



ARGAMASSA CONTENDO ÓXIDO DE FERRO MAGNÉTICO RECUPERADO DA DRENAGEM ÁCIDA DE MINAS PARA USO EM BLINDAGENS DE RADIAÇÃO

Deuander O. Mello ⁽¹⁾; **Gabriela O. Orlando** ⁽²⁾; **Rodrigo A. Silva** ⁽³⁾;
Richard T. Lermen ⁽⁴⁾; **Djalmo D. S. Neto** ⁽⁵⁾; **Rogério Ferreira Junior** ⁽⁶⁾

(1) Faculdade Meridional – deuander@gmail.com; (2) Faculdade Meridional – gabriela.orlando@hotmail.com;
(3) Faculdade Meridional – rodrigo.silva@imed.edu.br; (4) Faculdade Meridional – richard.lermen@imed.edu.br; (5) Faculdade Meridional – 1112250@imed.edu.br; (6) Faculdade Meridional – rogeriof1998@gmail.com

RESUMO

O reaproveitamento de resíduos na forma de produtos para construção civil além de dar uma destinação aos mesmos ainda auxilia para diminuir o consumo de recursos naturais, reduzir custos e pode acarretar benefícios técnicos, o que fora observado no presente trabalho. Destaca-se a utilização da Drenagem Ácida de Minas – DAM, um efluente do setor de mineração de carvão que causa graves problemas ambientais, para extração de pigmento magnético de óxido de ferro. E que este produto demonstrou ser um material aplicável na composição de argamassas. O material foi utilizado em substituição da areia natural, minimizando impactos do setor de extração. Devido à sua presença, o compósito foi avaliado quanto à participação para blindagem radiológica, sendo produzidas amostras de referência e outras contendo 20% do pigmento recuperado da DAM. As análises ocorreram pela incidência de raios X sobre as amostras e leitura da blindagem e, através disso, foi percebido que a argamassa contendo o óxido magnético recuperado do efluente obteve ganhos de atenuação em relação à convencional de cerca de 13%. Sendo assim, o uso deste material além de acarretar benefícios ambientais, ainda colabora para manter a segurança dos locais que envolvem processos com radiações.

Palavras-chave: argamassa magnética, blindagem de radiação, Drenagem Ácida de Minas – DAM.

MORTAR CONTAINING IRON OXIDE RECOVERED FROM ACID MINE DRAINAGE FOR USE IN RADIATION SHIELDS

ABSTRACT

The reuse of waste in the form of products for civil construction, besides giving a destination to them, also helps to reduce the consumption of natural resources, reduce costs and can bring technical benefits, which was observed in the present work.. We highlight the use of Acid Drainage of Mines - DAM, an effluent from the coal mining sector that causes serious environmental problems, for the extraction of magnetic pigment from iron oxide. And that this product has proved to be an applicable material in the composition of mortars. The material was used in substitution of the natural sand, minimizing impacts of the extraction sector. Due to its presence, the composite was evaluated for participation in radiological shielding, being produced reference samples and others containing 20% of the pigment recovered from DAM. The analyzes were carried out by the X-ray incidence on the samples and reading of the shield and, through this, it was noticed that the mortar containing the recovered magnetic oxide of the effluent obtained gains of attenuation in relation to the conventional one of about 13%. Therefore, the use of this material in addition to bringing environmental benefits, also contributes to maintain the safety of the places that involve processes with radiations.

Key-words: magnetic mortar, radiation shield, Acid Mine Drainage – AMD.



1. INTRODUÇÃO

A construção civil, assim como outros segmentos da indústria, tem buscado realizar o reaproveitamento de materiais potenciais, sendo que, muitos deles são advindos de resíduos. A incorporação destes pode ocorrer com o objetivo de reduzir custos ou potencializar alguma propriedade específica dos materiais e, principalmente, tratar os passivos ambientais.

O carvão mineral tem participação em cerca de 40% da energia elétrica mundial. Porém, em seu processo de extração, os rejeitos são geralmente depositados em torno da mineradora, o que causa problemas em grande escala. O principal resíduo gerado é a pirita (FeS_2), um sulfeto de ferro que, quando exposto ao oxigênio e a umidade, sofre oxidação. A água das chuvas ao entrar em contato com a pirita oxidada forma uma drenagem altamente poluidora, a Drenagem Ácida de Minas – DAM. Tal efluente traz danos para a vegetação e contamina os corpos hídricos, tratando-se do pior problema ambiental associado à mineração^(1,2,3,4).

É evidente que existe a necessidade em diminuir a geração de rejeitos pelas carboníferas, realizar um adequado tratamento daqueles que não puderem ser evitados, bem como, buscar o seu reaproveitamento na forma de produtos. Um dos materiais capazes de serem extraídos da DAM tratam-se de óxidos de ferro sintéticos. Ressalta-se, ainda, que os óxidos de ferro naturais possuem capacidade para potencializar concretos e argamassas para blindagens de radiação^(5,6).

A atenuação ou blindagem de radiação é característica necessária para a construção de laboratórios, salas de exames, entre outros, uma vez que a exposição a energias elevadas pode causar danos à saúde dos seres humanos. Deste modo, o material utilizado como vedação deve ser capaz de reduzir a intensidade dos raios até níveis não perigosos, sendo determinante da otimização do projeto⁽⁷⁾.

Os produtos cimentícios são empregados para proteção radiológica e podem receber adições em sua composição visando o acréscimo da blindagem^(8,9). A magnetita (Fe_3O_4) tem sido aplicada em misturas cimentícias com sucesso, não afetando a hidratação da pasta e alcançando níveis superiores de atenuação^(10,11,12). Este óxido de ferro é extraído de depósitos naturais na forma de uma pedra mineral de elevada dureza e altamente magnética, de cor preta e brilho metálico^(13,14). Sendo que, também existe a possibilidade de obter a magnetita através de um processo químico que tem como matéria-prima um dos rejeitos da mineração de carvão⁽¹⁵⁾.



O tratamento mais empregado para a DAM é denominado tratamento ativo. Este modelo consiste em processos de neutralização/precipitação/sedimentação⁽²⁾. Contudo, resulta em custos operacionais, energéticos e pelo uso de reagentes, além da geração de grande volume de lodo⁽¹⁶⁾. Como forma de tratamento alternativo da DAM, tem-se a precipitação seletiva, a qual possui custos menores do que o tratamento ativo, além de possibilitar a recuperação do ferro na forma de óxidos, que podem ser empregados em materiais de construção^(15,17,18).

Baseado nestas premissas, o presente estudo descreve a produção de pigmento de magnetita a partir da precipitação seletiva da DAM e propõe o seu uso em argamassas para blindagem. As amostras produzidas como referência e com a presença do óxido são testadas sob a incidência de raios X e a blindagem de cada uma delas é atribuída através da análise das imagens radiográficas com o software ImageJ.

Desta forma, visa-se avaliar uma alternativa sustentável de um agregado atenuante obtido no tratamento de rejeitos da mineração. Além disso, o seu uso substituirá parte da areia natural, o que pode minimizar custos e impactos ambientais da extração de recursos naturais. E, ainda, para uma aplicação futura, espera-se que o produto atenda as exigências normatizadas para argamassas, produzindo benefícios arquitetônicos pela redução de espessura de parede nas vedações dos ambientes em que são utilizadas energias radioativas, mantidos os mesmos níveis de proteção.



2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material

A amostra de Drenagem Ácida de Minas utilizada na pesquisa tem origem em um canal de escoamento próximo do depósito de rejeitos de uma mineradora de carvão no estado de Santa Catarina. Trazida para o laboratório de Materiais de Construção da Faculdade Meridional/IMED, Campus de Passo Fundo, a DAM passou por filtragem, bem como, foi realizada a análise da sua composição química.

2.2 Métodos

2.2.1 Obtenção do óxido de ferro magnético

A recuperação do óxido é realizada durante o tratamento por precipitação seletiva da DAM, que se dá através da recuperação do ferro contido na drenagem. A precipitação do ferro ocorre em $\text{pH } 3,6 \pm 0,1$ pela adição de hidróxido de sódio (NaOH). Em seguida realiza-se a lavagem do lodo de hidróxido de ferro com água, operação necessária para a obtenção de um bom nível de pureza. Posteriormente, faz-se a dissolução do lodo na forma de sulfato férrico pela adição de ácido sulfúrico (H_2SO_4). Então, coloca-se o material em circulação em coluna contendo uma solução aquosa com pirita, tal processo objetiva a coprecipitação de uma mistura de sais de ferro nas formas Fe^{3+} e Fe^{2+} em estequiometria 2:1⁽¹⁹⁾. Segue com a adição de hidróxido de sódio (NaOH) até o ajuste de $\text{pH } 12,0 \pm 0,1$. Findando o processo, o sistema é agitado constantemente até a conversão em pigmento preto e magnético de Fe_3O_4 ⁽¹⁵⁾. O qual passou por ensaios de caracterização, juntamente da areia, que foram granulometria por peneiramento (de acordo com a NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica (ABNT, 2003)) do qual resultou o diâmetro efetivo da amostra e, através de picnometria, obteve-se a massa específica e a massa específica aparente da areia e da magnetita (conforme NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente (ABNT, 2003)).

2.2.2 Preparo das argamassas

As argamassas foram produzidas de forma manual no traço 1:3 (aglomerante:agregados), sendo estabelecida a relação água/cimento em 0,55. O cimento utilizado, do tipo CP IV 32 e os agregados



foram areia fina (material passante na peneira de malha 4,75 mm, conforme NBR 7211⁽²⁰⁾) e pigmento (Fe_3O_4) obtido da Drenagem Ácida de Minas.

Foram moldados corpos de prova na dimensão 2x2x1 cm (comprimento, largura e altura, respectivamente), sendo 3 CPs de argamassa de referência (cimento, areia e água) e 3 CPs com a substituição parcial da areia pelo pigmento magnético, na quantidade correspondente a 20% do peso de cimento. Tal valor de substituição deve-se ao fato de que, em estudos prévios utilizando esse percentual, não houve sobra de agregado, sendo todas as partículas envolvidas pela pasta cimentícia, o que parece visível devido à coloração escura (preto) da magnetita. Contudo, este percentual de referência ainda demanda ser avaliado de maneira mais abrangente para determinação do teor ideal de substituição. A mistura foi realizada inicialmente entre cimento, areia e água e depois incorporado o pigmento.

2.2.3 Ensaio da atenuação de raios X

A fonte de emissão de radiação foi um aparelho de raios X CMR modelo Spectro 70 X. Todas as irradiações foram realizadas a 60 kV e 10 mGy durante 1 segundo sobre as argamassas de referência e compostas com o pigmento magnético. A avaliação da radiação transmitida ocorreu pela análise dos filmes radiográficos posicionados abaixo das amostras que receberam os feixes de energia.

O modelo de análise adotado foi comparar as escalas de cinza alcançadas pelo exame de raios X utilizando o software ImageJ, uma vez que, pontos mais claros revelados indicam uma maior reflexão, ou seja, maior atenuação de radiação e, pontos mais escuros, uma maior transmissão⁽²¹⁾. O software recebeu o carregamento de imagens em alta resolução dos filmes radiográficos e, a partir disso, foi realizada a conversão para escala de cinza e quantificado cada pixel das imagens. Os histogramas obtidos ao final do processo identificaram a média de atenuação das argamassas.

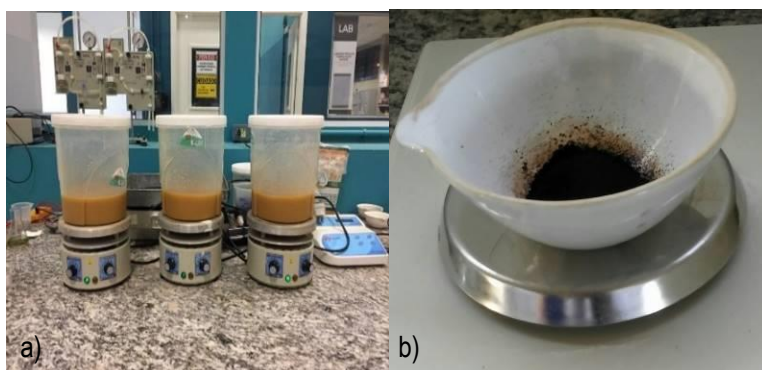


3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1 Extração do pigmento da DAM

A DAM utilizada na pesquisa apresentou majoritariamente sulfatos (12600 mg/L), ferro nas formas Fe e Fe³⁺ (3200 mg/L, cada), alumínio (1269,5 mg/L) e manganês (114,6 mg/L)⁽²²⁾. A recuperação de óxido de ferro a partir da Drenagem Ácida de Minas (Figura 1) resultou em aproximadamente 2g de pigmento por litro.

Figura 1 – a) Drenagem Ácida de Minas. b) Pigmento magnético.



3.2 Caracterização dos agregados

Os agregados utilizados foram quantificados através das suas características granulométricas e de massa. Sendo apresentados na Tabela 1 os valores obtidos de massa específica e massa específica aparente, bem como, o diâmetro efetivo das amostras, que demonstra o pigmento ser mais fino do que a areia, a qual foi substituída por este na quantidade de 20% do peso de cimento.

Tabela 1 – Comparativo da caracterização da areia fina e da magnetita

	Diâmetro efetivo (mm)	Massa Específica (g/cm ³)	Massa Específica Aparente (g/cm ³)
Areia Fina	0,15 mm	2,64	1,51
Magnetita	0,075 mm	2,47	1,46



3.3 Amostras de argamassas

As argamassas com a presença do óxido de ferro assumiram uma coloração mais escura em relação as de referência (Figura 2). Além disso, ao aproximar um imã sobre os CPs com pigmento percebe-se a força de atração magnética, o que não ocorre com os demais.

Figura 2 – a) Argamassa com pigmento. b) Argamassa de referência.

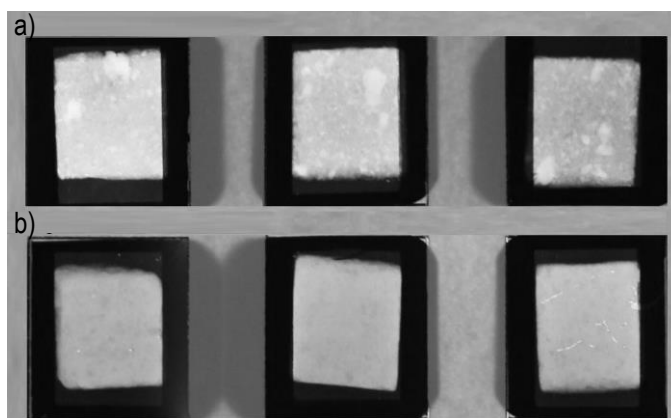


3.4 Ensaio da blindagem de raios X

Através do exame de raios X realizado para os corpos de prova 2x2x1 cm (Figura 3), percebe-se um acúmulo de pontos brancos que refletiram mais radiação. De acordo com a escala Hounsfield⁽²³⁾ esta característica é observada em elementos metálicos.

Figura 3 – Resultado do exame de raios X

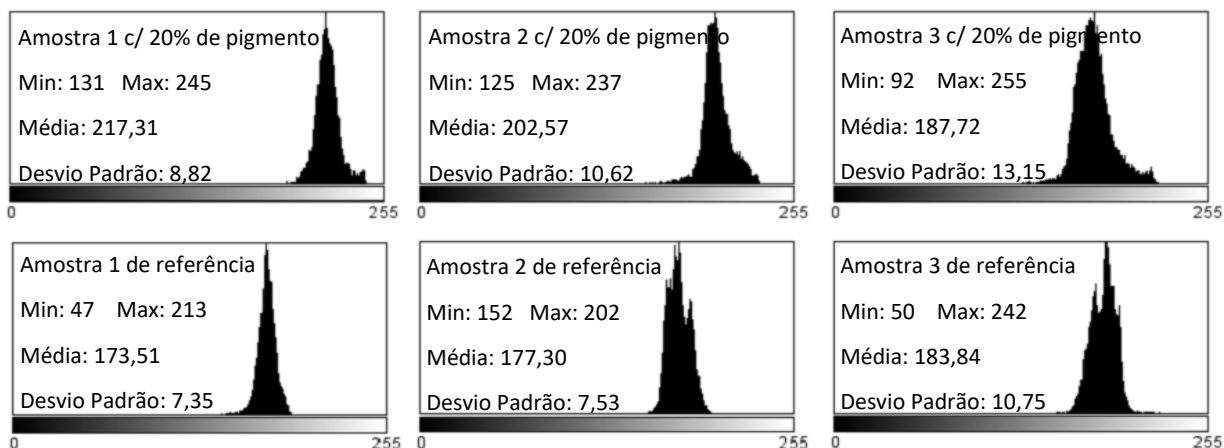
a) Argamassa com pigmento. b) Argamassa de referência.





Utilizando o software ImageJ cada pixel da imagem foi convertido em uma escala de cinza que vai de 0 (cor preta = sem atenuação) até 255 (cor branca = atenuação total). Obteve-se, então, o nível de cinza médio para cada corpo de prova, os quais podem ser observados nos histogramas da Figura 4.

Figura 4 – Resultados com o ImageJ.



De posse destes dados, possibilitou-se o cálculo da atenuação média dos corpos de prova de referência e com pigmento magnético de óxido de ferro extraído da DAM, obtendo-se o ganho de 13% na blindagem de raios X devido a presença do pigmento, pela Tabela 2 pode-se visualizar os resultados do estudo

Tabela 2 – Comparativo da atenuação de raios X das argamassas.

Argamassa	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média
Com óxido de ferro magnético	217,31	202,57	187,72	202,53
Referência	173,51	177,30	183,84	178,22



4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A elaboração deste trabalho baseou-se em alguns fatores, dentre eles, a necessidade em diminuir a geração de rejeitos de toda a cadeia produtiva, tratar adequadamente os que não puderem ser evitados, bem como, buscar seu reaproveitamento na forma de produtos.

Como pôde ser visualizado, no tratamento da Drenagem Ácida de Minas, efluente da mineração de carvão que possui alto volume e causa grandes danos ambientais é possível a obtenção de óxidos de ferro. Esta produção caracteriza o produto como de tecnologia embarcada porque além de possuir valor comercial, evita a extração do mineral de depósitos naturais e tem aplicação em outros setores, como na construção civil.

A proposição do uso do óxido foi à composição de argamassa para blindagem de radiação. Sendo, sua aplicação feita em substituição parcial da areia natural, o que reduz os custos e impactos ambientais da produção de agregados. O compósito magnético demonstrou ser um material eficiente para bloqueio de raios X, uma vez que, adquiriu acréscimo de 13% na atenuação em relação à argamassa de referência. Logo, a sua aplicação em revestimentos ajuda a reduzir a espessura de parede necessária para blindagem, mantidos os mesmos níveis de segurança.

Ressalta-se que para validar o uso desta argamassa, a mesma precisa atender parâmetros normativos e apresentar características favoráveis quanto aderência, resistência à tração/flexão, isolamento térmico e acústico, estanqueidade, etc; que não foram avaliados na presente pesquisa.

Contudo, pode-se concluir que a argamassa magnética oferece capacidade de proteção radiológica, podendo resultar em benefícios econômicos e arquitetônicos para os locais em que será empregada, além de reduzir o consumo de minerais e motivar o tratamento da Drenagem Ácida de Minas. Portanto, a argamassa com magnetita DAM traz a sustentabilidade como uma característica intrínseca de sua produção.



5. REFERÊNCIAS

1. FRIPP, J. et al. Acid mine drainage treatment. **EMRRP Technical Notes Collection**, mai. 2000.
2. VASQUEZ, Beatriz A. F. **Tratamento secundário de Drenagem Ácida de Mina em banhados construídos e lagoa de polimento**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
3. HALLBERG, K. B. Biological manganese removal from acid mine drainage in constructed wetlands and prototype bioreactors. **Science of the Total Environment**, v. 338, n. 1-2, p. 115-124, fev. 2005.
4. AMARAL FILHO, Juarez R. do et al. Caracterização de um depósito de rejeitos para o gerenciamento integrado dos resíduos de mineração na região carbonífera de Santa Catarina, Brasil. **Rem: Revista Escola de Minas**, [s.l.], v. 66, n. 3, p.347-353, set. 2013.
5. ALBUQUERQUE, Sérgio M. **Estudo para o desenvolvimento e caracterização de concretos de massa específica elevada para proteção às radiações gama e X**. 2014. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
6. VOLKMAN, D. E. Concrete for radiation shielding. *In*: Lamond, J. F. Pielert, J. H. (ed.). **Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials**. Los Alamos: ASTM, 2006. cap. 48, p. 570-577.
7. SANTOS, R. R. SHIELD 1.0: desenvolvimento de um programa de cálculo de blindagem. **Revista Brasileira de Física Médica**, v. 7, n. 2, p. 75-78, 2013.
8. FACURE, A. SILVA, X. A. The use of high-density concretes in radiotherapy treatment room design. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 65, n. 9, p. 1023-1028, set. 2007.
9. OUDA, Ahmed S. Development of high-performance heavy density concrete using different aggregates for gamma-ray shielding. **Housing and Building National Research Center**, v. 11, p. 328-338, 2014.
10. SIKORA, P. et al. The Influence of Nano-Fe₃O₄ on the Microstructure and Mechanical Properties of Cementitious Composites. **Nanoscale Research Letters**, v. 11, p. 182-191, 2016.
11. OTO, B. et al. Determination of gamma and fast neutron shielding parameters of magnetite concretes. **Progress in Nuclear Energy**, v. 92, p. 71-80, 2016.
12. OTO, B; GÜR, A. Gamma-ray shielding of concretes including magnetite in different rate. **International Journal of Physical Sciences**, v. 8, p. 310-314, 2013.
13. CAO, Jingyao; CHUNG, D.d.l.. Use of fly ash as an admixture for electromagnetic interference shielding. **Cement And Concrete Research**, v. 34, n. 10, p. 1889-1892, out. 2004.
14. ORTIZ, Nilce. **Estudo da adição de magnetita como material adsorvedor dos metais Cu, Pb, Ni e Cd, em solução**. 2000. – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
15. SILVA, Rodrigo de A. **Recuperação hidrometalúrgica de metais da drenagem ácida de minas por precipitação seletiva**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.



16. SILVEIRA, A.N.; SILVA, R. D. R.; RUBIO, J. Treatment of acid mine drainage (AMD) in South Brazil: comparative active processes and water reuse. **International Journal of Mineral Processing**, v.93, n.2, p. 103-109, 2009.
17. SCHWERTMANN, U.; CORNELL, R. M. **Iron Oxides in the Laboratory: Preparation and Characterization**. 2. ed. [s.l.]: Wiley-vch Verlag GmbH, 2000.
18. TANNER A. O. Iron oxide pigments [Advance Release] Minerals Yearbook 2014. Compiler, USGS, US Dept of the Interior, Washington DC. 2016.
19. WEI, X.; VIADERO, R.C., Synthesis of magnetite nanoparticles with ferric iron recovered from acid mine drainage: implications for environmental engineering, **Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects**, v. 294, n. 1, p. 280-286, 2007.
20. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.
21. NARDONE, V. et al. Bone texture analysis using CT-simulation scans to individuate risk parameters for radiation-induced insufficiency fractures. **Osteoporosis International**, [s.l.], v. 28, n. 6, p.1915-1923, 27 fev. 2017
22. SILVA, Rodrigo de Almeida et al. Synthesis of a Goethite Pigment by Selective Precipitation of Iron from Acidic Coal Mine Drainage. **Mine Water And The Environment**, v. 36, n. 3, p.386-392, abr. 2017.
23. OSBORNEA, T. et al. How to interpret na unenhanced CT Brain scan. Part 1: Basic principles of Computed Tomography and relevant neuroanatomy. **South Sudan Medical Journal**, v. 9, n. 3, p. 1-3, 2016.