

AVALIAÇÃO DO EFEITO DO TRATAMENTO DE DISPERSÃO E DA ADIÇÃO DE ÓXIDO DE GRAFENO NA HOMOGENEIDADE E PROPRIEDADES DE COMPÓSITOS ZTA

Matheus Rodrigues Furlani, matheus.furlani@edu.ufes.br

Marcelo Carneiro Bertoletto, marcelo.b.carneiro@ufes.br

Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória/ES, Brasil

Resumo. O controle da dispersão das partículas é essencial para a qualidade microestrutural dos materiais cerâmicos. Estratégias como o uso de ácido oleico e ultrassom têm se mostrado eficazes nesse processo. Por sua vez, o grafeno apresenta propriedades notáveis que contribuem para o aumento da resistência e da performance estrutural desses materiais. Este trabalho tem como objetivo avaliar o efeito combinado do ácido oleico (AO) mais ultrassonicação (US) e da adição de óxido de grafeno reduzido (RGO) nas propriedades de compósitos de alumina tenacificados com zircônia. Assim, foram testadas três condições de mistura dos pós: ZTA (referência) sem modificação do pó; ZTA com tratamento de ácido oleico e banho ultrassônico (ZTA+AO+US) e ZTA tratada com ácido oleico e banho ultrassônico com 0,25% m de óxido de grafeno reduzido (ZTA+0,25RGO). As amostras foram sinterizadas por corrente elétrica pulsada (PECS) a 1400 °C e 50 MPa por 44 minutos. Elas apresentaram densificação superior a 98%, indicando densificação completa. A análise microestrutural mostrou que o tratamento com AO e US proporcionou melhor homogeneidade da zircônia na matriz de alumina. A amostra ZTA+0,25RGO apresentou o maior valor de dureza Vickers, com um aumento de 1,37% em relação à ZTA, enquanto a ZTA+OA+US apresentou redução de 2,80%. Quanto à tenacidade à fratura, observaram-se aumentos de 6,52% para ZTA+OA+US e 9,94% para ZTA+0,25RGO, em comparação com a amostra de referência. Estes resultados indicam que AO+US promove melhor distribuição de fases e que o grafeno constitui uma alternativa promissora para potencializar as propriedades mecânicas de compósitos ZTA.

Palavras-chave: ZTA. Óxido de grafeno. Densidade. Dureza. Tenacidade à fratura.

1. INTRODUÇÃO

As cerâmicas de alumina tenacificada por zircônia (ZTA) combinam a dureza e inércia química da alumina com a tenacidade da zircônia, resultando em materiais com alta resistência mecânica, boa estabilidade térmica e baixo custo relativo (GAFUR et al., 2021). A transformação de fase tetragonal para monoclinica na zircônia atua como um mecanismo de tenacificação, absorvendo a energia de fratura no compósito (ARAGÓN-DUARTE et al., 2017).

Uma boa dispersão dos pós cerâmicos é fundamental para evitar aglomerações e obter materiais sinterizados mais homogêneos e densos (SUZUKI et al., 1998; RAHIMIAN et al., 2019). Para isso, surfactantes como ácidos orgânicos e ultrassom são utilizados para promover essa dispersão. Na literatura, o ácido oleico (AO) é citado como agente de modificação superficial em sistemas cerâmicos, atuando na melhoria da dispersão das partículas e favorecendo a densificação dos materiais. Wen e outros (2017) demonstraram que a adição de 2% em massa de AO às partículas de zircônia reduziu a viscosidade da suspensão, aumentou a resistência à flexão e resultou em uma microestrutura mais densa e homogênea. Adake e outros (2015) avaliaram o uso de AO e ácido esteárico (AE) para a modificação superficial de partículas de alumina em suspensões cerâmicas fotocuráveis, relatando uma viscosidade de 5,03 Pa·s com 1,25% em massa de AO, em comparação a 17,1 Pa·s com AE, além de uma redução no ângulo de contato de 32,8° para 16,3°. A ultrassonicação também é uma alternativa para melhorar a dispersão das partículas. Suzuki e outros (2001) relataram redução na viscosidade aparente e formação de grãos de Al_2O_3 de 0,40 μm utilizando ultrassonicação de 160 W, com partículas de ZrO_2 distribuídas ao longo dos contornos de grão, resultando em alongamento sob tração de até 550%.

O grafeno apresenta uma estrutura bidimensional em forma de colmeia composta por átomos de carbono hibridizados em sp^2 , o que lhe confere propriedades mecânicas, térmicas e elétricas extraordinárias, tornando-o um agente de tenacificação promissor para compósitos cerâmicos (ANBAZHAGAN; XAVIOR, 2025). O óxido de grafeno, por sua elevada área superficial e boas características elétricas e térmicas, tem despertado interesse em diversas aplicações tecnológicas, como sensores e dispositivos eletrônicos flexíveis (BRONISZEWSKI et al., 2015). A adição de grafeno a matrizes cerâmicas, como alumina e zircônia, também tem se mostrado eficaz no aprimoramento da resistência à fratura e de outras propriedades mecânicas (BONIECKI et al., 2017). Grigoriev e outros (2022) observaram que a adição de 0,28% em massa de óxido de grafeno reduzido em compósitos $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ sinterizados por PECS resultou em resistência à flexão de 876 ± 43 MPa e dureza de 1760 HV10, mantendo a estabilidade da fase tetragonal da zircônia. De forma semelhante, Liu e outros (2012) relataram que a incorporação de 0,81% em volume de nanoplaquetas de grafeno em compósitos ZTA com 12,87% em volume de zircônia, sinterizados por PECS a 1550 °C, promoveu um aumento de 40%

na tenacidade à fratura e uma dureza de 1631 HV10, confirmando o potencial do grafeno como agente de reforço estrutural nesses materiais.

Portanto, este estudo tem como objetivo investigar os efeitos combinados do ácido oleico mais ultrassom e da adição de óxido de grafeno reduzido (RGO) nas propriedades de compósitos de alumina tenacificada com zircônia, avaliando a influência na microestrutura e nas propriedades mecânicas das amostras sinterizadas por sinterização por corrente elétrica pulsada (PECS).

2. METODOLOGIA

2.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados neste estudo incluíram pós ultrafinos de alumina (α -Al₂O₃, 0,4 μ m, 99,9% de pureza, NanoAmor), nanopós de zircônia estabilizada com 3% mol de ítria (3Y-ZrO₂, 0,04 μ m, 99,5% de pureza, NanoAmor) e óxido de grafeno reduzido (RGO, grafeno de poucas camadas, 95% de pureza, NanoView). A Tabela 1 apresenta as características dos pós.

Tabela 1 – Característica dos pós utilizados

Material	Densidade [g/cm ³]	Módulo de Elasticidade [GPa]
α -Al ₂ O ₃	3,97	380 ¹
3Y-ZrO ₂	5,84	220 ²
RGO	2,00	750 ^{3,4}

Fonte: ¹Zhao et al., 2002; ²Pastor et al., 2001; ³Frank et al., 2007; ⁴Lee et al., 2008.

2.2 PREPARAÇÃO DOS PÓS

Os pós cerâmicos foram preparados com uma composição de 91% vol. de Al₂O₃ e 9% vol. de 3Y-ZrO₂. Em seguida, foram aplicados três diferentes procedimentos de mistura para a produção de amostras sinterizadas com dimensões de 15 × 15 × 4 mm. Os tratamentos incluíram amostras de: referência sem modificação (ZTA); ZTA tratada com ácido oleico e seguido de banho ultrassônico (ZTA+OA+US) e ZTA tratada com ácido oleico seguido de banho ultrassônico com 0,25% m. de RGO adicionado (ZTA+0,25RGO).

A porcentagem de ácido oleico (2% em massa) foi diluída em álcool etílico na proporção de 1:8, utilizando um agitador magnético a 50 °C por 10 minutos. O pó cerâmico foi adicionado gradualmente e agitado por mais 10 minutos para garantir completa homogeneização. O banho ultrassônico teve duração de 15 minutos para os pós ZTA+OA+US e ZTA+0,25RGO, após a etapa de ataque, sendo realizado em um equipamento ultrassônico de 42 kHz (Cristófoli).

Em seguida, as três misturas de pó passaram por agitação mecânica em meio líquido de álcool etílico utilizando um agitador Wagner (NewLab) por 12 horas, com esferas de aço inoxidável (AISI 304) na proporção de 1:10 (pó:esferas). Por fim, os pós foram secos em estufa laboratorial (NL80/42, NewLab) a 60 °C por 24 horas, a fim de eliminar completamente o solvente.

2.3 SINTERIZAÇÃO POR CORRENTE ELÉTRICA PULSADA (PECS)

Após a secagem, os pós foram condicionados em matrizes de grafite (MBIS60X, Morganite), as quais foram revestidas internamente com folhas de grafite (Grafoil GTB, Morganite) com a finalidade de impedir a adesão dos pós a matriz. O método de sinterização utilizado foi por corrente elétrica pulsada (PECS), utilizando um equipamento modelo SPS 1050 (SPS Syntex Inc.). Os parâmetros de sinterização podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros utilizados no processo de sinterização

Parâmetro	Valor
Taxa de aquecimento/ resfriamento	100°C/min
Temperatura de patamar	1400°C
Pressão uniaxial	50 MPa
Tempo de patamar	8 min
Ciclo de pulsos	12 On - 2 Off (DC) - 3,3 ms
Atmosfera	Vácuo de 10 Pa
Duração do ciclo	44 min

Fonte: Produção do próprio autor.

2.4 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

As amostras sinterizadas foram seccionadas em uma cortadora metalográfica (CPT-25, Teclago) com um disco de corte diamantado 15 HC (Buehler). Uma parte foi submetida ao ensaio de densidade e a outra ao preparo metalográfico para posterior análise microestrutural e ensaios mecânicos.

2.3.1. Ensaio de densidade relativa

A densidade relativa foi obtida utilizando o princípio de Arquimedes, conforme a norma ABNT NBR ISO 10545-3 (2020) para materiais cerâmicos. As amostras foram secas em estufa (NL 80/42, New Lab) a 110 °C por 24 h, e a massa seca (m_1) foi medida em balança de precisão (AD200, Marte). Em seguida, as amostras foram imersas em água destilada em ebulição por 2 horas para saturação dos poros. Após a retirada do excesso de água, obteve-se a massa úmida (m_2), e em seguida, a massa suspensa (m_3), com o auxílio de kit hidrostático.

A densidade teórica (ρ_{teo}) das amostras foi calculada através da regra inversa das misturas (GERMAN, 2008), equação (1).

$$\frac{1}{\rho_{teo}} = \frac{m\%Alumina}{\rho_{Alumina}} + \frac{m\%Zircônia}{\rho_{Zircônia}} + \frac{m\%Grafeno}{\rho_{Grafeno}} [cm^3/g] \quad (1)$$

onde $m\%$ representa as porcentagens em massa, onde $\rho_{Alumina}$, $\rho_{Zircônia}$ e $\rho_{Grafeno}$ correspondem às densidades teóricas de Al_2O_3 , $3Y-ZrO_2$ e rGO, respectivamente.

A temperatura da água (T_{exp}) foi monitorada com termômetro digital tipo espeto (TP300, Liba) durante a etapa de medição da massa suspensa. Essa etapa se faz necessária, uma vez que a densidade da água respeita a equação (2).

$$\rho_{H_2O} = 1,0017 - 0,0002315T_{exp} [g/cm^3] \quad (2)$$

A densidade experimental (ρ_{exp}) foi encontrada a partir da equação (3), onde m_1 , m_2 e m_3 são dados experimentais.

$$\rho_{exp} = \frac{m_1}{m_2 - m_3} \cdot \rho_{H_2O} [g/cm^3] \quad (3)$$

Por fim, densidade relativa (ρ_{rel}) foi calculada conforme a equação (4).

$$\rho_{rel} = \frac{\rho_{exp}}{\rho_{teo}} \cdot 100 [\%] \quad (4)$$

2.3.2. Análise microestrutural

As amostras foram embutidas em resina fenólica (baquelite) (EFD 30, FORTEL). Utilizando uma politriz lixadeira metalográfica de velocidade variável (PLFDV, FORTEL), as amostras foram desbastadas e polidas com utilizando pano de náilon (PSA, Buehler) e pastas de diamante com tamanhos de partículas variando de 100 a 1 μm . O registro da microestrutura foi realizado por microscopia eletrônica de varredura, MEV (Quanta FEG650, FEI). As análises de imagem foram efetuadas no software ImageJ (IJ1.54g, NIH), para avaliar a fração de área e o tamanho de fase da zircônia.

2.3.3. Dureza Vickers

O ensaio de dureza foi realizado de acordo com a norma ASTM C1327-15 (2015), utilizando um durômetro Vickers (400.316, Digimess) com carga aplicada de 10 kgf por 10 segundos. Para a análise, foram consideradas 12 impressões em cada amostra.

2.3.4. Tenacidade à fratura

A tenacidade à fratura foi determinada pelo método de indentação, a partir das impressões do ensaio de dureza Vickers. As trincas foram medidas no ImageJ (IJ1.54g, NIH) a partir de imagens obtidas por microscopia óptica (IM720, Kontrol), e os valores calculados segundo a equação (5), considerando as propriedades elásticas do material.

$$K_{IC} = 0,016 \left(\frac{E_C}{H} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{P}{c^{\frac{3}{2}}} [MPa \cdot m^{\frac{1}{2}}] \quad (5)$$

onde E_C é o módulo de elasticidade do cerâmico (GPa), H a dureza (GPa), P a carga aplicada (N) e c o comprimento médio das trincas a partir do centro da indentação (m). O módulo de elasticidade do compósito cerâmico (E_C) pode ser estimado pela equação (6) (LANHE, 2004).

$$E_C = E_{Alumina}v_{Alumina} + E_{Zircônia}v_{Zircônia} + E_{Grafeno}v_{Grafeno} [GPa] \quad (6)$$

onde $v_{Alumina}$, $v_{Zircônia}$ e $v_{Grafeno}$ são, respectivamente, a fração volumétrica da alumina, da zircônia e do óxido de grafeno reduzido.

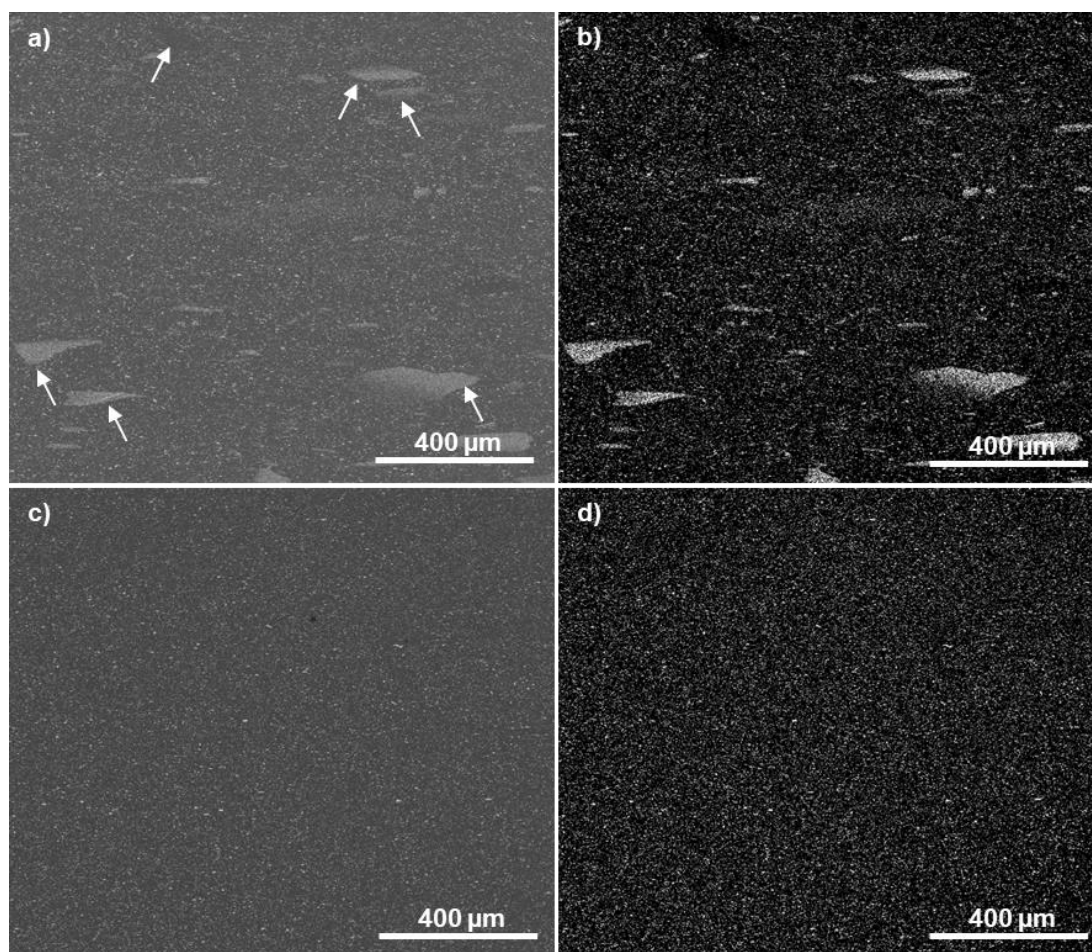
3. RESULTADOS

3.1 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

Para avaliar se a estratégia de mistura dos pós, especialmente a aplicação de ácido oleico e ultrassom, influencia a microestrutura do material, foi realizada uma análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV). As micrografias obtidas estão apresentadas na Figura 1. A quantificação da fração de área de zircônia foi conduzida no software ImageJ, a fim de identificar eventuais diferenças entre as amostras. Para essa etapa, as imagens foram binarizadas, atribuindo-se a cor preta à fase de alumina e a cor branca à fase de zircônia. Os resultados são apresentados na Tabela 3.

Os resultados indicam que a amostra ZTA (referência) apresentou 5% menor fração de área de ZrO_2 . Em relação ao tamanho médio da fase, observou-se uma redução de 9,41% na amostra ZTA+OA+US quando comparada à referência. Como pode ser visto na Figura 1a) e b), a amostra ZTA não se apresentou homogênea. Nota-se regiões com maior concentração de alumina e outras com predominância de zircônia, indicadas por setas brancas. Assim, a análise sugere que o tratamento com ácido oleico, aliado ao uso de ultrassom, favorece uma dispersão mais uniforme da zircônia na matriz de alumina, Figura 1c) e d).

Figura 1 – Imagens de MEV das amostras sinterizadas (a) ZTA; (b) ZTA binarizada; (c) ZTA+AO+US e (d) ZTA+AO+US binarizada



Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 3 – Característica dos pós utilizados

Materiais	Fração de área de ZrO₂ [%]	Tamanho médio da fase de ZrO₂ [μm²]
ZTA	11,449	4,808
ZTA+AO+US	12,108	4,353

Fonte: Produção do próprio autor.

3.2 DENSIDADE RELATIVA

A Tabela 4 apresenta os valores de densidade relativa obtidos para as amostras. Todas apresentaram densidades superiores a 98%, sendo consideradas totalmente densificadas (GERMAN, 1996; RAHAMAN, 2003).

Tabela 4 – Resultados do ensaio de densidade relativa

Materiais	ρ_{teo} [g/cm³]	ρ_{exp} [g/cm³]	ρ_{rel} [%]
ZTA	4,144	4,078 ± 0,035	98,421 ± 0,834
ZTA+AO+US	4,144	4,111 ± 0,019	99,865 ± 0,192
ZTA+0,25RGO	4,133	4,111 ± 0,032	99,472 ± 0,776

Fonte: Produção do próprio autor.

A Tabela 5 apresenta a análise de variância (ANOVA) para os dados de densidade relativa, considerando um nível de significância ($\alpha = 5\%$). A variável Tratamento indica se há diferença entre as amostras em relação à variável de resposta; SQ representa a soma dos quadrados, GL o grau de liberdade, QM a média dos quadrados (ou variância), F o valor calculado da distribuição de Fisher e p a probabilidade ou nível de significância calculado. A análise estatística indicou a existência de diferença significativa ($p < \alpha$) entre as amostras nos resultados de densidade relativa.

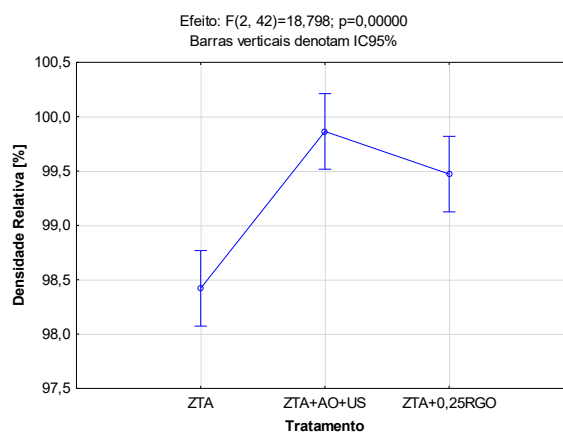
Tabela 5 – ANOVA para densidade relativa

Efeito	SQ	GL	QM	F	p-valor
Média	443297,0	1	443297,0	996888,8	0,000000
Tratamento	16,7	2	8,4	18,8	0,000001
Resíduos	18,7	42	0,4		

Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 2 apresenta os valores de densidade relativa para as amostras avaliadas. A amostra de referência ZTA exibiu o menor valor de densidade. As amostras ZTA+AO+US e ZTA+0,25RGO apresentaram um pequeno aumento na densidade, 1,47% e 1,07%, respectivamente, em relação à ZTA. Esse comportamento se deve à ação de dispersão do ácido oleico, que, ao se ligar à superfície dos pós cerâmicos, diminui a interação das partículas, prevenindo a aglomeração dos pós. Além disso, essas duas amostras tratadas apresentaram intervalos de confiança sobrepostos, indicando comportamento semelhante. Para verificar se houve diferença significativa ao adicionar o RGO em relação à densidade relativa, foi realizado o teste de Tukey (ou Tukey HSD – Honest Significant Difference), conforme apresentado na Tabela 6. Como o valor de p é superior ao nível de significância de 5% (α), conclui-se que não há diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos para esta resposta.

Figura 2 – Efeito do tratamento na densidade relativa



Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 6 – Teste de Tukey para densidade relativa

	ZTA	ZTA+AO+US	ZTA+0,25RGO
ZTA		0,000119	0,000375
ZTA+AO+US	0,000119		0,251652
ZTA+0,25RGO	0,000375	0,251652	

Fonte: Produção do próprio autor.

3.3 DUREZA VICKERS

A Tabela 7 apresenta os resultados de dureza Vickers (HV) para os materiais avaliados. Esses valores estão de acordo com os reportados na literatura para ZTA (CESARI et al., 2006; CARREON et al., 2009). A amostra ZTA+0,25RGO apresentou o maior valor de dureza, um aumento de 1,37% em relação à referência, enquanto a ZTA+OA+US obteve o menor valor de dureza Vickers, uma queda de 2,80% em relação à referência. Isso indica que a combinação de ácido oleico e ultrassom não promoveu melhoria na dureza do compósito. Além disso, como a amostra ZTA+0,25RGO foi preparada sob as mesmas condições da ZTA+OA+US, pode-se inferir que a adição de grafeno foi o fator responsável pelo aumento de 4,29% no valor de dureza observado entre essas amostras.

Tabela 7 – Resultados do ensaio de Dureza Vickers [HV10]

Materiais	Dureza [HV10]
ZTA	1750 ± 14
ZTA+AO+US	1701 ± 23
ZTA+0,25RGO	1774 ± 15

Fonte: Produção do próprio autor.

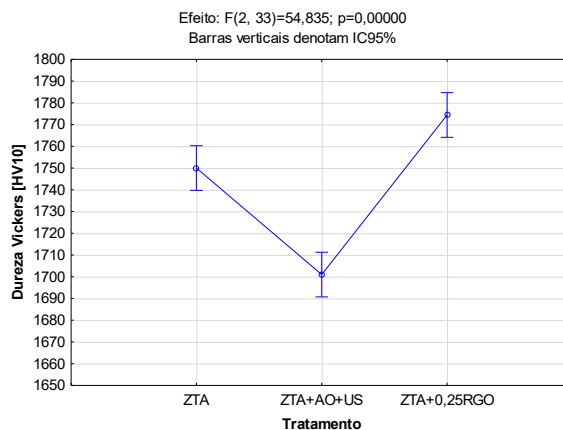
A Tabela 8 apresenta a análise de variância (ANOVA) referente ao ensaio de dureza Vickers, considerando um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). Como o valor de p é inferior a α , verifica-se a existência de diferença estatística significativa entre as amostras. Esse resultado é corroborado pela Figura 3, na qual se observa a ausência de sobreposição entre os intervalos de confiança.

Tabela 8 – ANOVA para o ensaio de dureza Vickers [HV10]

Efeito	SQ	GL	QM	F	p-valor
Média	109219917	1	109219917	357036,9	0,000000
Tratamento	33549	2	16774	54,8	0,000000
Resíduos	10095	33	306		

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 3 – Efeito do tratamento no número de dureza Vickers



Fonte: Produção do próprio autor.

3.4 TENACIDADE À FRATURA

A Tabela 9 apresenta os resultados para o ensaio de tenacidade a fratura por indentação.

Tabela 9 – Resultados de tenacidade à fratura por indentação

Materiais	K_{IC} [MPa.m^{1/2}]
ZTA	3,22 ± 0,15
ZTA+AO+US	3,43 ± 0,23
ZTA+0,25RGO	3,54 ± 0,10

Fonte: Produção do próprio autor.

A Tabela 10 apresenta a análise de variância (ANOVA) referente ao ensaio de tenacidade à fratura por indentação, considerando um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). Verifica-se a existência de diferença estatística significativa entre os materiais ($p < \alpha$).

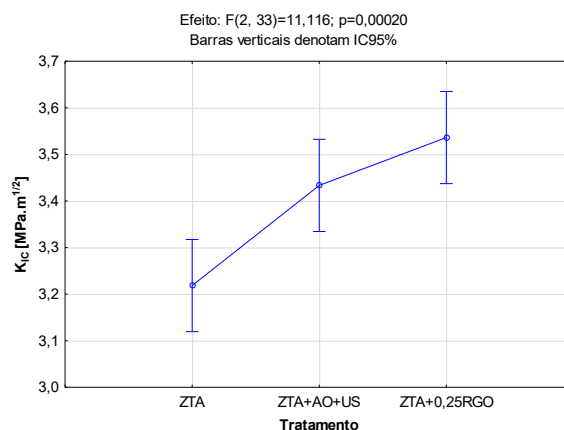
A Figura 4 mostra o efeito do Tratamento sobre a tenacidade à fratura (K_{IC}). Considerando o resultado da amostra ZTA como referência, observam-se aumentos de 6,52% e 9,94% para as amostras ZTA+OA+US e ZTA+0,25RGO, respectivamente. Esses resultados indicam que a aplicação de ácido oleico e ultrassom melhoram essa propriedade, assim como a adição de rGO. Observa-se também que há uma sobreposição entre os intervalos de confiança (IC) para as amostras ZTA+AO+US e ZTA+0,25RGO, o que indica que não há diferença estatística entre essas amostras, valor $p > \alpha$.

Tabela 10 – ANOVA para a tenacidade à fratura por indentação

Efeito	SQ	GL	QM	F	p-valor
Média	415,1825	1	415,1825	14625,19	0,000000
Tratamento	0,6311	2	0,3155	11,12	0,000204
Resíduos	0,9368	33	0,0284		

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 4 – Efeito do tratamento na tenacidade à fratura



Fonte: Produção do próprio autor.

4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstram que todas as amostras atingiram o critério de completa densificação, apresentando porosidade inferior a 2%, o que evidencia a eficiência do processo de sinterização por PECS na obtenção de corpos cerâmicos. As análises microestruturais evidenciaram que o uso de ácido oleico associado ao ultrassom favoreceu a homogeneização da zircônia na matriz de alumina, resultando em microestruturas mais uniformes. Em termos de propriedades mecânicas, a amostra ZTA+0,25RGO apresentou o maior valor de dureza Vickers, com incremento de 1,37% em relação à referência (ZTA), enquanto a ZTA+OA+US exibiu redução de 2,80%. Esse comportamento sugere que a adição de grafeno contribui para o aumento da resistência mecânica. A análise estatística confirmou diferença significativa entre os tratamentos ($p < 0,05$) para a dureza, enquanto, na tenacidade à fratura, as amostras ZTA+OA+US e ZTA+0,25RGO apresentaram desempenho semelhante, sem diferença estatística relevante. De modo geral, conclui-se que a combinação de ácido oleico e ultrassom melhora a dispersão das fases, e a adição de RGO proporciona aumento nas propriedades mecânicas do compósito cerâmico.

5. REFERÊNCIAS

ADAKE, C. et al. Effect of surfactant on dispersion of alumina in photopolymerizable monomers and their UV curing behavior for microstereolithography. **Ceramics International**, v. 41, n. 4, p. 5301-5308, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1327-15**. Standard test method for Vickers indentation hardness of advanced ceramics. West Conshohocken: ASTM, 2015.

ANBAZHAGAN, M.; MICHAEL, A. X. Mechanical and microstructural characterization of graphene reinforced Alumina Ceramic matrix composite. **Results in Engineering**, v. 25, p. 103942, 2025.

ARAGÓN-DUARTE, M. C. et al. Nanomechanical properties of zirconia-yttria and alumina zirconia-yttria biomedical ceramics, subjected to low temperature aging. **Ceramics International**, v. 43, n. 5, p. 3931-3939, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 10545-3**. Placas cerâmicas - Parte 3: Determinação da absorção de água, porosidade aparente, densidade relativa aparente e densidade aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

BONIECKI, M. et al. Alumina/zirconia composites toughened by the addition of graphene flakes. **Ceramics International**, v. 43, n. 13, p. 10066-10070, 2017.

BRONISZEWSKI, K. et al. Properties of alumina-graphene oxide composites. **Materials Today: Proceedings**, v. 2, n. 1, p. 370-375, 2015.

CARREON, H. et al. Characterization of the alumina-zirconia ceramic system by ultrasonic velocity measurements. **Materials Characterization**, v. 60, n. 8, p. 875-881, 2009.

CESARI, F. et al. Fracture toughness of alumina-zirconia composites. **Ceramics International**, v. 32, n. 3, p. 249-255, 2006.

FRANK, I. W. et al. Mechanical properties of suspended graphene sheets. **Journal Of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena**, v. 25, n. 6, p. 2558-2561, 2007.

GAFUR, M. A. et al. Structural and mechanical properties of alumina-zirconia (ZTA) composites with unstabilized zirconia modulation. **Materials Sciences and Applications**, v. 12, n. 11, p. 542-560, 2021.

GERMAN, R. M. **Sintering theory and practice**. Nova York: John Wiley & Sons Inc., 1996.

GRIGORIEV, S. et al. Evaluation of mechanical and electrical performance of aging resistance ZTA composites reinforced with graphene oxide consolidated by SPS. **Materials**, v. 15, n. 7, p. 2419, 2022.

LEE, C. et al. Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene. **Science**, v. 321, n. 5887, p. 385-388, 2008.

LIU, J. et al. Toughening of zirconia/alumina composites by the addition of graphene platelets. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 32, n. 16, p. 4185-4193, 2012.

PASTOR, J. Y. et al. Mechanical properties of directionally solidified $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$ eutectics. **Materials Science and Engineering**, v. A308, p. 241-249, 2001.

RAHAMAN, M. N. **Ceramic processing and sintering**. Nova York: Marcel Dekker Ltd., 2003.

RAHIMIAN, A. et al. Effect of the Evolution of Rheological Behavior over Deagglomeration Time on Optical Transparency of Polycrystalline Alumina Ceramics. **J. Ceram. Sci. Technol**, v. 10, p. 73-9, 2019.

SUZUKI, T. S. et al. Effect of ultrasonication on colloidal dispersion of Al_2O_3 and ZrO_2 powders in pH controlled suspension. **Materials Transactions, JIM**, v. 39, n. 6, p. 689-692, 1998.

SUZUKI, T. S. et al. Effect of ultrasonication on the microstructure and tensile elongation of zirconia-dispersed alumina ceramics prepared by colloidal processing. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 84, n. 9, p. 2132-2134, 2001.

WEN, J. et al. Novel fabrication of more homogeneous water-soluble binder system feedstock by surface modification of oleic acid. **Ceramics International**, v. 42, n. 14, p. 15530-15535, 2016.

ZHAO, J.; AI, X.; HUANG, X. P. Relationship between the thermal shock behavior and the cutting performance of a functionally gradient ceramic tool. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 129, p. 161-166, 2002.

6. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) sob os processos 083/2019, 1066/2022 e 296/2023. Ao LabTecMec-UFES por patrocinar o evento.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.