_AL99	5	1	0,03247	0,03292	0,032695	1734,77
EG_AL99	6	1	0,03232	0,03273	0,032525	1752,95
EG_AL99	7	1	0,03419	0,03257	0,03338	1664,30
EG_AL99	8	1	0,03575	0,03362	0,034685	1541,42
EG_AL99	9	1	0,03327	0,03314	0,033205	1681,89
EG_AL99	10	1	0,03409	0,03214	0,033115	1691,04

Tabela 28. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra CT_AL99. Fonte: Autor.

Material	Amostra	Carga [kgf]	Diagonal 1 [mm]	Diagonal 2 [mm]	Diagonal média [mm]	Dureza [HV]
CT_AL99	1	0,025	0,00572	0,00569	0,005705	1424,40
CT_AL99	2	0,025	0,00572	0,00583	0,005775	1390,08
CT_AL99	3	0,025	0,00588	0,00602	0,00595	1309,51
CT_AL99	4	0,025	0,00596	0,00591	0,005935	1316,14
CT_AL99	5	0,025	0,00549	0,00585	0,00567	1442,04
CT_AL99	6	0,025	0,00618	0,00581	0,005995	1289,93
CT_AL99	7	0,025	0,00609	0,00586	0,005975	1298,58
CT_AL99	8	0,025	0,00607	0,00596	0,006015	1281,36
CT_AL99	9	0,025	0,00605	0,0061	0,006075	1256,18
CT_AL99	10	0,025	0,00626	0,00611	0,006185	1211,89
CT_AL99	1	0,05	0,00751	0,00734	0,007425	1681,82
CT_AL99	2	0,05	0,00701	0,0073	0,007155	1811,15
CT_AL99	3	0,05	0,00759	0,00767	0,00763	1592,66
CT_AL99	4	0,05	0,00753	0,00754	0,007535	1633,08
CT_AL99	5	0,05	0,0077	0,00743	0,007565	1620,15
CT_AL99	6	0,05	0,00748	0,00731	0,007395	1695,50
CT_AL99	7	0,05	0,008	0,00746	0,00773	1551,72
CT_AL99	8	0,05	0,00779	0,00773	0,00776	1539,75
CT_AL99	9	0,05	0,00734	0,0075	0,00742	1684,09
CT_AL99	10	0,05	0,00735	0,00715	0,00725	1764,00
CT_AL99	1	0,1	0,01024	0,01032	0,01028	1754,76
CT_AL99	2	0,1	0,00988	0,00985	0,009865	1905,50
CT_AL99	3	0,1	0,01017	0,01024	0,010205	1780,65
CT_AL99	4	0,1	0,01002	0,01066	0,01034	1734,45
CT_AL99	5	0,1	0,01054	0,01004	0,01029	1751,35
CT_AL99	6	0,1	0,01087	0,01069	0,01078	1595,75
CT_AL99	7	0,1	0,00967	0,0096	0,009635	1997,56
CT_AL99	8	0,1	0,0109	0,01009	0,010495	1683,60
CT_AL99	9	0,1	0,00983	0,01043	0,01013	1807,11
CT_AL99	10	0,1	0,01013	0,0109	0,010515	1677,20
CT_AL99	1	0,2	0,01407	0,01391	0,01399	1894,95
CT_AL99	2	0,2	0,01408	0,01379	0,013935	1909,94
CT_AL99	3	0,2	0,01402	0,01401	0,014015	1888,20
CT_AL99	4	0,2	0,01372	0,01363	0,013675	1983,26
CT_AL99	5	0,2	0,01388	0,014	0,01394	1908,57
CT_AL99	6	0,2	0,01396	0,01388	0,01392	1914,06
CT_AL99	7	0,2	0,01382	0,01348	0,01365	1990,53
CT_AL99	8	0,2	0,01415	0,01405	0,0141	1865,50
CT_AL99	9	0,2	0,01393	0,01394	0,013935	1909,94
CT_AL99	10	0,2	0,0138	0,01401	0,013905	1918,19

CT_AL99	1	1	0,03161	0,0315	0,031555	1862,37
CT_AL99	2	1	0,03274	0,03199	0,032365	1770,32
CT_AL99	3	1	0,03237	0,0329	0,032635	1741,15
CT_AL99	4	1	0,0327	0,03202	0,03236	1770,87
CT_AL99	5	1	0,03222	0,03209	0,032155	1793,52
CT_AL99	6	1	0,03136	0,03104	0,0312	1905,00
CT_AL99	7	1	0,03152	0,03051	0,031015	1927,79
CT_AL99	8	1	0,03196	0,03231	0,032135	1795,75
CT_AL99	9	1	0,03111	0,03131	0,03121	1903,78
CT_AL99	10	1	0,03191	0,03229	0,0321	1799,67

Tabela 29. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra DC_AL99. Fonte: Autor.

Material	Amostra	Carga [kgf]	Diagonal 1 [mm]	Diagonal 2 [mm]	Diagonal média [mm]	Dureza [HV]
DC_AL99	1	0,025	0,00586	0,00607	0,005965	1302,93
DC_AL99	2	0,025	0,00613	0,00617	0,00615	1225,73
DC_AL99	3	0,025	0,00581	0,00582	0,005815	1371,02
DC_AL99	4	0,025	0,0057	0,00575	0,005725	1414,47
DC_AL99	5	0,025	0,00562	0,00591	0,005765	1394,91
DC_AL99	6	0,025	0,00567	0,0058	0,005735	1409,54
DC_AL99	7	0,025	0,00586	0,00589	0,005875	1343,16
DC_AL99	8	0,025	0,00565	0,00568	0,005665	1444,59
DC_AL99	9	0,025	0,00606	0,00574	0,0059	1331,80
DC_AL99	10	0,025	0,00582	0,00608	0,00595	1309,51
DC_AL99	1	0,05	0,0068	0,0074	0,0071	1839,32
DC_AL99	2	0,05	0,00727	0,0074	0,007335	1723,35
DC_AL99	3	0,05	0,00765	0,00715	0,0074	1693,21
DC_AL99	4	0,05	0,00759	0,0075	0,007545	1628,75
DC_AL99	5	0,05	0,00746	0,00754	0,0075	1648,36
DC_AL99	6	0,05	0,00743	0,00729	0,00736	1711,66
DC_AL99	7	0,05	0,00761	0,00751	0,00756	1622,30
DC_AL99	8	0,05	0,00741	0,0076	0,007505	1646,16
DC_AL99	9	0,05	0,00713	0,00716	0,007145	1816,22
DC_AL99	10	0,05	0,00741	0,00768	0,007545	1628,75
DC_AL99	1	0,1	0,0106	0,01063	0,010615	1645,75

DC_AL99	2	0,1	0,01033	0,00984	0,010085	1823,27
DC_AL99	3	0,1	0,01026	0,01019	0,010225	1773,69
DC_AL99	4	0,1	0,01047	0,01065	0,01056	1662,94
DC_AL99	5	0,1	0,01055	0,0102	0,010375	1722,77
DC_AL99	6	0,1	0,01068	0,01048	0,01058	1656,66
DC_AL99	7	0,1	0,01054	0,01076	0,01065	1634,95
DC_AL99	8	0,1	0,00988	0,01018	0,01003	1843,32
DC_AL99	9	0,1	0,0106	0,01079	0,010695	1621,22
DC_AL99	10	0,1	0,01027	0,01025	0,01026	1761,61
DC_AL99	1	0,2	0,01337	0,01387	0,01362	1999,31
DC_AL99	2	0,2	0,01361	0,01379	0,0137	1976,02
DC_AL99	3	0,2	0,01311	0,01404	0,013575	2012,58
DC_AL99	4	0,2	0,01388	0,01405	0,013965	1901,74
DC_AL99	5	0,2	0,01393	0,01389	0,01391	1916,81
DC_AL99	6	0,2	0,01409	0,01394	0,014015	1888,20
DC_AL99	7	0,2	0,01451	0,01357	0,01404	1881,48
DC_AL99	8	0,2	0,01362	0,01352	0,01357	2014,07
DC_AL99	9	0,2	0,01427	0,01419	0,01423	1831,57
DC_AL99	10	0,2	0,01404	0,0141	0,01407	1873,46
DC_AL99	1	1	0,0326	0,03296	0,03278	1725,78
DC_AL99	2	1	0,03355	0,03278	0,033165	1685,95
DC_AL99	3	1	0,0327	0,03246	0,03258	1747,03
DC_AL99	4	1	0,03216	0,03287	0,032515	1754,03
DC_AL99	5	1	0,03208	0,03212	0,0321	1799,67
DC_AL99	6	1	0,03335	0,03344	0,033395	1662,80
DC_AL99	7	1	0,03222	0,03187	0,032045	1805,85
DC_AL99	8	1	0,03279	0,03281	0,0328	1723,68
DC_AL99	9	1	0,03246	0,0331	0,03278	1725,78
DC_AL99	10	1	0,03244	0,03308	0,03276	1727,89

Tabela 30. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra MC_AL99. Fonte: Autor.

Material	Amostra	Carga [kgf]	Diagonal 1 [mm]	Diagonal 2 [mm]	Diagonal média [mm]	Dureza [HV]
MC_AL99	1	0,025	0,00572	0,00528	0,0055	1532,56
MC_AL99	2	0,025	0,0048	0,0048	0,0048	2012,15
MC_AL99	3	0,025	0,00496	0,00509	0,005025	1835,99
MC_AL99	4	0,025	0,00517	0,0052	0,005185	1724,43
MC_AL99	5	0,025	0,0054	0,0052	0,0053	1650,41
MC_AL99	6	0,025	0,00506	0,00525	0,005155	1744,56
MC_AL99	7	0,025	0,00568	0,0052	0,00544	1566,55
MC_AL99	8	0,025	0,0061	0,0061	0,0061	1245,90

MC_AL99	9	0,025	0,0049	0,0052	0,00505	1817,86
MC_AL99	10	0,025	0,0052	0,00528	0,00524	1688,42
MC_AL99	1	0,05	0,0076	0,0077	0,00765	1584,35
MC_AL99	2	0,05	0,0066	0,0071	0,00685	1976,02
MC_AL99	3	0,05	0,00757	0,00779	0,00768	1571,99
MC_AL99	4	0,05	0,00795	0,00819	0,00807	1423,73
MC_AL99	5	0,05	0,00696	0,00703	0,006995	1894,95
MC_AL99	6	0,05	0,00737	0,00726	0,007315	1732,79
MC_AL99	7	0,05	0,00722	0,00758	0,0074	1693,21
MC_AL99	8	0,05	0,00712	0,00741	0,007265	1756,72
MC_AL99	9	0,05	0,00692	0,00746	0,00719	1793,56
MC_AL99	10	0,05	0,0074	0,00751	0,007455	1668,32
MC_AL99	1	0,1	0,01021	0,01107	0,01064	1638,02
MC_AL99	2	0,1	0,01027	0,01066	0,010465	1693,27
MC_AL99	3	0,1	0,01037	0,01106	0,010715	1615,17
MC_AL99	4	0,1	0,00996	0,01055	0,010255	1763,32
MC_AL99	5	0,1	0,01038	0,0102	0,01029	1751,35
MC_AL99	6	0,1	0,01123	0,01063	0,01093	1552,26
MC_AL99	7	0,1	0,01023	0,01044	0,010335	1736,13
MC_AL99	8	0,1	0,01054	0,01066	0,0106	1650,41
MC_AL99	9	0,1	0,01052	0,01098	0,01075	1604,67
MC_AL99	10	0,1	0,01045	0,01019	0,01032	1741,18
MC_AL99	1	0,2	0,01441	0,01468	0,014545	1753,10
MC_AL99	2	0,2	0,0157	0,0156	0,01565	1514,27
MC_AL99	3	0,2	0,01493	0,01492	0,014925	1664,96
MC_AL99	4	0,2	0,01551	0,0155	0,015505	1542,73
MC_AL99	5	0,2	0,01526	0,01539	0,015325	1579,18
MC_AL99	6	0,2	0,01603	0,01597	0,016	1448,75
MC_AL99	7	0,2	0,01526	0,01528	0,01527	1590,58
MC_AL99	8	0,2	0,01531	0,015139	0,015225	1600,10
MC_AL99	9	0,2	0,01439	0,01437	0,01438	1793,56
MC_AL99	10	0,2	0,01471	0,01797	0,01634	1389,09
MC_AL99	1	1	0,03629	0,0364	0,036345	1403,83
MC_AL99	2	1	0,03405	0,0345	0,034275	1578,51
MC_AL99	3	1	0,037	0,03665	0,036825	1367,47
MC_AL99	4	1	0,03538	0,03545	0,035415	1478,53
MC_AL99	5	1	0,03569	0,03518	0,035435	1476,86
MC_AL99	6	1	0,036	0,0358	0,0359	1438,85
MC_AL99	7	1	0,0359	0,03572	0,03581	1446,09
MC_AL99	8	1	0,03552	0,037	0,03626	1410,42
MC_AL99	9	1	0,0345	0,03401	0,034255	1580,36
MC_AL99	10	1	0,0358	0,0351	0,03545	1475,61

Tabela 31. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra CT_AL96. Fonte: Autor.

Material	Carga [kgf]	Diagonal 1 [mm]	Diagonal 2 [mm]	Diagonal média [mm]	Dureza [HV]
CT_AL96	0,025	0,00448	0,00468	0,00458	2210,10
CT_AL96	0,025	0,00497	0,00477	0,00487	1954,72
CT_AL96	0,025	0,00481	0,00489	0,00485	1970,88
CT_AL96	0,025	0,00497	0,00489	0,00493	1907,43
CT_AL96	0,025	0,00509	0,00489	0,00499	1861,84
CT_AL96	0,025	0,00503	0,00507	0,00505	1817,86
CT_AL96	0,025	0,00494	0,00487	0,004905	1926,93
CT_AL96	0,025	0,0049	0,00506	0,00498	1869,32
CT_AL96	0,025	0,00509	0,00474	0,004915	1919,09
CT_AL96	0,05	0,00762	0,00763	0,007625	1594,75
CT_AL96	0,05	0,00859	0,00872	0,008655	1237,77
CT_AL96	0,05	0,00757	0,00785	0,00771	1559,78
CT_AL96	0,05	0,00783	0,00773	0,00778	1531,84
CT_AL96	0,05	0,00766	0,00793	0,007795	1525,95
CT_AL96	0,05	0,00843	0,00815	0,00829	1349,16
CT_AL96	0,05	0,008	0,00807	0,008035	1436,16
CT_AL96	0,05	0,00751	0,00783	0,00767	1576,10
CT_AL96	0,05	0,00803	0,00778	0,007905	1483,78
CT_AL96	0,05	0,00804	0,00834	0,00819	1382,31
CT_AL96	0,1	0,01113	0,01208	0,011605	1376,93
CT_AL96	0,1	0,01193	0,01272	0,012325	1220,76
CT_AL96	0,1	0,01046	0,01132	0,01089	1563,68
CT_AL96	0,1	0,01105	0,01161	0,01133	1444,59
CT_AL96	0,1	0,01233	0,01242	0,012375	1210,91
CT_AL96	0,1	0,0109	0,01089	0,010895	1562,24
CT_AL96	0,1	0,01055	0,01027	0,01041	1711,20
CT_AL96	0,1	0,01169	0,01162	0,011655	1365,15
CT_AL96	0,1	0,0108	0,01067	0,010735	1609,16
CT_AL96	0,1	0,01066	0,01083	0,010745	1606,17
CT_AL96	0,2	0,01613	0,01594	0,016035	1442,43
CT_AL96	0,2	0,01589	0,01576	0,015825	1480,97
CT_AL96	0,2	0,01565	0,01499	0,01532	1580,21
CT_AL96	0,2	0,01564	0,01518	0,01541	1561,81
CT_AL96	0,2	0,01529	0,01547	0,01538	1567,91
CT_AL96	0,2	0,01564	0,01555	0,015595	1524,97
CT_AL96	0,2	0,01493	0,01518	0,015055	1636,33
CT_AL96	0,2	0,01589	0,01498	0,015435	1556,75
CT_AL96	0,2	0,01538	0,0147	0,01504	1639,60
CT_AL96	0,2	0,0152	0,01474	0,01497	1654,97
CT_AL96	1	0,03868	0,03961	0,039145	1210,18

CT_AL96	1	0,03621	0,03657	0,03639	1400,36
CT_AL96	1	0,03724	0,03718	0,03721	1339,32
CT_AL96	1	0,03706	0,03613	0,036595	1384,71
CT_AL96	1	0,03734	0,03627	0,036805	1368,96
CT_AL96	1	0,03753	0,03591	0,03672	1375,30
CT_AL96	1	0,0363	0,03726	0,03678	1370,82
CT_AL96	1	0,03572	0,03403	0,034875	1524,67
CT_AL96	1	0,03674	0,03678	0,03676	1372,31
CT_AL96	1	0,03518	0,03624	0,03571	1454,20

Tabela 32. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra EG_AL96. Fonte: Autor.

Material	Amostra	Carga [kgf]	Diagonal 1 [mm]	Diagonal 2 [mm]	Diagonal média [mm]	Dureza [HV]
EG_AL96	1	0,025	0,00439	0,00457	0,00448	2309,86926
EG_AL96	2	0,025	0,00531	0,0057	0,005505	1529,779302
EG_AL96	3	0,025	0,00524	0,00489	0,005065	1807,109745
EG_AL96	4	0,025	0,00561	0,00509	0,00535	1619,704778
EG_AL96	5	0,025	0,00516	0,00523	0,005195	1717,798913
EG_AL96	6	0,025	0,00492	0,00465	0,004785	2024,787929
EG_AL96	7	0,025	0,00503	0,00512	0,005075	1799,995147
EG_AL96	8	0,025	0,00541	0,00533	0,00537	1607,662405
EG_AL96	9	0,025	0,00517	0,00479	0,00498	1869,324688
EG_AL96	10	0,025	0,00481	0,00496	0,004885	1942,738251
EG_AL96	1	0,05	0,00763	0,00757	0,0076	1605,263158
EG_AL96	2	0,05	0,00843	0,00794	0,008185	1383,99989
EG_AL96	3	0,05	0,00823	0,00801	0,00812	1406,246208
EG_AL96	4	0,05	0,00796	0,00755	0,007755	1541,735309
EG_AL96	5	0,05	0,00763	0,00793	0,00778	1531,842903
EG_AL96	6	0,05	0,00754	0,00804	0,00779	1527,912583
EG_AL96	7	0,05	0,00801	0,00798	0,007995	1450,562637
EG_AL96	8	0,05	0,0073	0,00787	0,007585	1611,618532
EG_AL96	9	0,05	0,00814	0,00784	0,00799	1452,378677
EG_AL96	10	0,05	0,00801	0,00793	0,00797	1459,677051
EG_AL96	1	0,1	0,0106	0,01049	0,010545	1667,670515
EG_AL96	2	0,1	0,01145	0,01158	0,011515	1398,542067
EG_AL96	3	0,1	0,01115	0,01136	0,011255	1463,903402
EG_AL96	4	0,1	0,01281	0,01269	0,01275	1140,730488
EG_AL96	5	0,1	0,01135	0,01173	0,01154	1392,489089
EG_AL96	6	0,1	0,01204	0,0117	0,01187	1316,139674
EG_AL96	7	0,1	0,01085	0,01128	0,011065	1514,609171
EG_AL96	8	0,1	0,01162	0,01166	0,01164	1368,665935

EG_AL96	9	0,1	0,01187	0,01231	0,01209	1268,676271
EG_AL96	10	0,1	0,01148	0,01117	0,011325	1445,862511
EG_AL96	1	0,2	0,01791	0,01754	0,017725	1180,486233
EG_AL96	2	0,2	0,01703	0,01699	0,01701	1281,81334
EG_AL96	3	0,2	0,01639	0,01664	0,016515	1359,803824
EG_AL96	4	0,2	0,01585	0,01518	0,015515	1540,741762
EG_AL96	5	0,2	0,01536	0,01557	0,015465	1550,720634
EG_AL96	6	0,2	0,01638	0,01656	0,01647	1367,244597
EG_AL96	7	0,2	0,01808	0,01689	0,017485	1213,11547
EG_AL96	8	0,2	0,01887	0,01912	0,018995	1027,909355
EG_AL96	9	0,2	0,01631	0,0167	0,016505	1361,452071
EG_AL96	10	0,2	0,01683	0,01658	0,016705	1329,047352
EG_AL96	1	1	0,0381	0,03844	0,03827	1266,153892
EG_AL96	2	1	0,03814	0,03827	0,038205	1270,465893
EG_AL96	3	1	0,03843	0,03802	0,038225	1269,13678
EG_AL96	4	1	0,03776	0,03814	0,03795	1287,596709
EG_AL96	5	1	0,03713	0,03775	0,03744	1322,914384
EG_AL96	6	1	0,03774	0,03724	0,03749	1319,388024
EG_AL96	7	1	0,03812	0,0388	0,03846	1253,674692
EG_AL96	8	1	0,03794	0,03709	0,037515	1317,63013
EG_AL96	9	1	0,0386	0,03859	0,038595	1244,919668
EG_AL96	10	1	0,03701	0,03795	0,03748	1320,092167

Tabela 33. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra MC_AL96. Fonte: Autor.

Material	Amostra	Carga [kgf]	Diagonal 1 [mm]	Diagonal		Dureza [HV]
				Diagonal 2 [mm]	média [mm]	
MC_AL96	1	0,025	0,00809	0,00808	0,008085	709,2239268
MC_AL96	2	0,025	0,00541	0,0053	0,005355	1616,681531
MC_AL96	3	0,025	0,0043	0,0043	0,0043	2507,301244
MC_AL96	4	0,025	0,00871	0,00871	0,00871	611,0927303
MC_AL96	5	0,025	0,00597	0,00597	0,00597	1300,752787
MC_AL96	6	0,025	0,0058	0,0058	0,0058	1378,121284
MC_AL96	7	0,025	0,0057	0,0057	0,0057	1426,900585
MC_AL96	8	0,025	0,00468	0,00468	0,00468	2116,663014
MC_AL96	9	0,025	0,00651	0,00651	0,00651	1093,909642
MC_AL96	10	0,025	0,00587	0,00587	0,00587	1345,448952
MC_AL96	1	0,05	0,00723	0,00745	0,00734	1721,001715
MC_AL96	2	0,05	0,00828	0,00802	0,00815	1395,91253
MC_AL96	3	0,05	0,00768	0,0079	0,00779	1527,912583
MC_AL96	4	0,05	0,00709	0,00715	0,00712	1828,998864
MC_AL96	5	0,05	0,00817	0,00767	0,00792	1478,165493

MC_AL96	6	0,05	0,00691	0,00708	0,006995	1894,951004
MC_AL96	7	0,05	0,00729	0,00731	0,0073	1739,91368
MC_AL96	8	0,05	0,0081	0,00796	0,00803	1437,94519
MC_AL96	9	0,05	0,00759	0,00717	0,00738	1702,396428
MC_AL96	10	0,05	0,00732	0,00765	0,007485	1654,968811
MC_AL96	1	0,1	0,01144	0,01111	0,011275	1458,714559
MC_AL96	2	0,1	0,01212	0,01195	0,012035	1280,298479
MC_AL96	3	0,1	0,01094	0,01097	0,010955	1545,178494
MC_AL96	4	0,1	0,01177	0,01147	0,01162	1373,381404
MC_AL96	5	0,1	0,01151	0,01103	0,01127	1460,00918
MC_AL96	6	0,1	0,01051	0,01052	0,010515	1677,200042
MC_AL96	7	0,1	0,01151	0,01157	0,01154	1392,489089
MC_AL96	8	0,1	0,01141	0,011	0,011205	1476,997285
MC_AL96	9	0,1	0,01031	0,01051	0,01041	1711,204681
MC_AL96	10	0,1	0,01132	0,01117	0,011245	1466,508211
MC_AL96	1	0,2	0,01744	0,01782	0,01763	1193,24271
MC_AL96	2	0,2	0,01598	0,01614	0,01606	1437,94519
MC_AL96	3	0,2	0,01599	0,016	0,015995	1449,655893
MC_AL96	4	0,2	0,01719	0,01627	0,01673	1325,078271
MC_AL96	5	0,2	0,01623	0,0164	0,016315	1393,346908
MC_AL96	6	0,2	0,01577	0,01639	0,01608	1434,370436
MC_AL96	7	0,2	0,0158	0,01562	0,01571	1502,730303
MC_AL96	8	0,2	0,01627	0,01632	0,016295	1396,769312
MC_AL96	9	0,2	0,01647	0,01698	0,016725	1325,870663
MC_AL96	10	0,2	0,01517	0,01506	0,015115	1623,368487
MC_AL96	1	1	0,03979	0,0403	0,040045	1156,396644
MC_AL96	2	1	0,039	0,03806	0,03853	1249,123562
MC_AL96	3	1	0,03851	0,03828	0,038395	1257,923049
MC_AL96	4	1	0,03904	0,03879	0,038915	1224,529773
MC_AL96	5	1	0,04044	0,04097	0,040705	1119,200513
MC_AL96	6	1	0,0375	0,03687	0,037185	1341,120642
MC_AL96	7	1	0,03849	0,03851	0,0385	1251,071007
MC_AL96	8	1	0,04042	0,03926	0,03984	1168,32793
MC_AL96	9	1	0,03948	0,03878	0,03913	1211,11037
MC_AL96	10	1	0,03816	0,03886	0,03851	1250,421353

Tabela 34. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra CR_B4C. Fonte: Autor.

Material	Amostra	Carga [kgf]	Diagonal 1 [mm]	Diagonal 2 [mm]	Diagonal média [mm]	Dureza [HV]
CR_B4C	1	0,025	0,00307	0,00318	0,003125	4747,264
CR_B4C	2	0,025	0,00325	0,0031	0,003175	4598,921198

CR_B4C	3	0,025	0,00318	0,00328	0,00323	4443,635039
CR_B4C	4	0,025	0,00278	0,00274	0,00276	6085,906322
CR_B4C	5	0,025	0,00274	0,00296	0,00285	5707,602339
CR_B4C	6	0,025	0,00303	0,00305	0,00304	5016,447368
CR_B4C	7	0,025	0,00357	0,00373	0,00365	3479,82736
CR_B4C	8	0,025	0,0029	0,00297	0,002935	5381,795809
CR_B4C	9	0,025	0,00312	0,00316	0,00314	4702,016309
CR_B4C	10	0,025	0,00304	0,00311	0,003075	4902,901712
CR_B4C	1	0,05	0,00546	0,00532	0,00539	3191,507671
CR_B4C	2	0,05	0,00523	0,00542	0,005325	3269,897948
CR_B4C	3	0,05	0,00486	0,00534	0,0051	3564,782776
CR_B4C	4	0,05	0,00524	0,00539	0,005315	3282,213937
CR_B4C	5	0,05	0,00603	0,00548	0,005755	2799,514795
CR_B4C	6	0,05	0,00577	0,00581	0,00579	2765,77149
CR_B4C	7	0,05	0,00495	0,0048	0,004875	3901,433268
CR_B4C	8	0,05	0,00582	0,00585	0,005835	2723,276273
CR_B4C	9	0,05	0,00494	0,00509	0,005015	3686,646939
CR_B4C	10	0,05	0,00535	0,00583	0,00559	2967,220407
CR_B4C	1	0,1	0,00701	0,0073	0,007155	3622,297719
CR_B4C	2	0,1	0,00712	0,00759	0,007355	3427,978303
CR_B4C	3	0,1	0,00822	0,00784	0,00803	2875,89038
CR_B4C	4	0,1	0,00737	0,00701	0,00719	3587,11779
CR_B4C	5	0,1	0,00771	0,00791	0,00781	3040,194373
CR_B4C	6	0,1	0,00806	0,00816	0,00811	2819,432556
CR_B4C	7	0,1	0,00787	0,00812	0,007995	2901,125273
CR_B4C	8	0,1	0,00782	0,00804	0,00793	2948,87962
CR_B4C	9	0,1	0,00801	0,00786	0,007935	2945,164496
CR_B4C	10	0,1	0,00814	0,00789	0,008015	2886,664858
CR_B4C	1	0,2	0,01006	0,01109	0,010575	3316,443953
CR_B4C	2	0,2	0,00962	0,00922	0,00942	4179,570052
CR_B4C	3	0,2	0,01016	0,01004	0,0101	3635,721988
CR_B4C	4	0,2	0,01064	0,01143	0,011035	3045,711333
CR_B4C	5	0,2	0,01002	0,01028	0,01015	3599,990293
CR_B4C	6	0,2	0,00949	0,00905	0,00927	4315,925565
CR_B4C	7	0,2	0,00921	0,00969	0,00945	4153,075222
CR_B4C	8	0,2	0,01003	0,01063	0,01033	3475,62387
CR_B4C	9	0,2	0,01079	0,01077	0,01078	3191,507671
CR_B4C	10	0,2	0,01171	0,01259	0,01215	2512,354147
CR_B4C	1	1	0,03125	0,03154	0,031395	1881,40565
CR_B4C	2	1	0,02866	0,02946	0,02906	2195,89818
CR_B4C	3	1	0,02548	0,02576	0,02562	2825,173785
CR_B4C	4	1	0,02782	0,02577	0,026795	2582,830438
CR_B4C	5	1	0,02757	0,02894	0,028255	2322,805231
CR_B4C	6	1	0,02741	0,0259	0,026655	2610,03328
CR_B4C	7	1	0,0268	0,02556	0,02618	2705,603389

CR_B4C	8	1	0,02618	0,02619	0,026185	2704,570223
CR_B4C	9	1	0,02562	0,0246	0,02511	2941,101368
CR_B4C	10	1	0,02871	0,02711	0,02791	2380,58529

Tabela 35. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra MC_SiC. Fonte: Autor.

Material	Carga [kgf]	Diagonal média [mm]	Dureza [HV]
MC_SiC	0,025	0,003687668	3409,1
MC_SiC	0,025	0,00378759	3231,6
MC_SiC	0,025	0,003625098	3527,8
MC_SiC	0,025	0,003825058	3168,6
MC_SiC	0,025	0,003950012	2971,3
MC_SiC	0,025	0,003887517	3067,6
MC_SiC	0,025	0,004137513	2708,1
MC_SiC	0,025	0,003762639	3274,6
MC_SiC	0,025	0,004012622	2879,3
MC_SiC	0,05	0,005774852	2780,3
MC_SiC	0,05	0,005537638	3023,6
MC_SiC	0,05	0,005587572	2969,8
MC_SiC	0,05	0,005387559	3194,4
MC_SiC	0,05	0,00523763	3379,9
MC_SiC	0,05	0,006250174	2373,5
MC_SiC	0,05	0,005475071	3093,1
MC_SiC	0,05	0,005650033	2904,5
MC_SiC	0,05	0,005400083	3179,6
MC_SiC	0,1	0,007925137	2952,5
MC_SiC	0,1	0,008249931	2724,6
MC_SiC	0,1	0,007999862	2897,6
MC_SiC	0,1	0,007750063	3087,4
MC_SiC	0,1	0,008137513	2800,4
MC_SiC	0,1	0,007887426	2980,8
MC_SiC	0,1	0,007750063	3087,4
MC_SiC	0,1	0,007825064	3028,5
MC_SiC	0,1	0,008149891	2791,9
MC_SiC	0,2	0,011000222	3065
MC_SiC	0,2	0,010762492	3201,9
MC_SiC	0,2	0,011724755	2697,9
MC_SiC	0,2	0,010734201	3218,8
MC_SiC	0,2	0,010649997	3269,9
MC_SiC	0,2	0,011262709	2923,8
MC_SiC	0,2	0,011799784	2663,7

MC_SiC	0,2	0,01102489	3051,3
MC_SiC	0,2	0,011112643	3003,3
MC_SiC	1	0,02671306	2598,7
MC_SiC	1	0,025136943	2934,8
MC_SiC	1	0,025987192	2745,9
MC_SiC	1	0,025324455	2891,5
MC_SiC	1	0,024074311	3199,6
MC_SiC	1	0,027000842	2543,6
MC_SiC	1	0,026636806	2613,6
MC_SiC	1	0,027724776	2412,5
MC_SiC	1	0,026775468	2586,6

Tabela 36. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra MC_SiC. Fonte: Autor.

Material	Carga [kgf]	Diagonal média [mm]	Dureza [HV]
MC_Qtz	0,025	0,011565314	346,6
MC_Qtz	0,025	0,011310391	362,4
MC_Qtz	0,025	0,010840472	394,5
MC_Qtz	0,025	0,01109953	376,3
MC_Qtz	0,025	0,010964863	385,6
MC_Qtz	0,025	0,010954924	386,3
MC_Qtz	0,025	0,010834981	394,9
MC_Qtz	0,025	0,011080407	377,6
MC_Qtz	0,025	0,011160497	372,2
MC_Qtz	0,05	0,013651808	497,5
MC_Qtz	0,05	0,010700346	809,8
MC_Qtz	0,05	0,012268638	616
MC_Qtz	0,05	0,013375071	518,3
MC_Qtz	0,05	0,013559455	504,3
MC_Qtz	0,05	0,013467633	511,2
MC_Qtz	0,05	0,013836603	484,3
MC_Qtz	0,05	0,013744674	490,8
MC_Qtz	0,05	0,011991519	644,8
MC_Qtz	0,1	0,015173854	805,4
MC_Qtz	0,1	0,017873129	580,5
MC_Qtz	0,1	0,015173854	805,4
MC_Qtz	0,1	0,014708237	857,2
MC_Qtz	0,1	0,013684166	990,3
MC_Qtz	0,1	0,019549755	485,2

MC_Qtz	0,1	0,013498033	1017,8
MC_Qtz	0,1	0,017873129	580,5
MC_Qtz	0,1	0,014056739	938,5
MC_Qtz	0,2	0,017611875	1195,7
MC_Qtz	0,2	0,021991119	766,9
MC_Qtz	0,2	0,017706906	1182,9
MC_Qtz	0,2	0,02703594	507,4
MC_Qtz	0,2	0,027607727	486,6
MC_Qtz	0,2	0,018183536	1121,7
MC_Qtz	0,2	0,019135218	1012,9
MC_Qtz	0,2	0,021991119	766,9
MC_Qtz	0,2	0,01399462	1893,7
MC_Qtz	0,5	0,042917074	1006,8
MC_Qtz	0,5	0,038134017	1275,2
MC_Qtz	0,5	0,045043135	914
MC_Qtz	0,5	0,044513012	935,9
MC_Qtz	0,5	0,030693402	1968,4
MC_Qtz	0,5	0,044776931	924,9
MC_Qtz	0,5	0,031357568	1885,9
MC_Qtz	0,5	0,041456343	1079
MC_Qtz	0,5	0,036673391	1378,8

Tabela 37. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra MC_TiO2. Fonte: Autor.

Material	Amostra	Carga [kgf]	Diagonal 1 [mm]	Diagonal 2 [mm]	Diagonal média [mm]	Dureza [HV]
MC_TiO2	1	0,025	0,00853	0,00853	0,00853	637,1553953
MC_TiO2	2	0,025	0,00778	0,00759	0,007685	784,9747436
MC_TiO2	3	0,025	0,00836	0,00851	0,008435	651,588264
MC_TiO2	4	0,025	0,00852	0,00828	0,0084	657,0294785
MC_TiO2	5	0,025	0,00748	0,00821	0,007845	753,2818986
MC_TiO2	6	0,025	0,0082	0,0083	0,00825	681,1386593
MC_TiO2	7	0,025	0,00924	0,00899	0,009115	557,9947095
MC_TiO2	8	0,025	0,00851	0,00806	0,008285	675,3958718
MC_TiO2	9	0,025	0,00786	0,00746	0,00766	790,106961
MC_TiO2	10	0,025	0,008	0,00759	0,007795	762,9765466
MC_TiO2	1	0,05	0,01196	0,01242	0,01219	623,9733075
MC_TiO2	2	0,05	0,01158	0,01143	0,011505	700,4871566
MC_TiO2	3	0,05	0,01035	0,01109	0,01072	806,8333705
MC_TiO2	4	0,05	0,01057	0,01058	0,010575	829,1109882

MC_TiO2	5	0,05	0,0112	0,011	0,0111	752,5363201
MC_TiO2	6	0,05	0,01129	0,01174	0,011515	699,2710333
MC_TiO2	7	0,05	0,01	0,0105	0,01025	882,5223081
MC_TiO2	8	0,05	0,01171	0,01144	0,011575	692,0403603
MC_TiO2	9	0,05	0,01292	0,01202	0,01247	596,2666454
MC_TiO2	10	0,05	0,01142	0,01048	0,01095	773,2949688
MC_TiO2	1	0,1	0,01525	0,01623	0,01574	748,5037191
MC_TiO2	2	0,1	0,0202	0,0202	0,0202	454,4652485
MC_TiO2	3	0,1	0,01529	0,01433	0,01481	845,46046
MC_TiO2	4	0,1	0,01528	0,0143	0,01479	847,7485793
MC_TiO2	5	0,1	0,01448	0,01455	0,014515	880,1756269
MC_TiO2	6	0,1	0,01664	0,01871	0,017675	593,5872634
MC_TiO2	7	0,1	0,01521	0,01485	0,01503	820,8909305
MC_TiO2	8	0,1	0,01523	0,01545	0,01534	788,0480512
MC_TiO2	9	0,1	0,01517	0,01545	0,01531	791,139443
MC_TiO2	10	0,1	0,01509	0,01466	0,014875	838,0877057
MC_TiO2	1	0,2	0,0293	0,0291	0,0292	434,97842
MC_TiO2	2	0,2	0,02487	0,02445	0,02466	609,8840418
MC_TiO2	3	0,2	0,02219	0,0222	0,022195	752,875415
MC_TiO2	4	0,2	0,02191	0,02062	0,021265	820,1676591
MC_TiO2	5	0,2	0,02224	0,02224	0,02224	749,8317892
MC_TiO2	6	0,2	0,0214	0,02156	0,02148	803,8312024
MC_TiO2	7	0,2	0,02386	0,0241	0,02398	644,96338
MC_TiO2	8	0,2	0,0198	0,0205	0,02015	913,4469149
MC_TiO2	9	0,2	0,0213	0,0225	0,0219	773,2949688
MC_TiO2	10	0,2	0,0231	0,0224	0,02275	716,5897838
MC_TiO2	1	1	0,05349	0,05329	0,05339	650,5543376
MC_TiO2	2	1	0,05278	0,05626	0,05452	623,8665841
MC_TiO2	3	1	0,05726	0,05685	0,057055	569,660359
MC_TiO2	4	1	0,05132	0,05231	0,051815	690,7047038
MC_TiO2	5	1	0,05724	0,05782	0,05753	560,2923213
MC_TiO2	6	1	0,05782	0,0562	0,05701	570,5600199
MC_TiO2	7	1	0,05421	0,05362	0,053915	637,9464125
MC_TiO2	8	1	0,05481	0,05529	0,05505	611,9117209
MC_TiO2	9	1	0,05328	0,05624	0,05476	618,4100512
MC_TiO2	10	1	0,0578	0,0592	0,0585	541,8657316

Tabela 38. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra HI_WC6Co. Fonte: Autor.

Material	Amostra	Carga [kgf]	Diagonal 1 [mm]	Diagonal 2 [mm]	Diagonal	Dureza [HV]
					média [mm]	

HI_WC6Co	1	0,025	0,00503	0,0051	0,005065	1807,109745
HI_WC6Co	2	0,025	0,00536	0,00521	0,005285	1659,791148
HI_WC6Co	3	0,025	0,00616	0,00611	0,006135	1231,726523
HI_WC6Co	4	0,025	0,00564	0,00543	0,005535	1513,241269
HI_WC6Co	5	0,025	0,00554	0,00569	0,005615	1470,428481
HI_WC6Co	6	0,025	0,00561	0,00562	0,005615	1470,428481
HI_WC6Co	7	0,025	0,00553	0,00561	0,00557	1494,283624
HI_WC6Co	8	0,025	0,00559	0,0054	0,005495	1535,352264
HI_WC6Co	9	0,025	0,00566	0,00583	0,005745	1404,634597
HI_WC6Co	10	0,025	0,00539	0,00533	0,00536	1613,666741
HI_WC6Co	1	0,05	0,00755	0,00738	0,007465	1663,848574
HI_WC6Co	2	0,05	0,00718	0,00715	0,007165	1806,096843
HI_WC6Co	3	0,05	0,00747	0,0073	0,007385	1700,092
HI_WC6Co	4	0,05	0,00711	0,0073	0,007205	1786,098693
HI_WC6Co	5	0,05	0,00752	0,00777	0,007645	1586,420976
HI_WC6Co	6	0,05	0,00726	0,00735	0,007305	1737,532683
HI_WC6Co	7	0,05	0,00693	0,00724	0,007085	1847,114059
HI_WC6Co	8	0,05	0,00725	0,00709	0,00717	1803,578758
HI_WC6Co	9	0,05	0,00718	0,00762	0,0074	1693,20672
HI_WC6Co	10	0,05	0,00757	0,00768	0,007625	1594,754098
HI_WC6Co	1	0,1	0,01018	0,01035	0,010265	1759,88995
HI_WC6Co	2	0,1	0,0105	0,01057	0,010535	1670,83798
HI_WC6Co	3	0,1	0,01015	0,01038	0,010265	1759,88995
HI_WC6Co	4	0,1	0,01007	0,01067	0,01037	1724,431335
HI_WC6Co	5	0,1	0,01024	0,01029	0,010265	1759,88995
HI_WC6Co	6	0,1	0,01002	0,01026	0,01014	1803,547184
HI_WC6Co	7	0,1	0,0105	0,01053	0,010515	1677,200042
HI_WC6Co	8	0,1	0,01026	0,01051	0,010385	1719,453426
HI_WC6Co	9	0,1	0,01023	0,01043	0,01033	1737,811935
HI_WC6Co	10	0,1	0,01014	0,01012	0,01013	1807,109745
HI_WC6Co	1	0,2	0,01452	0,01496	0,01474	1707,019362
HI_WC6Co	2	0,2	0,01456	0,01463	0,014595	1741,106014
HI_WC6Co	3	0,2	0,01424	0,01458	0,01441	1786,098693
HI_WC6Co	4	0,2	0,01446	0,01451	0,014485	1767,65056
HI_WC6Co	5	0,2	0,01468	0,01481	0,014745	1705,861865
HI_WC6Co	1	1	0,03251	0,0324	0,032455	1760,516873
HI_WC6Co	2	1	0,03168	0,03194	0,03181	1832,635438
HI_WC6Co	3	1	0,03166	0,03205	0,031855	1827,461347
HI_WC6Co	4	1	0,03234	0,03241	0,032375	1769,228246
HI_WC6Co	5	1	0,03197	0,03191	0,03194	1817,747663

Tabela 39. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra HI_WC7Co. Fonte: Autor

Material	Amostra	Carga [kgf]	Diagonal 1 [mm]	Diagonal 2 [mm]	Diagonal média [mm]	Dureza [HV]
HI_WC7Co	1	0,025	0,00565	0,0057	0,005675	1439,500087
HI_WC7Co	2	0,025	0,00571	0,00573	0,00572	1416,939704
HI_WC7Co	3	0,025	0,00533	0,00571	0,00552	1521,476581
HI_WC7Co	4	0,025	0,00541	0,00567	0,00554	1510,511019
HI_WC7Co	5	0,025	0,00567	0,00547	0,00557	1494,283624
HI_WC7Co	1	0,05	0,00816	0,00803	0,008095	1414,945515
HI_WC7Co	2	0,05	0,00786	0,00793	0,007895	1487,541718
HI_WC7Co	3	0,05	0,0079	0,00795	0,007925	1476,300889
HI_WC7Co	4	0,05	0,00781	0,00795	0,00788	1493,210338
HI_WC7Co	5	0,05	0,00806	0,00807	0,008065	1425,491656
HI_WC7Co	1	0,1	0,01077	0,01115	0,01096	1543,768981
HI_WC7Co	2	0,1	0,01101	0,01077	0,01089	1563,6792
HI_WC7Co	3	0,1	0,01087	0,01098	0,010925	1553,676251
HI_WC7Co	4	0,1	0,01091	0,01117	0,01104	1521,476581
HI_WC7Co	5	0,1	0,01077	0,01076	0,010765	1600,203995
HI_WC7Co	1	0,2	0,0151	0,01581	0,015455	1552,728039
HI_WC7Co	2	0,2	0,01535	0,01531	0,01533	1578,152998
HI_WC7Co	3	0,2	0,01514	0,01506	0,0151	1626,595325
HI_WC7Co	4	0,2	0,01532	0,01504	0,01518	1609,495887
HI_WC7Co	5	0,2	0,01537	0,01517	0,01527	1590,579351
HI_WC7Co	1	1	0,03328	0,03388	0,03358	1644,530888
HI_WC7Co	2	1	0,0335	0,03356	0,03353	1649,4392
HI_WC7Co	3	1	0,03394	0,03411	0,034025	1601,795801
HI_WC7Co	4	1	0,0335	0,03364	0,03357	1645,510796
HI_WC7Co	5	1	0,03355	0,03359	0,03357	1645,510796

Tabela 40. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra HI_WC10Co. Fonte: Autor

Material	Amostra	Carga [kgf]	Diagonal 1 [mm]	Diagonal 2 [mm]	Diagonal média [mm]	Dureza [HV]
HI_WC10Co	1	0,025	0,00547	0,00573	0,0056	1478,316327
HI_WC10Co	2	0,025	0,0062	0,00628	0,00624	1190,622945
HI_WC10Co	3	0,025	0,00597	0,00558	0,005775	1390,078897
HI_WC10Co	4	0,025	0,00582	0,00591	0,005865	1347,743961
HI_WC10Co	5	0,025	0,00616	0,006	0,00608	1254,111842

HI_WC10Co	1	0,05	0,00836	0,00856	0,00846	1295,485919
HI_WC10Co	2	0,05	0,00868	0,00846	0,00857	1262,443001
HI_WC10Co	3	0,05	0,00873	0,00856	0,008645	1240,633282
HI_WC10Co	4	0,05	0,00853	0,00871	0,00862	1247,839966
HI_WC10Co	5	0,05	0,00822	0,00821	0,008215	1373,910009
HI_WC10Co	1	0,1	0,01179	0,0122	0,011995	1288,851597
HI_WC10Co	2	0,1	0,01162	0,01193	0,011775	1337,462417
HI_WC10Co	3	0,1	0,0117	0,01196	0,01183	1325,055074
HI_WC10Co	4	0,1	0,01241	0,01204	0,012225	1240,811137
HI_WC10Co	5	0,1	0,01201	0,01259	0,0123	1225,725428
HI_WC10Co	1	0,2	0,01754	0,01793	0,017735	1179,155358
HI_WC10Co	2	0,2	0,01719	0,01724	0,017215	1251,466879
HI_WC10Co	3	0,2	0,01724	0,01768	0,01746	1216,591942
HI_WC10Co	4	0,2	0,01754	0,01799	0,017765	1175,176209
HI_WC10Co	5	0,2	0,0173	0,01729	0,017295	1239,91605
HI_WC10Co	1	1	0,03877	0,03951	0,03914	1210,491589
HI_WC10Co	2	1	0,03905	0,03845	0,03875	1234,980229
HI_WC10Co	3	1	0,03848	0,03885	0,038665	1240,416086
HI_WC10Co	4	1	0,03933	0,03924	0,039285	1201,572288
HI_WC10Co	5	1	0,03888	0,03915	0,039015	1218,260592

Tabela 41. Medidas de dureza Vickers e diagonal média em cada carga normal para a amostra HI_WC11Co. Fonte: Autor

Material	Amostra	Carga [kgf]	Diagonal 1 [mm]	Diagonal 2 [mm]	Diagonal média [mm]	Dureza [HV]
HI_WC11Co	1	0,025	0,00601	0,00652	0,006265	1181,139726
HI_WC11Co	2	0,025	0,0062	0,00628	0,00624	1190,622945
HI_WC11Co	3	0,025	0,00702	0,00706	0,00704	935,4016012
HI_WC11Co	4	0,025	0,00582	0,00591	0,005865	1347,743961
HI_WC11Co	5	0,025	0,00616	0,006	0,00608	1254,111842
HI_WC11Co	1	0,05	0,00832	0,00867	0,008495	1284,832923
HI_WC11Co	2	0,05	0,00861	0,00846	0,008535	1272,818187
HI_WC11Co	3	0,05	0,00877	0,00876	0,008765	1206,895261
HI_WC11Co	4	0,05	0,00852	0,00871	0,008615	1249,288837
HI_WC11Co	5	0,05	0,00922	0,00929	0,009255	1082,481734
HI_WC11Co	1	0,1	0,01179	0,0122	0,011995	1288,851597
HI_WC11Co	2	0,1	0,01162	0,01193	0,011775	1337,462417
HI_WC11Co	3	0,1	0,0117	0,01196	0,01183	1325,055074
HI_WC11Co	4	0,1	0,01241	0,01204	0,012225	1240,811137
HI_WC11Co	5	0,1	0,01201	0,01259	0,0123	1225,725428
HI_WC11Co	1	0,2	0,01705	0,01712	0,017085	1270,584193

HI_WC11Co	2	0,2	0,01719	0,01724	0,017215	1251,466879
HI_WC11Co	3	0,2	0,01701	0,01706	0,017035	1278,053807
HI_WC11Co	4	0,2	0,01674	0,01682	0,01678	1317,193265
HI_WC11Co	5	0,2	0,0163	0,01629	0,016295	1396,769312
HI_WC11Co	1	1	0,03772	0,0375	0,03761	1310,982069
HI_WC11Co	2	1	0,03698	0,03701	0,036995	1354,931549
HI_WC11Co	3	1	0,03712	0,03716	0,03714	1344,372499
HI_WC11Co	4	1	0,03732	0,03739	0,037355	1328,941725
HI_WC11Co	5	1	0,03752	0,03726	0,03739	1326,4549

APÊNDICE C – DADOS ADICIONAIS DO ENSAIO RODA DE BORRACHA

Tabela 42. Dados adicionais do ensaio roda de borracha: Massa antes e depois dos ensaios (cinco medições e média) e massa de areia recolhida pelo suporte (areia que passou pelo contato). Fonte: Autor.

Amostra	Massa antes [g] 1	Massa antes [g] 2	Massa antes [g] 3	Massa antes [g] 4	Massa antes [g] 5	Média massa antes	Massa depois [g] 1	Massa depois [g] 2	Massa depois [g] 3	Massa depois [g] 4	Massa depois [g] 5	Média massa depois	Areia Recolhida (g)
MC_AL99_3	14,85793	14,8579	14,85787	14,85792	14,85795	14,857914	14,8189	14,81922	14,81915	14,8191	14,81907	14,819088	1066,26
EG_AL96_4	14,33856	14,33821	14,33826	14,33824	14,33812	14,338278	14,32664	14,32664	14,32662	14,32657	14,32668	14,32663	797,26
MC_ZTA_2	16,12522	16,12519	16,12524	16,12519	16,12521	16,12521	16,12385	16,1234	16,12343	16,12336	16,12338	16,123484	943,26
CT_ZTA_3	17,68469	17,68466	17,68463	17,68465	17,68472	17,68467	17,67739	17,67777	17,67768	17,67758	17,67761	17,677606	794,26
CT_ZrO2_3	28,13488	28,13506	28,13502	28,13508	28,13493	28,134994	28,12809	28,12805	28,12801	28,12799	28,12805	28,128038	891,26
CT_ZTA_2	17,56908	17,56896	17,56939	17,56939	17,56941	17,569246	17,55988	17,55995	17,55998	17,55992	17,55986	17,559918	913,26
DC_AL99_10	16,00443	16,00443	16,0044	16,00439	16,00441	16,004412	15,99673	15,99693	15,99686	15,99677	15,9968	15,996818	890,26
EG_AL96_3	14,29344	14,29346	14,29345	14,29351	14,29353	14,293478	14,28076	14,28067	14,28072	14,28074	14,28052	14,280682	839,26
EG_AL99_2	14,64554	14,64585	14,64589	14,64583	14,64583	14,645788	14,62913	14,62901	14,62898	14,62897	14,62894	14,629006	794,26
CT_ZrO2_2	27,4991	27,49876	27,49879	27,49876	27,49883	27,498848	27,49156	27,49161	27,49157	27,49158	27,49154	27,491572	947,26
HI_WC10Co_3	86,4585	86,4585	86,4585	86,4585	86,4585	86,4585	86,4511	86,4512	86,4512	86,451	86,451	86,4511	666,26
CT_AL96_4	16,49787	16,49779	16,49773	16,49781	16,49779	16,497798	16,48442	16,48451	16,48444	16,48448	16,4845	16,48447	952,26
MC_AL99_4	14,3528	14,35281	14,35277	14,35276	14,35282	14,352792	14,3217	14,32183	14,32185	14,32178	14,32174	14,32178	966,26
CR_B4C_3	9,84202	9,84196	9,84198	9,84196	9,84199	9,841982	9,83599	9,83582	9,83571	9,8356	9,83554	9,835732	873,26
MC_ZrO2_3	22,88021	22,88021	22,88019	22,8802	22,88021	22,880204	22,87331	22,87337	22,87334	22,87337	22,87335	22,873348	978,26
CT_AL99_2	17,38978	17,38979	17,38976	17,38976	17,38976	17,38977	17,37421	17,37424	17,37427	17,37422	17,3742	17,374228	1009,26
DC_AL99_5	16,38563	16,38555	16,38546	16,38552	16,38549	16,38553	16,37532	16,37537	16,37536	16,37537	16,37538	16,37536	1234,26
EG_ZTA_3	14,44208	14,44214	14,4421	14,44215	14,44217	14,442128	14,42954	14,42954	14,42956	14,42953	14,42952	14,429538	1096,26
CT_ZrO2_4	27,9858	27,98587	27,98591	27,98588	27,98594	27,98588	27,97721	27,97718	27,97725	27,97726	27,97712	27,977204	1016,26
MC_AL96_2	14,20545	14,20543	14,20541	14,20538	14,20533	14,2054	14,16613	14,16626	14,16622	14,16619	14,16622	14,166204	949,26
DC_ZrO2_3	20,00254	20,0025	20,00245	20,00241	20,00242	20,002464	19,99197	19,99188	19,99179	19,99165	19,99156	19,99177	1048,26

CT_AL96_2	16,52115	16,52117	16,52119	16,5211	16,52112	16,521146	16,50727	16,50735	16,50731	16,50734	16,50731	16,507316	1027,26
DC_ZrO2_2	19,90369	19,90371	19,90356	19,9036	19,90355	19,903622	19,88893	19,88894	19,88887	19,88884	19,88885	19,888886	1325,26
MC_ZrO2_4	22,93409	22,93408	22,93405	22,93411	22,93408	22,934082	22,92605	22,92609	22,92613	22,92611	22,92607	22,92609	1034,26
DC_AL99_4	15,95117	15,95114	15,95108	15,95116	15,95122	15,951154	15,94144	15,94158	15,94151	15,94146	15,94152	15,941502	1182,26
CT_AL99_3	17,34256	17,34255	17,34254	17,34249	17,34256	17,34254	17,33224	17,33231	17,33232	17,33232	17,33228	17,332294	1002,26
MC_AL96_3	14,18348	14,18342	14,18342	14,18339	14,18343	14,183428	14,14199	14,14207	14,14199	14,14206	14,14196	14,142014	1155,26
CT_ZTA_4	17,25759	17,25753	17,2576	17,2576	17,25762	17,257588	17,24802	17,24803	17,24807	17,24804	17,24794	17,24802	1050,26
DC_ZTA_4	16,81877	16,81879	16,81874	16,81877	16,81877	16,818768	16,81341	16,8134	16,8134	16,8134	16,81339	16,8134	1275,26
MC_AL99_2	14,67971	14,67995	14,67991	14,67992	14,67993	14,679884	14,64868	14,64866	14,64867	14,64862	14,64862	14,64865	1342,26
EG_AL99_3	14,60496	14,60493	14,60492	14,60495	14,60495	14,604942	14,58825	14,58863	14,58856	14,58835	14,5884	14,588438	1132,26
EG_ZTA_4	16,42889	16,42887	16,42891	16,42888	16,42895	16,4289	16,41891	16,41903	16,41903	16,41896	16,41891	16,418968	1314,26
CT_AL96_3	17,18066	17,18057	17,18056	17,18062	17,18067	17,180616	17,16706	17,16715	17,1671	17,16708	17,16709	17,167096	1194,26
MC_ZrO2_2	22,90324	22,90324	22,9032	22,90326	22,90304	22,903196	22,89142	22,89145	22,89148	22,89141	22,89149	22,89145	1311,26
EG_AL99_4	14,88155	14,88157	14,88161	14,88158	14,88161	14,881584	14,86245	14,86235	14,8624	14,86248	14,86254	14,862444	1243,26
CR_B4C_2	9,96089	9,96086	9,96087	9,96091	9,96099	9,960904	9,95372	9,95372	9,95368	9,95365	9,95362	9,953678	1353,26
HI_WC7Co_2	88,0352	88,0354	88,0351	88,0352	88,0354	88,03526	88,0302	88,0303	88,0302	88,0304	88,0301	88,03024	1249,26
DC_ZTA_3	15,95860	15,95863	15,95862	15,95866	15,95864	15,95863	15,9518	15,95187	15,95181	15,95182	15,95179	15,951818	1549,26
EG_ZTA_2	16,36811	16,36826	16,36819	16,36822	16,3682	16,368196	16,35855	16,35861	16,35853	16,35853	16,35859	16,358562	1141,26
HI_WC10Co_2	85,7813	85,7814	85,7814	85,7815	85,7814	85,7814	85,7732	85,7733	85,7732	85,7733	85,773	85,7732	1008,26
MC_ZTA_4	16,05958	16,05954	16,05958	16,05964	16,05961	16,05959	16,05656	16,05675	16,05664	16,05664	16,05665	16,056648	1102,26
HI_WC7Co_3	86,683	86,6831	86,683	86,6831	86,6829	86,68302	86,6779	86,678	86,678	86,6779	86,6778	86,67792	1012,26
DC_ZTA_7	15,90055	15,90048	15,90051	15,90045	15,90049	15,900496	15,89364	15,89367	15,89395	15,89383	15,89361	15,89374	1372,26
EG_AL96_2	14,39076	14,39073	14,39076	14,39081	14,39085	14,390782	14,37336	14,37339	14,37348	14,37342	14,37341	14,373412	1193,26
CT_AL99_4	17,54969	17,54958	17,54961	17,54956	17,5496	17,549608	17,52922	17,52933	17,52936	17,52924	17,5293	17,52929	1166,26
MC_ZTA_3	16,08462	16,08461	16,08461	16,08459	16,08463	16,084612	16,08115	16,08111	16,0811	16,08113	16,08114	16,081126	1318,26
HI_WC10Co_4	84,86250	84,86250	84,86250	84,86250	84,86250	84,8625	84,8569	84,8568	84,8569	84,8569	84,8569	84,85688	1265,26
MC_AL96_4	14,20858	14,20856	14,20857	14,20856	14,2085	14,208554	14,16228	14,16249	14,16239	14,1624	14,16235	14,162382	1394,26
DC_ZrO2_4	20,40395	20,40395	20,40385	20,40385	20,40393	20,403906	20,38943	20,38966	20,38962	20,38952	20,38958	20,389562	1477,26
CR_B4C_4	9,93498	9,93491	9,93494	9,93492	9,93496	9,934942	9,9274	9,92776	9,92747	9,92727	9,92726	9,927432	1271,26
HI_WC7Co_5	87,5402	87,5402	87,5402	87,5401	87,5402	87,54018	87,5375	87,5376	87,5374	87,5374	87,5375	87,53748	1143,26

