

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO REFORÇADA COM FIBRAS DE AÇO

Julia Azevedo Marques de Souza¹; Januário Pellegrino Neto²

¹ Aluna de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM-CEUN-IMT);

² Professor da Escola de Engenharia Mauá (EEM-CEUN-IMT).

Resumo. *O presente trabalho tem como objetivo obter um modelo mesoescala utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF). Por meio da modelagem do comportamento pós-fissuração do concreto armado reforçado com fibra de aço, correlacionada com as recomendações e projeto propostas pelo fib Model Code 2010. Um estudo teórico inicial será necessário para que se entenda e compreenda o funcionamento do método e os resultados que se apresentarão. A base de toda a modelagem necessitará que a representação de cada elemento do compósito (matriz cimentícia, fibras e interação fibra-matriz) seja independente. A interação fibra-matriz é obtida através dos elementos finitos com interação não rígida. Para descrever o comportamento das fibras elas são particionadas em elementos finitos de treliça e modelo constitutivo elastoplástico, já a matriz cimentícia pode ser representada através de um modelo contínuo baseado na mecânica do dano ou através de um modelo descontínuo utilizando a fragmentação de malha. Dessa maneira será analisada a eficiência da modelagem computacional e a sua implementação em projetos de vigas de compósitos cimentícios na resistência ao cisalhamento consequente da força cortante.*

Introdução

O concreto possui uma série de propriedades que o tornam o material estrutural mais utilizado no mundo. Entre as principais vantagens, além das mudanças ilimitadas na forma das peças moldadas, o baixo custo e a capacidade de adaptação às diversas condições de produção também podem ser listadas. No entanto, o concreto apresenta algumas limitações, como a baixa relação resistência-peso e o fato de a qualidade só ser verificada após a fabricação dos componentes estruturais. Além disso, o concreto simples apresenta fragilidade evidente e baixa capacidade de deformação antes da fratura quando submetido a esforços de tração, sendo necessário, portanto, a concepção de tecnologias alternativas, como o concreto armado, no qual essas limitações podem ser compensadas com a armadura de aço. Recentemente, novas possibilidades surgiram para fortalecer o concreto usando fibras.

Os materiais compósitos à base de cimento reforçados com fibras (CCRF) são caracterizados por uma matriz de cimento e fibras discretas distribuídas aleatoriamente na matriz. Nos últimos anos, o uso de CCRF em edificações civis tem aumentado muito, principalmente devido ao aumento da resistência residual à tração proporcionada pela adição de fibras no estado pós-fissurado e ao aumento da deformabilidade dos materiais compósitos. Na construção civil, a matriz de cimento é feita de concreto ou argamassa, e as fibras comumente utilizadas são aço, polímero, carbono, vidro ou fibras naturais. Atualmente, sabe-se que a adição de uma pequena quantidade de fibra pode aumentar a ductilidade e a tenacidade da base de cimento. Após as fissuras da matriz de gel, o papel principal da fibra é mais evidente, neste momento, a fibra oferece resistência à propagação de fissuras através da transferência de tensões entre as superfícies das fissuras.

A fib (Fédération Internationale du Béton), publicou o fib Model Code 2010, contemplando concreto reforçado com fibras de aço como material estrutural, podendo inclusive substituir parte da armadura convencional por fibras para casos envolvendo estado limite último. Contudo, a aplicação do material exige ensaios laboratoriais para caracterizar o

comportamento do compósito com a mesma composição de materiais (fibras e matriz cimentícia) a ser utilizado.

Por este motivo, pesquisas recentes começaram a investigar a utilização de modelos em multiescala que representam os constituintes do material na sua forma e distribuição, a fim de representar o comportamento material levando em conta de forma natural e direta as principais propriedades que influenciam o seu comportamento mecânico.

O objetivo principal deste trabalho de pesquisa é desenvolver um modelo multiescala, que é utilizado para simular a resposta pós-fissuração de compósitos à base de concreto reforçado com fibra de aço, com o propósito de aplicá-lo ao projeto de elementos estruturais.

Para atingir o objetivo geral desse trabalho, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- Desenvolvimento de simulação computacional do ensaio EN14651, que visa caracterizar a resposta pós-fissuração de CCRFA e estudo das propriedades do compósito (tipo de fibra, distribuição das fibras e matriz cimentícia) que influenciam nos resultados do ensaio;
- Utilização de resultados de ensaios laboratoriais de alguns dos modelos computacionais.

Materiais e Métodos

O programa de modelagem computacional definido com materiais multiescala é utilizado como plataforma básica para a realização deste trabalho estritamente no âmbito da mecânica computacional. Dentre os principais recursos que serão desenvolvidos e poderão ser utilizados na plataforma, destacam-se os seguintes:

- O desenvolvimento de algoritmos de integração implícito-explícito visa evitar problemas de convergência em problemas altamente não lineares, como na simulação de múltiplas fissuras em materiais fibrosos;
- O método de acoplamento de grades não qualificadas, que é essencial para a expressão descontínua e descontínua das fibras de aço;
- Método de quebra de malha de elemento finito que expressa múltiplas fissuras por representação descontínua;
- Modelagem de vigas CCRFA, na qual serão utilizadas ferramentas numéricas para modelar vigas de concreto armado, e os resultados obtidos serão comparados com as sugestões de projeto propostas pelo *fib* Model Code 2010. A Figura 2 ilustra a plataforma de cálculo da modelagem usando vigas de concreto reforçado com fibras. É importante notar que uma estratégia multiescala que reduz os custos computacionais pode ser usada, onde apenas a região de interesse é modelada - Figura 1 (b).

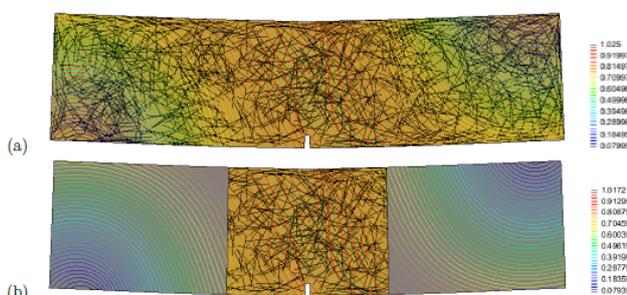


Figura 1 - Modelagem computacional de uma viga: (a) modelo mesoescala; e (b) modelo multiescala.

A pesquisa será desenvolvida na plataforma computacional Solver + GiD. O solver é um programa para análise numérica via método dos elementos finitos (MEF), no qual toda a formulação básica para modelagem multiescala de CCRFA foi desenvolvida e implementada,

no âmbito do doutorado do orientador, acoplado ao pré e pós-processador GiD, desenvolvido pelo CIMNE - International Center for Numerical Methods in Engineering da Universitat Politècnica de Catalunya (Barcelona-Espanha). O programa GiD foi escolhido devido aos inúmeros recursos disponíveis para as etapas de pré e pós-processamento de simulações numéricas, além de possuir uma interface gráfica amigável com o usuário.

A Figura 2 ilustra a integração entre os programas, a qual permite que as modelagens computacionais sejam realizadas utilizando uma única interface gráfica.

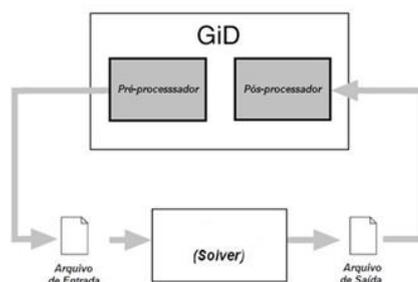


Figura 2 - Integração GiD-Solver

O fib Model Code fornece uma diretriz para a modelagem de componentes estruturais em concreto reforçado com fibras de aço no Estado Limite de Serviço (ELS) e Estado Limite Último (ELU). No ELS, as fibras são introduzidas para reduzir a largura e espaçamento das rachaduras melhorando a durabilidade estrutural, enquanto no ELU, as fibras podem substituir parcialmente, ou até totalmente os reforços estruturais convencionais.

Simulação numérica para ensaios de flexão de três pontos – EN 14651

Para caracterizar o comportamento do CCRFA, uma série de vigas foram ensaiadas experimentalmente no Laboratório de Estruturas e Materiais Estruturais na Universidade de São Paulo (Figura 3). Os ensaios foram conduzidos de acordo com a EN 14651 (2005) em vigas prismáticas com comprimento de vão de 500 mm, comprimento total de 550 mm e seção transversal de 150 x 150 mm². Um total de 12 vigas foram ensaiadas, quatro de cada contendo 15 kg/m³, 30 kg/m³ e 45 kg/m³ (0,19; 0,38 e 0,58% do volume total das vigas, respectivamente). A Tabela 1 resume as propriedades geométricas e mecânicas das fibras de aço utilizadas.



Figura 3 - configuração das vigas de flexão de três pontos ensaiadas de acordo com a EN 14651 (2005).

Tabela 1 – Propriedades geométricas e mecânicas das fibras de aço

Tipo de Fibra	DRAMIX® RC 80/60 BN
Comprimento l_F	60 mm
Diâmetro d_F	0,75 mm
Tensão de ruptura σ_Y	1225 MPa
Módulo de Young E_F	210 GPa

Para a modelagem os parâmetros adotados na análise são resumidos na Tabela 2. A resistência característica do concreto à compressão, f_{ck} , foi obtida experimentalmente, enquanto o módulo de Young, E_C , e o coeficiente de Poisson, ν , foram estimados usando as recomendações do *fib* Model Code 2010. A resistência à tração axial (tração direta), f_{ct} , e a energia de ruptura, G_f , foram definidas calibrando o modelo numérico para ajustar a resposta experimental média para um teor de fibra de 30 kg/m³ no ensaio de flexão de três pontos. Os parâmetros A⁻ e B⁻ são valores típicos para o concreto, como recomendado por Cervera et al. (1996).

Tabela 2 – Parâmetros do concreto para os ensaios de flexão de três pontos- EN 14651

Resistência característica do concreto à compressão f_{ck}	35 MPa
Resistência à tração axial f_{ct}	2,35 MPa
Módulo de Young E_C	35 GPa
Coefficiente de Poisson ν	0,2
Energia de ruptura G_f	100 N/m
Parâmetros compressivos	A ⁻ = 1,0 e B ⁻ = 0,89

Resultados e Discussão

Os modelos mesoescala e multiescala obtidos são ilustrados na Figura 4. Nos subdomínios da macroescala, o CCRFA é considerado um material isotrópico elástico homogêneo caracterizado pelos parâmetros efetivos do material. A teoria da mistura (Truesdell e Toupin, 1960) foi empregada para o cálculo desses parâmetros (módulo de Young e coeficiente de Poisson) de acordo com a relação:

$$P_{ef} = V_F P_F + V_C P_C$$

onde P_{ef} é o módulo de Young efetivo (E_{ef}) ou o coeficiente de Poisson efetivo (ν_{ef}); P_F e P_C são o módulo de Young ou o coeficiente de Poisson das fibras e do concreto, respectivamente; enquanto V_F e V_C são a fração de volume das fibras e do concreto, respectivamente. Portanto, nas regiões de macroescala foram adotados um módulo de Young de $E_{ef} = 35600$ MPa e coeficiente de Poisson de $\nu_{ef} = 0,2$

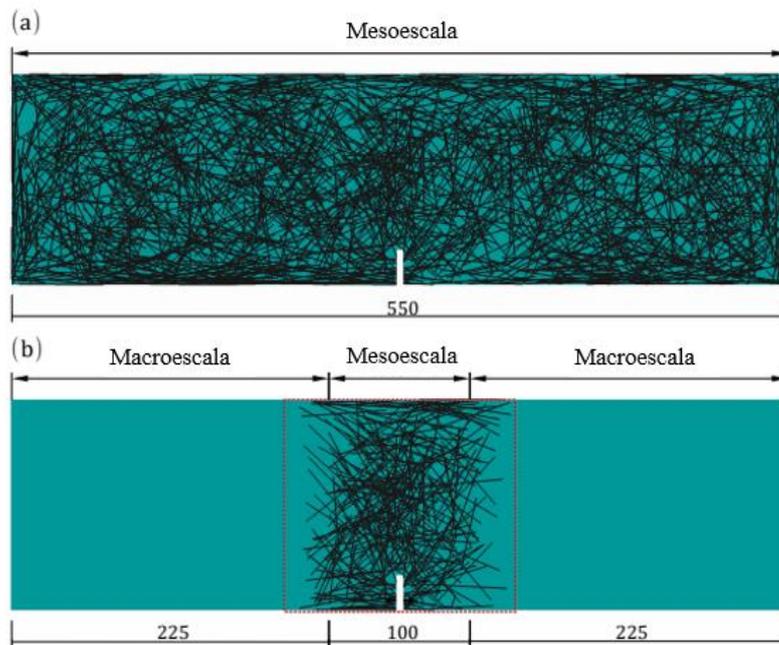


Figura 4 - Viga de flexão de três pontos para teor de fibra de 30 kg/m^3 simulada usando: (a) modelo mesoescala e (b) modelo multiescala (dimensões em mm).

Nas regiões de mesoescala, as fibras de aço são representadas individualmente. Consequentemente, os parâmetros materiais do concreto, fibras e da interação concreto-fibra são definidos separadamente de acordo com a Tabela 4, apresentada anteriormente.

O modelo multiescala proposto foi aplicado para simular vigas de flexão de três pontos para diferentes teores de fibra e obter o efeito do teor e distribuição das fibras. A distribuição das fibras para os três casos analisados é retratada na Figura 5.

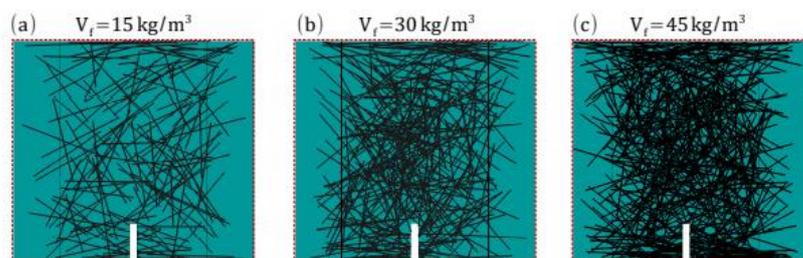


Figura 5 - Distribuição das fibras para os três teores considerados: (a) 15 kg/m^3 ; (b) 30 kg/m^3 e (c) 45 kg/m^3

Os resultados numéricos obtidos para os três teores estão apresentados da Figura 6 adotando duas regras para a interface concreto-fibra. A resposta para o concreto simples também é detalhada para realçar a contribuição das fibras.

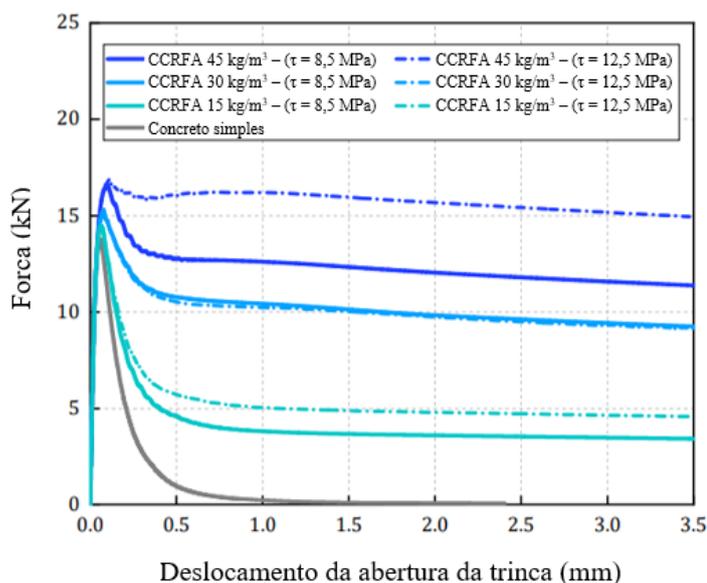


Figura 6 - Curvas da força pelo deslocamento da abertura da trinca. Respostas numéricas para os três teores de fibra diferentes (15 kg/m³, 30 kg/m³ e 45 kg/m³) adotando duas regras de interface e para o concreto simples.

As vigas simplesmente apoiadas sob flexão de quatro pontos são projetadas de acordo com *fib* Model Code (Figura 7). Quatro configurações de reforço são calculadas: uma viga de concreto reforçado (usada como referência) e três vigas de concreto reforçadas com os mesmos teores de fibra apresentado no modelo anterior (15 kg/m³), 30 kg/m³ e 45 kg/m³). Esses modelos são considerados na etapa de pós-fissuração e são definidos com base nos valores médios dos testes de caracterização do CCRFA.

A Figura 7 mostra a geometria, as condições de contorno e o esquema de carregamento para uma carga total considerada de $F = 123$ kN. Os espécimes têm 125 mm de largura, 250 mm de profundidade, comprimento total de 2000 mm com vão de 1800 mm e cobrimento de 25 mm.

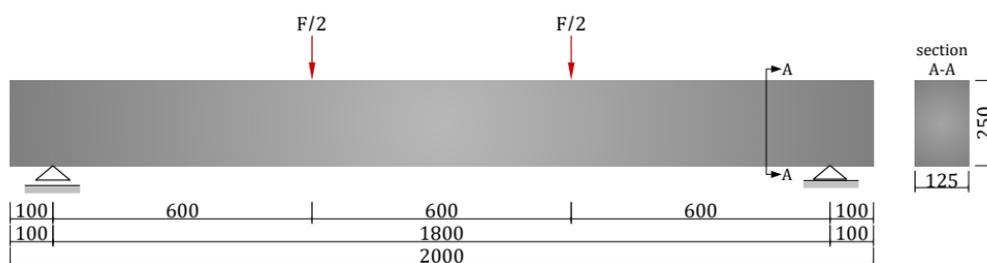


Figura 7- Configuração do ensaio de flexão de quatro pontos: geometria, condições de contorno e carregamentos

Os valores nominais das propriedades CCRFA usados para projetar as vigas CR-CCRFA são baseados nos resultados dos testes de flexão de três pontos descritos anteriormente. Um resumo dos diagramas em termos de força x respostas do deslocamento da abertura da trinca para os três conteúdos de fibra é ilustrado na Figura 8. Conforme verificado nesta figura, três curvas, uma experimental e duas respostas numéricas para cada conteúdo de fibra são consideradas. As curvas experimentais correspondem às respostas médias obtidas em testes de laboratório (linhas cinzas).

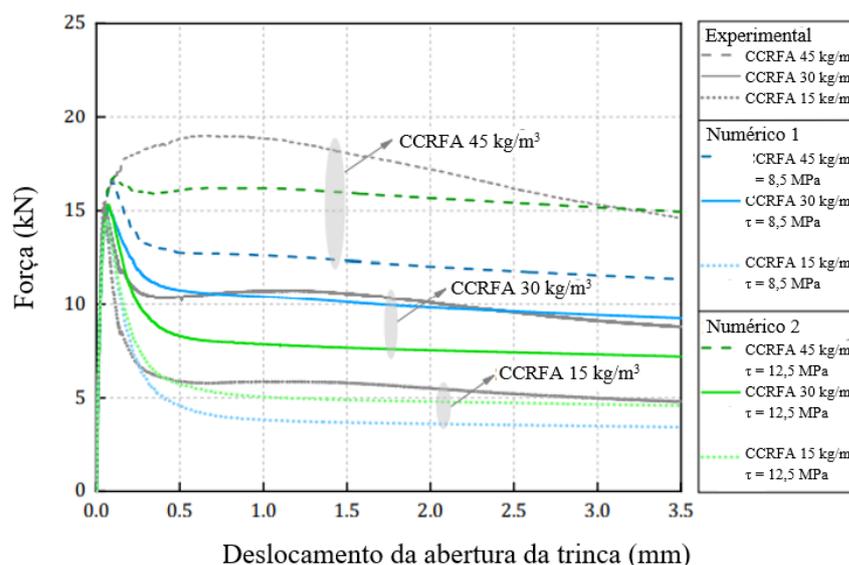


Figura 8 – Curvas de força x deslocamento da trinca experimental e respostas numéricas para 15 kg/m³, 30 kg/m³ e 45 kg/m³.

O espaçamento médio das trincas é estimado conforme as previsões do *fib* Model Code e os resultados são apresentados na Figura 9. Os resultados ilustram o efeito da adição de fibras no concreto, a distância entre as trincas s_{rm} é diminuída; por exemplo, a viga com teor de fibra de 45 kg/m³ apresenta uma redução de 62% na s_{rm} quando comparada com a viga de concreto reforçado.

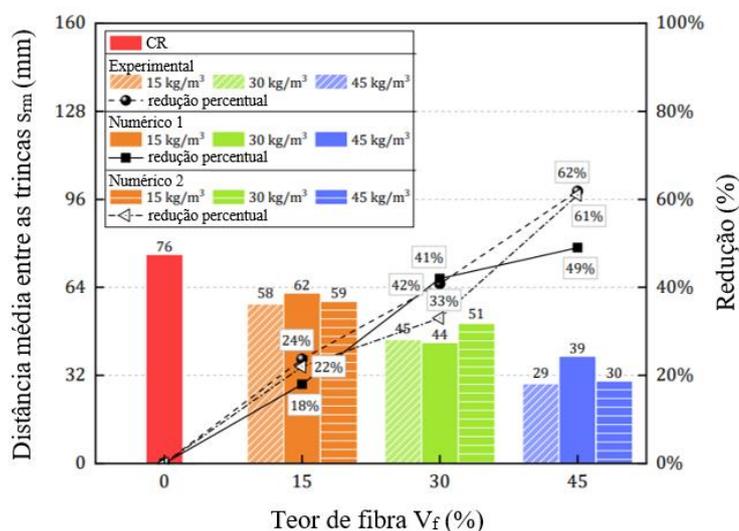


Figura 9 - Distância média entre as trincas s_{rm} de CR, CR-CCRFA para 15 kg/m³, 30 kg/m³, e 45 kg/m³ e a redução percentual quando comparado com o CR a respeito dos resultados experimental, numérico 1 e numérico 2.

Conclusões

Os testes de flexão de três pontos (EN14651, 2005) recomendados pelo *fib* Model Code para caracterizar o comportamento do CCRFA foram analisados numericamente e os

resultados comparados com os experimentais obtidos em laboratório. Três teores de fibra de 15 kg/m^3 , 30 kg/m^3 e 45 kg/m^3 foram considerados e a dosagem intermediária (30 kg/m^3) foi usada para calibrar os parâmetros da interface fibra-concreto. Em seguida, os mesmos parâmetros foram adotados para as simulações dos teores de fibra de 15 e 30 kg/m^3 . Os resultados mostram que apesar da variabilidade das respostas numéricas para as diferentes distribuições de fibras, o comportamento pós-fissuração do CCRFA é bem captado pelo modelo apresentado.

No segundo exemplo, vigas CR e CR-CCRFA foram projetadas e simuladas numericamente. Os resultados numéricos e experimentais dos ensaios EN 14651 obtidos no exemplo anterior foram utilizados no dimensionamento das vigas. Primeiro, uma viga de CR foi projetada e a contribuição da adição de 15 kg/m^3 , 30 kg/m^3 e 45 kg/m^3 de conteúdo de fibra foi avaliada de acordo com fib Model Code. Os resultados mostram que os valores de projeto estimados em termos de flexão, cisalhamento, largura de trinca e espaçamento médio de trinca usando os parâmetros obtidos na simulação numérica de ensaios de flexão de três pontos de acordo com EN 14651 exibem valores semelhantes quando comparados aos que usam a respostas experimentais. Os resultados numéricos são encontrados em boa concordância com as previsões da fib Model Code e mostram o potencial da abordagem numérica para considerar a influência da adição de fibras de aço na resposta do material pós-fissuração e para prever o comportamento dos elementos estruturais.

Referências Bibliográficas

- [1] Cervera, M., Oliver, J.; e Manzoli O. A rate-dependent isotropic damage model for seismic analysis of concrete dams. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 1996.
- [2] EN 14651. *Test method for metallic fiber concrete – Measuring the Flexural Tensile Strength (Limit of Proportionality (LOP), Residual)*. European Committee for Standardization (CEN). Bruxelas, Bélgica, 2005.
- [3] fib Model Code 2010. *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Fédération Internationale du Béton (fib). Berlin, Alemanha, 2013.
- [4] FIGUEIREDO, Antonio Domingues. *Concreto Reforçado com Fibras*. São Paulo, 2011.
- [5] TRINDADE, Yasmin Teixeira. *Numerical modeling of the post-cracking behavior of SFRC and its application on design of beam according to fib Mode Code 2010*. São Paulo, 2018.
- [6] Truesdell, C. e Toupin R. *The Classic Field Theories*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, Alemanha, 1960.