

EFICIÊNCIA DE MODELOS MICROMECAÑICOS NA OBTENÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPENHO REFORÇADO POR FIBRAS

Daniel Nascimento Campos Dos Anjos

Danyel.nascimento92@hotmail.com

Universidade Federal do Ceará, Campus Crateús

Rodovia BR-226, Km 03, s/n - São Vicente, Crateús-CE, Brasil, CEP: 63700-000

Carlos David Rodrigues Melo

cdavid@crateus.ufc.br

Universidade Federal do Ceará, Campus Crateús

Rodovia BR-226, Km 03, s/n - São Vicente, Crateús-CE, Brasil, CEP: 63700-000

Resumo. Devido as características excepcionais de resistência a compressão, durabilidade e ductilidade, o concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras (CUADRF) apresenta-se como uma alternativa a elaboração de projetos estruturais que possuam condições específicas de elevadas solicitações, seja por ação de agentes deletérios ambientais, proeminentes cargas estruturais ou variações térmicas extremas. Neste cenário, o CUADRF tem sido utilizado preponderantemente em recuperação ou reforço de estruturas. Para que as propriedades do CUADRF sejam integralmente desenvolvidas, demanda-se que sua microestrutura se apresente densa, resultando em um material de baixa porosidade. Em vista disso, a caracterização do comportamento mecânico depende primordialmente da interação entre as diversas fases que compõe a mistura, muitas vezes tornando-se necessária uma análise da microestrutura para definir o desempenho global do material. Dessa forma, o presente artigo visa estudar a obtenção das principais propriedades mecânicas do CUADRF por meio de simulação numérica utilizando uma abordagem micromecânica. Os resultados obtidos são comparados com resultados experimentais e analíticos obtidos na literatura. Os modelos de homogeneização adotados no presente artigo são: Mori-Tanaka, Auto Consistente, Voigt e Reuss. Ao final, os resultados aprontam que os modelos de Mori-Tanaka e Auto Consistente apresentam relativa precisão, subestimando os resultados experimentais do módulo de elasticidade. Enquanto que os modelos de Voigt e Reuss se mostram imprecisos para elevadas frações volumétricas de fibras.

Palavras-chave: Concreto de ultra alto desempenho, Propriedades mecânicas, Micromecânica, Homogeneização.

1. Introdução

O concreto de ultra alto desempenho (CUAD) definido como um material de matriz cimentícia que apresenta resistências à compressão superiores a 150 Mpa [1]; [2], e resistência média à tração de 7 a 10 Mpa [3]. Apesar de sua elevada resistência, o CUAD apresenta um comportamento extremamente frágil com uma perda quase completa de capacidade de carga após a resistência máxima à compressão e à tração ser alcançada [4]. Para conferir um comportamento dúctil ao CUAD pode-se incorporar fibras descontínuas devido a facilidade de inclusão na mistura e a melhora na capacidade de absorção de energia sob impacto ou explosão [5]. Neste caso, o material é denominado concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras (CUADRF) e seu desempenho à tração depende de vários fatores, como qualidade da matriz, orientação das fibras, relação de aspecto e o volume de fibras [6].

Devido as excelentes propriedades mecânicas dos compósitos de fibra e em especial as combinações únicas de baixa densidade com alta resistência e rigidez que esses materiais alcançam, a pesquisa sobre as propriedades mecânicas dos compósitos aumentou substancialmente [7]. Diversos estudos buscam através de métodos experimentais e numéricos prever o comportamento mecânico e estrutural de elementos fabricados com CUADRF de acordo com a influência das propriedades das fibras [8];[9][10];[11];[12];[13];[14];[15]. Dentre estes trabalhos, destaca-se a abordagem micromecânica adotada por Kang e Kim [12] onde os resultados previstos pela análise foram comparados com os resultados experimentais apresentando concordância satisfatória. O principal objetivo dessas técnicas micromecânicas é deduzir o comportamento macroscopicamente homogêneo (propriedades efetivas e leis constitutivas) através das propriedades envolvidas no nível microscópico [16].

Dessa forma, o presente artigo propõe-se, por meio de modelos micromecânicos, realizar uma modelagem numérica das principais propriedades mecânicas do CUADRF e subsequentemente analisar sua eficiência por meio da comparação com resultados experimentais e analíticos obtidos da literatura. Por conseguinte, analisa-se o comportamento dos modelos micromecânicos por meio da análise do módulo de elasticidade para diversas frações volumétricas de fibras metálicas incorporada na mistura

2. Concreto de Ultra Alto Desempenho Reforçado com Fibras

No CUADRF, a evolução das propriedades mecânicas e durabilidade é proporcionada pelo denso empacotamento granular resultante da mistura em proporções otimizadas de cimento Portland, sílica ativa e areia fina [17], enquanto a incorporação de fibras de aço reduz a ocorrência de fissuras devido a diferente tensão de tração da fibra em relação a mistura [3] e permite o uso em elementos estruturais que necessitem de ductilidade sem o necessário emprego de armaduras passiva ou ativa [18].

Para o CUADRF, a caracterização da interação entre a matriz e as fibras é de significativa importância visto que uma maior resistência à compressão em uma matriz de ultra alta resistência tende a aumentar a fragilidade [19]. A distribuição das fibras tem um efeito significativo nas propriedades mecânicas do CUADRF, em particular, o comportamento mecânico pode ser afetado pela orientação, comprimento, forma e interação com partículas agregadas [13].

Yoo e Banthia [5] constataram que a adição de fibras de aço melhora o comportamento a compressão, tração e flexão conforme o aumento da quantidade de fibras e a adição de fibras de aço longas e retas aumenta a capacidade de absorção de energia e a resistência ao impacto na tração e flexão. Tal comportamento depende da adição de fibras em quantidades adequadas na matriz, que além de melhorar ligeiramente a resistência à compressão, leva a um comportamento pseudo-plástico à tração, resultante do processo de multi-microfissuramento [20]. Além disso, como o CUADRF não inclui agregados graúdos e exibe alta fluidez, a orientação e a dispersão das fibras de aço podem depender da direção do fluxo devido à sequência de lançamento ou à forma da estrutura [21].

A aplicação mais promissora do CUADRF atualmente é a reabilitação de elementos estruturais, permitindo maior durabilidade e redução de manutenção [22]. O CUADRF atua aumentando a resistência da estrutura à ação dos esforços solicitantes e como proteção contra impactos, ação do fogo, desgaste devido à ação das intempéries, impedindo o ingresso de agentes agressivos por meio de uma

barreira de proteção [23]. No entanto, as aplicações do CUADRF são limitadas devido ao alto custo de sua fabricação atribuído, entre outras coisas, ao volume de fibras de aço [24].

3. Micromecânica e homogeneização

3.1 Teoria dos campos médios e princípio da inclusão equivalente de Eshelby

Segundo Hori e Nemat-Nasser [25] Os métodos de análises para obtenção das propriedades efetivas dos materiais mais comumente utilizados são baseados no princípio da inclusão equivalente de Eshelby [26], que considera uma inclusão elipsoidal isolada em um domínio uniforme infinitamente estendido. O trabalho desenvolvido por Eshelby deu origem a teoria dos campos médios, que baseia-se na obtenção das propriedades mecânicas efetivas através da relação entre as médias volumétricas da tensão e deformação de amostras microscopicamente heterogêneas [27].

O princípio da inclusão equivalente de Eshelby, substitui o corpo heterogêneo inicial por um corpo homogêneo dentro do qual é prescrito um campo de deformação fictício denominado tensão residual (*eigenstrain*), que representa a deformação devido a heterogeneidades existentes no material [28]. Eshelby relaciona por meio de um tensor de quarta ordem a deformação uniforme sobre a inclusão (*eigenstrain*) com a deformação total sobre a inclusão devido a influência restritiva imposta pela matriz em seu entorno. Ao final, os campos de tensão e deformação no campo homogeneizado são mecanicamente equivalentes aos do campo não homogêneo original [28].

3.2 Modelo de Mori-Tanaka

O modelo de Mori-Tanaka baseia-se no princípio da inclusão equivalente de Eshelby e em um lema desenvolvido por Mori e Tanaka [29] que demonstra que a deformação média em uma matriz elipsoidal, a qual está circunscrita uma inclusão elipsoidal sujeita a uma deformação (*eigenstrain*), é nula. Segundo Costa [30] a metodologia do modelo consiste em substituir as inclusões do compósito por uma única inclusão com fração volumétrica e condições de contorno equivalentes, e em seguida aplicar o princípio da inclusão equivalente para obter o tensor de rigidez do material efetivo que permite determinar as propriedades do material. A Eq. (1) apresenta o tensor efetivo homogeneizado C^{hom} em que f_i representa a fração volumétrica de fibras, C_m e C_i são respectivamente os tensores constitutivos da matriz e das fibras e A_m e A_i são respectivamente os tensores de concentração da matriz e das fibras.

$$C^{\text{hom}} = [f_i C_i : A_i + (1 - f_i) C_m] : A_m. \quad (1)$$

3.3 Modelo Auto Consistente

Assim como o modelo de Mori-Tanaka, o modelo Auto Consistente considera o princípio da inclusão equivalente de Eshelby e uma inclusão única envolvida por um meio infinito. Porém a abordagem adotada difere-se por considerar que o meio infinito é constituído pelo meio homogeneizado efetivo [31]. Assim, o modelo Auto Consistente consiste na determinação implícita do tensor efetivo homogeneizado por meio de solução iterativa apresentada na Eq. (2), onde S o tensor de Eshelby para fibras cilíndricas, n representa a variável contadora e I representa o tensor identidade.

$$C_{n+1}^{\text{hom}} = C_m + f_i (C_i - C_m) : [I - S : (C_n^{\text{hom}})^{-1} : (C_n^{\text{hom}} - C_i)]^{-1}. \quad (2)$$

3.4 Limites variacionais

Voigt [32] e Reuss [33] apresentaram modelos para prever as propriedades efetivas dos materiais compósitos com base em princípios variacionais. Voigt [32] assume que as fases constituintes possuem deformações uniformes e iguais enquanto Reuss [33] assume que as fases constituintes suportam tensões uniformes e iguais. No trabalho desenvolvido por Hill [34], verifica-se que os modelos

de Voigt e Reuss representam respectivamente o limite superior e inferior da propriedade efetiva analisada. De acordo com as condições de compatibilidade atribuídas, obtém-se as Eq. (3) e Eq. (4) para determinar a propriedade efetiva P_{efe} segundo os modelos de Voigt e Reuss respectivamente, onde P_m e P_f representam o valor numérico da propriedade analisada da matriz e das fibras.

$$P_{efe} = P_i f_i + P_m f_m, \quad (3)$$

$$P_{efe} = \frac{P_i P_m}{(1 - f_i) P_i + f_i P_m}. \quad (4)$$

4. Aplicações Numéricas

Para a análise comparativa dos parâmetros mecânicos do CUADRF, considerou-se os resultados experimentais obtidos no trabalho desenvolvido por El-Din [35] a partir da modelagem de vários grupos de corpos de prova. Para o grupo 1 os corpos de prova foram fabricados sem fibras, já os grupos 2, 4 e 6 tiveram reforço com fração volumétrica de fibras de aço de respectivamente 1%, 2% e 3% com razão de aspecto igual a 30. Além disso, considerou-se a previsão analítica do módulo de elasticidade do CUADRF apresentado por Alsalman [36], com base na correlação entre a resistência à compressão e o módulo de elasticidade de 226 amostras, por meio da Eq. (5) em que E_c e f_c representam o módulo de elasticidade e a resistência à compressão do CUADRF ambos em MPa.

$$E_c = 8010(f_c)^{0,36}. \quad (5)$$

A Fig. 1 e Fig. 2 apresentam respectivamente a comparação entre os resultados experimentais e analítico da literatura com os modelos micromecânicos do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson. Salienta-se que o grupo 1, que não obteve reforço de fibras, representa a matriz e obteve experimentalmente um módulo de elasticidade de 45,2 GPa e um coeficiente de poisson de 0,198.

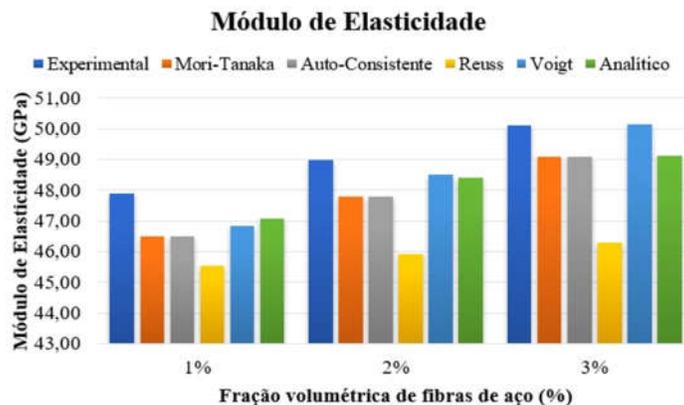


Figura 1. Resultados experimentais, micromecânicos e analíticos do módulo de elasticidade

Para os modelos Mori-Tanaka e Auto Consistente a diferença percentual para os valores experimentais do módulo de elasticidade varia entre 2% e 3% enquanto para os modelos de Voigt e Reuss observa-se que a amplitude entre os limites inferior e superior aumenta conforme se eleva a fração volumétrica de fibras de aço, verificando-se portanto a imprecisão destes modelos. O resultado analítico difere-se minimamente dos modelos Mori-Tanaka e Auto Consistente e está limitado a disponibilidade dos dados de resistência à compressão da amostra experimental.

A incorporação de um teor de 3% de fibras metálicas produz um material com 8,6% maior rigidez evidenciando a importância das fibras na dosagem adequada do CUADRF.

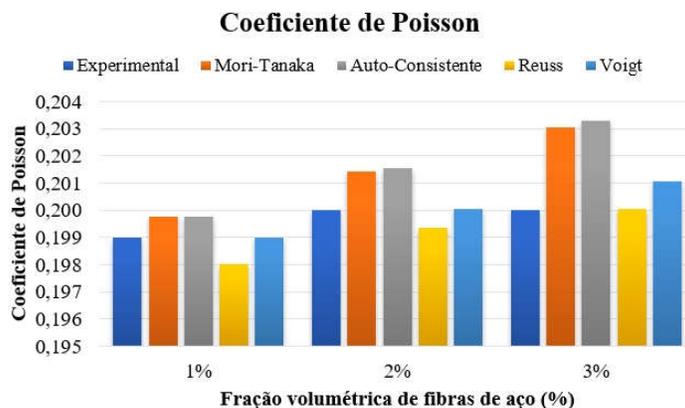


Figura 2. Resultados experimentais, micromecânicos e analíticos do Coeficiente de Poisson

Os resultados para o coeficiente de Poisson denotam pouca variabilidade devido ao baixo teor de fibras, além disso, observa-se que os resultados micromecânicos e experimentais não respeitaram os limites de Voigt e Reuss, mostrando-se que a análise bifásica destes modelos não é eficaz para a análise do Poisson, além de possíveis erros experimentais devido a compactação inadequada dos corpos de prova. A Fig. 3 mostra a evolução do módulo de elasticidade por fração volumétrica de fibras de aço.

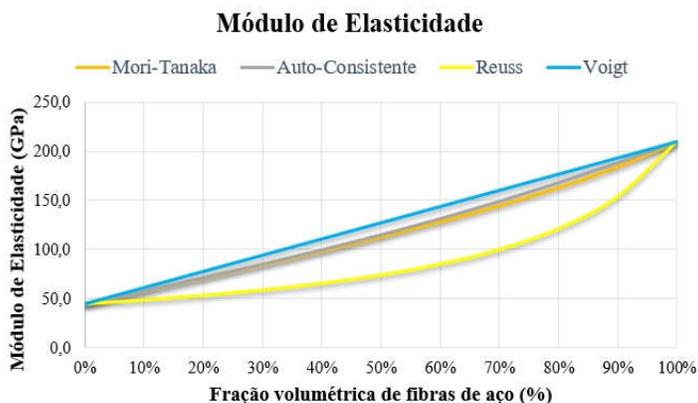


Figura 3. Análise micromecânica do módulo de elasticidade do CUADRF por fração volumétrica

Os resultados demonstram a similaridade entre os modelos de Mori-Tanaka e Auto Consistente que como esperado se apresentam dentro dos limites estabelecidos pelos modelos de Voigt e Reuss além disso, denotam a influência positiva da inclusão de fibras na mistura obtendo-se um módulo de elasticidade 28% superior para uma inclusão de 10% de fibras metálicas.

5. Conclusões

Na presente trabalho, os resultados apontam que os modelos de Voigt e Reuss devem ser evitados como um método de homogeneização para valores elevados da fração volumétrica de fibras, porém podem indicar a confiabilidade de outros modelos micromecânicos. Já os modelos micromecânicos baseados na teoria dos campos médios além de serem mais precisos que os de Voigt e Reuss, subestimam o módulo de elasticidade experimental a uma taxa tolerável, favorecendo a adoção de projetos seguros e econômicos em contraponto da necessidade de um processo extenso e dispendioso para verificação de uma dosagem experimental adequada. Ademais, a análise considerando uma fase de transição entre as fibras e a matriz pode produzir resultados mais precisos para os parâmetros mecânicos.

Referências

- [1] P. Richard and M. Cheyrezy, "Composition of reactive powder concretes," *Cem. Concr. Res.*, vol. 25, no. 7, pp. 1501–1511, 1995.
- [2] AFGC, "Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes, Recommendations", Revised Edition, June 2013, 357 p.
- [3] M. Zhou, W. Lu, J. Song, and G. C. Lee, "Application of Ultra-High Performance Concrete in bridge engineering," *Constr. Build. Mater.*, vol. 186, pp. 1256–1267, 2018.
- [4] Kim SW, Kang ST, Park JJ, Ryu GS, "Effect of filling method on fibre orientation and dispersion and mechanical properties of UHPC". Proceedings of Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete: Kassel, Germany (Kassel University Press), p.185-192, 2008.
- [5] D. Y. Yoo and N. Banthia, "Mechanical and structural behaviors of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete subjected to impact and blast," *Constr. Build. Mater.*, vol. 149, pp. 416–431, 2017.
- [6] J. Wuest, E. Brühwiler, and E. Denarié, "Model for predicting the UHPFRC tensile hardening response," *Second Int. Symp. Ultra High Perform. Concr.*, no. 10, pp. 153–160, 2008.
- [7] Hale. D. K., "Review The physical properties of composite materials," *J. Mater. Sci.*, vol. 11, pp. 2105--2141, 1976.
- [8] D. Y. Yoo, S. T. Kang, and Y. S. Yoon, "Effect of fiber length and placement method on flexural behavior, tension-softening curve, and fiber distribution characteristics of UHPFRC," *Constr. Build. Mater.*, vol. 64, pp. 67–81, 2014.
- [9] D. Y. Yoo, J. H. Lee, and Y. S. Yoon, "Effect of fiber content on mechanical and fracture properties of ultra high performance fiber reinforced cementitious composites," *Compos. Struct.*, vol. 106, pp. 742–753, 2013.
- [10] K. Wille, D. J. Kim, and A. E. Naaman, "Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 44, no. 3, pp. 583–598, 2011.
- [11] D. J. Kim, S. H. Park, G. S. Ryu, and K. T. Koh, "Comparative flexural behavior of Hybrid Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete with different macro fibers," *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, no. 11, pp. 4144–4155, 2011.
- [12] S. T. Kang and J. K. Kim, "The relation between fiber orientation and tensile behavior in an ultra high performance fiber reinforced cementitious composites (UHPFRCC)," *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, no. 10, pp. 1001–1014, 2011.
- [13] S. J. Barnett, J. F. Lataste, T. Parry, S. G. Millard, and M. N. Soutsos, "Assessment of fibre orientation in ultra high performance fibre reinforced concrete and its effect on flexural strength," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 43, no. 7, pp. 1009–1023, 2010.
- [14] D. Y. Yoo and Y. S. Yoon, "Structural performance of ultra-high-performance concrete beams with different steel fibers," *Eng. Struct.*, vol. 102, pp. 409–423, 2015.
- [15] D. Y. Yoo, N. Banthia, and Y. S. Yoon, "Predicting the flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 74, pp. 71–87, 2016.
- [16] F. Nicot, N. P. Kruyt, and O. Millet, "On Hill's lemma in continuum mechanics," *Acta Mech.*, vol. 228, no. 5, pp. 1581–1596, 2017.
- [17] R. J. Thomas and A. D. Sorensen, "Review of strain rate effects for UHPC in tension," *Constr. Build. Mater.*, vol. 153, pp. 846–856, 2017.
- [18] P. V. C. N. Gama and T. N. Bittencourt, "Viabilidade econômica do concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras aplicado em torres eólicas de concreto protendido para sustentação de uma turbina de 5 MW," *Rev. IBRACON Estruturas e Mater.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–29, 2017.
- [19] Y. Lee, S. T. Kang, and J. K. Kim, "Pullout behavior of inclined steel fiber in an ultra-high strength cementitious matrix," *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 10, pp. 2030–2041, 2010.
- [20] A. Spasojević, "Structural implications of ultra-high performance fibre-reinforced concrete in bridge design". (Ph.D thesis) , École Polytechnique Federale de Lausanne, Switzerland:Publisher, vol. 4051, 2008.
- [21] I. H. Yang, C. Joh, and B. S. Kim, "Structural behavior of ultra high performance concrete beams subjected to bending," *Eng. Struct.*, vol. 32, no. 11, pp. 3478–3487, 2010.
- [22] T. E. T. Buttignol, J. L. A. O. Sousa, and T. N. Bittencourt, "UHPFRC : a review of material properties and design procedures," *IBRACON Struct. Mater.*, vol. 10, no. 4, pp. 957–971, 2017.
- [23] T. E. T. Buttignol, J. F. Fernandes, J. L. A. O. Sousa, and T. N. Bittencourt, "Aplicações do

- Concreto de Ultra Alto Desempenho (CUAD) em obras de reforço e recuperação de estruturas,” *An. do 60º Congr. Bras. do Concreto*, no. 1, pp. 1–14, 2018.
- [24] D. Y. Yoo, N. Banthia, and Y. S. Yoon, “Impact resistance of reinforced ultra-high-performance concrete beams with different steel fibers,” *ACI Struct. J.*, vol. 114, no. 1, pp. 113–124, 2017.
- [25] M. Hori and S. Nemat-Nasser, “Double-inclusion model and overall moduli of multi-phase composites,” *Mech. Mater.*, vol. 14, no. 3, pp. 189–206, 1993.
- [26] J. D. Eshelby, “The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems” *Collect. Work. J. D. Eshelby*, pp. 209–229, 2007.
- [27] M. Hori and S. Nemat-Nasser, “On two micromechanics theories for determining micro-macro relations in heterogeneous solids,” *Mech. Mater.*, vol. 31, no. 10, pp. 667–682, 1999.
- [28] S. Li and G. Wang, *Introduction to Micromechanics and Nanomechanics*, no. January. 2013.
- [29] M. T and T. K, “Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions,” *Acta Metall.*, vol. 21, no. 5, pp. 571–574, 1973.
- [30] COSTA, Esdras Jonathan Honorato. Homogeneização de compósitos reforçados por fibras considerando efeitos de interfaces. 2017. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2017.
- [31] A. H. Barbosa, P. A. Lopez-Yanez, and A. M. P. Carneiro, “Contribuição Ao Estudo Sobre a Obtenção Do Módulo De Elasticidade Do Concreto,” *Rev. IBRACON Estruturas e Mater.*, vol.4, n.5, pp.863-881, 2011.
- [32] W. Voigt, Ueber die Beziehung zwischen den beiden Elasticitätsconstanten isotroper Körper”. *Ann. Phys.*, 274: 573-587 1889.
- [33] A. Reuss, "Berechnung der Fließgrenze von Mischkristallen auf Grund der Plastizitätsbedingung für Einkristalle". *ZAMM—Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 9, 49-58, 1929.
- [34] D. A. Silverston, R. E. Siday, D. A. Silverston, F. C. Frank, and A. N. Stroh, “Related content The Elastic Behaviour of a Crystalline Aggregate,” vol. 2, 1952.
- [35] H. S. El-Din, H. Mohamed, M. A. E.-H. Khater, and S. Ahmed, “Effect of Steel Fibers on Behavior of Ultra High Performance Concrete,” no. 2004, pp. 1–10, 2016.
- [36] A. Alsalman, C. N. Dang, G. S. Prinz, and W. M. Hale, “Evaluation of modulus of elasticity of ultra-high performance concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 153, pp. 918–928, 2017.