

## APRIMORAMENTO DO PROCESSAMENTO DE CASSITERITA CONTENDO TEOR RELEVANTE DE ÓXIDO DE TÂNTALO \*

Daniel Mapa Clemente<sup>1</sup>  
Carlos Antônio da Silva<sup>2</sup>  
Itavahn Alves da Silva<sup>3</sup>  
Johne Jesus Mol Peixoto<sup>3</sup>  
Weslei Viana Gabriel<sup>1</sup>

### Resumo

Determinados riscos da cadeia de suprimentos de Sn e Ta podem levar as empresas a terminar relações comerciais com fornecedores. Uma alternativa a essa limitação de fornecimento é o aprimoramento do uso de materiais secundários como fonte de matéria-prima. Um exemplo consiste da obtenção de Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> proveniente de escórias de Sn. Assim, o presente trabalho buscou aprimorar o processamento de cassiterita contendo teor relevante de Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Teve-se como objetivo maximizar a concentração e o rendimento desse óxido na escória, mantendo-se alto rendimento de Sn na fase metálica. Para isso, a redução da cassiterita foi estudada em forno a arco elétrico e utilizou-se de porções de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> para diminuir a temperatura de fusão da escória. A operação transcorreu de forma estável e as etapas de processamento permitiram atingir alto rendimento de Sn e Ta, assim como alto teor de Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na escória. Com base nos dados do processamento e nos baixos teores de Na<sub>2</sub>O encontrados, conclui-se que a adição de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> foi benéfica ao processo, atuando na maximização do teor de Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, assim como na estabilidade da operação.

**Palavras-chave:** Produção de estanho; Concentração de tântalo; Escória de estanho; Recursos secundários.

### ENHANCEMENT IN THE PROCESSING OF CASSITERITE CONTAINING RELEVANT CONTENT OF TANTALUM OXIDE

#### Abstract

Certain risks related to Sn and Ta supply chain may lead companies to terminate business relationships with suppliers. An alternative to this supply limitation is to enhance the processing of secondary materials as source of raw material. An example consists of sourcing of Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> from tin slags. Thus, the present work sought to enhance the processing of cassiterite containing relevant content of Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. The objective was to maximize the concentration and yield of this oxide in the slag, while maintaining high yield of Sn in the metallic phase. Aiming that, reduction of the cassiterite was studied in an electric arc furnace and additions of Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> were used to decrease the melting temperature of the slag. The furnace operation was found to be stable and processing steps allowed to reach high yield of Sn and Ta, as well as high Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> content in the slag. Based on processing data and on the low Na<sub>2</sub>O content, it was concluded that the addition of Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> was beneficial to the process, acting on the maximization of the Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> content and on the stability of the operation.

**Keywords:** Tin production; Tantalum concentration; Tin slag; Secondary resources

<sup>1</sup> MSc, Doutorando, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFOP, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

<sup>2</sup> PhD, Professor, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Minas, UFOP, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

<sup>3</sup> DSc. Professor, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Minas, UFOP, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

O tântalo, seja em sua forma metálica ou em óxido, é amplamente utilizado para a elaboração de capacitores, assim como em aplicações automotivas, aeroespaciais, médicas, dentre outras [1]. O estanho, por sua vez, é usado na confecção de soldas, folhas de flandres, químicos, e até mesmo em diversos componentes automotivos [2]. Verifica-se, assim, que ambos estão altamente presentes no dia a dia das pessoas e que possuem alta relevância econômica e tecnológica. Entretanto, a exploração de minérios contendo esses elementos pode contribuir ou ser associado a impactos adversos, como abusos aos direitos humanos e/ou financiamento de grupos armados, o que é especialmente crítico quando esses minérios são provenientes de zonas de conflito ou alto risco [3]. Este fato foi verificado em alguns países, dentre eles a República Democrática do Congo e, a partir de então uma forte pressão, tanto da ONU quanto de organizações corporativas como o *ITRI Tin Supply Chain Initiative* (iTSCi) e o *Responsible Minerals Initiative* (RMI), tem levado empresas em todo o mundo a identificarem, avaliarem e mitigarem os riscos de suas cadeias de suprimentos [4,5]. Ainda, dependendo do tipo de risco identificado, as atividades comerciais com determinados fornecedores deverão ser interrompidas [3]. Embora esse fato seja absolutamente necessário do ponto de vista ético, verifica-se como consequência que os riscos acabam por limitar as reservas a serem exploradas pelas empresas produtoras de Sn e Ta. Isso reforça a importância do aproveitamento de materiais secundários, de forma a compensar eventuais perdas de fontes primárias de matéria-prima. Nesse contexto, as escórias de Sn são consideradas fonte secundária relevante para a produção de Ta [6–10]. Isso ocorre, pois a cassiterita, como é conhecido o minério de Sn, pode conter até 4% de Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> em sua estrutura. Além disso, existe a possibilidade de ocorrer tantalita, minério de tântalo, associado [8].

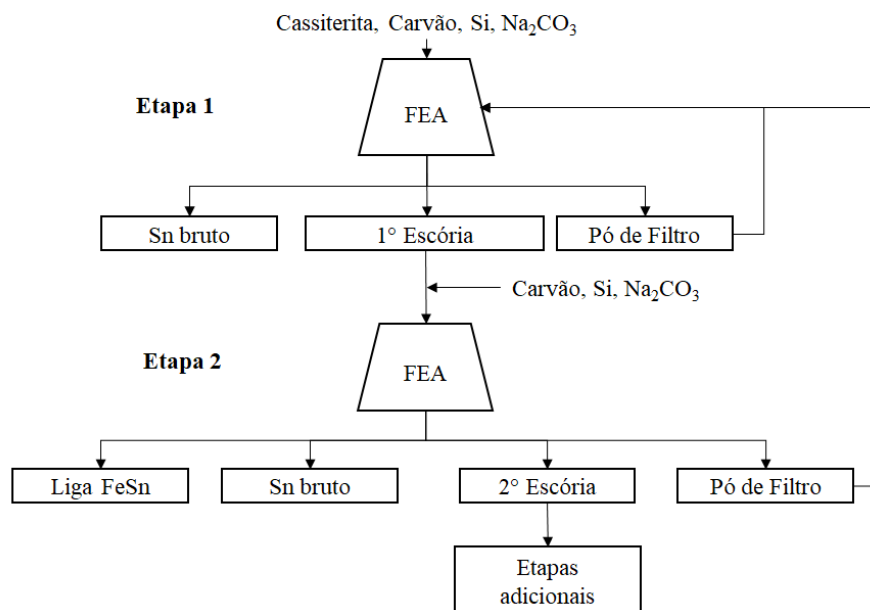
Uma análise termodinâmica simples permite verificar que há uma grande diferença entre os potenciais de oxidação do Ta e aquele do Sn. Assim, durante o processamento carbotérmico do minério, a tendência é que Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> não seja reduzido, o que ocorre com facilidade com o SnO<sub>2</sub>, cuja redução possibilita a formação de Sn metálico. Portanto, espera-se uma concentração de Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nas escórias ao longo do processamento, o que é interessante do ponto de vista econômico [8]. Entretanto, uma prática rotineira da metalurgia do Sn é a adição de calcário visando fluidificação da escória [11–13]. Essa adição pode elevar os teores de CaO até a ordem de 20% [11,12], levando à diluição dos teores de Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e, portanto, prejudicando a concentração de Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na escória, o que é muito relevante para as etapas seguintes de processamento. Por exemplo, na extração por solvente, que é um método bastante utilizado para obtenção de Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> com alta pureza, há uso de HF e H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, além de solventes orgânicos como MIBK e TBP [6]. Sendo o Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> um produto desse processo, a diluição do teor de entrada acaba por prejudicar o balanço financeiro da operação.

Em função das informações expostas, torna-se relevante um estudo sobre a produção de Sn a partir de cassiterita contendo Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, de forma a buscar o maior teor possível desse óxido na escória final. Com esse intuito, o presente trabalho descreve o processamento de cassiterita em forno de redução a arco elétrico objetivando a recuperação de Sn na fase metálica e de Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na fase oxidada, que são aspectos importantes para a viabilidade econômica do processo, assim como a maximização da concentração de Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na escória. Para isso, foi utilizado um fluidificante alternativo: o carbonato de sódio.

A dissociação desse carbonato resulta em  $\text{Na}_2\text{O}$  na escória, o que diminui nitidamente a temperatura de fusão de sistemas relevantes para a metalurgia do Sn, como  $\text{FeO-SiO}_2$  e  $\text{CaO-SiO}_2$  [14]. Em princípio, pequenas porções de  $\text{Na}_2\text{O}$  permitiriam processar cassiterita, resultando em teores mais elevados de  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  na escória final. Outro aspecto que se deve destacar é que, embora a recuperação de Ta de escórias de Sn seja citada por diversos autores [6–11], não foram encontrados relatos técnicos sobre o processamento de cassiterita contendo teores relevantes de  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ , o que reforça a importância do presente trabalho como contribuição técnica para a metalurgia do Sn e Ta.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho teve o objetivo de estudar o processamento de cassiterita contendo teor relevante de  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  de forma a maximizar a concentração desse óxido na escória, assim como obter altos rendimentos de Sn e Ta. Para isso, o processamento foi realizado em forno de redução a arco elétrico (500 kVA). Este foi executado através de operação contínua com o forno completamente carregado, inclusive acima do nível do cadinho, de forma a minimizar perda de Sn por volatilização. Uma descrição do processo é mostrada na Figura 1:



**Figura 1.** Fluxograma simplificado do processo. Fonte: adaptado de Wright [11].

Primeiramente, há a redução parcial da cassiterita, na qual objetiva-se a produção de Sn bruto com alto grau de pureza. Para isto, há adição controlada de carbono, evitando a redução de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e formação de liga FeSn. Outro subproduto gerado é o pó de filtro, que deve ser reciclado visando maior rendimento de Sn. Naturalmente, há ainda a formação de escória, que deve conter todo o  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  da cassiterita. Segundo Wright [11], a escória gerada na primeira etapa ainda contém  $\text{SnO}_2$  e deve ser então reprocessada em nova etapa. Dessa forma, toda escória gerada deve ser britada e, após a finalização do carregamento da cassiterita, ser progressivamente adicionada ao topo da carga, criando uma interface entre minério e escória. Nessa segunda etapa, ocorre uma nova redução, formando mais Sn Bruto, pó de filtro, liga FeSn e uma segunda escória. Caso ainda haja quantidades relevantes de  $\text{SnO}_2$  na escória, etapas adicionais podem ainda ocorrer. Nesse caso, tanto os insumos

utilizados quanto os produtos gerados nessas etapas são os mesmos descritos para etapa 2, mostrada na Figura 1. Nota-se que, com a redução parcial de  $\text{SnO}_2$  da escória, busca-se, a cada etapa de processamento, uma concentração progressiva de  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  na fase dos óxidos. Ao fim do processamento têm-se então dois produtos: a escória contendo altos teores de  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  e a liga Sn Bruto.

A cassiterita, a escória final e o pó de filtro foram amostrados conforme norma D75/D75M [15]. De forma a lançar compreensão sobre o que ocorre em cada etapa de processamento, amostras de escória foram retiradas por meio da inserção de bastão de aço no jato durante o vazamento. Esse tipo de método é necessário uma vez que, em função da natureza contínua da operação, não é possível amostrar toda a escória de uma determinada fusão, conforme a D75/D75M [15].

A técnica utilizada para determinação da composição química foi a fluorescência de raios-X por dispersão de energia (EDXRF) e o aparelho usado foi o Epsilon 3X, da Panalytical. Os teores de  $\text{SnO}_2$  da cassiterita, assim como das escórias e pó de filtro, foram determinados por método titulométrico e o teor de Sn do Sn Bruto produzido, assim como seus contaminantes, pela técnica de absorção atômica (AAS).

Em função da presença de material fino, procurou-se trabalhar com a voltagem reduzida (60V), de forma a evitar volatilização ou arraste de partículas para a exaustão. A distribuição granulométrica do material utilizado pode ser visto na Figura 2.

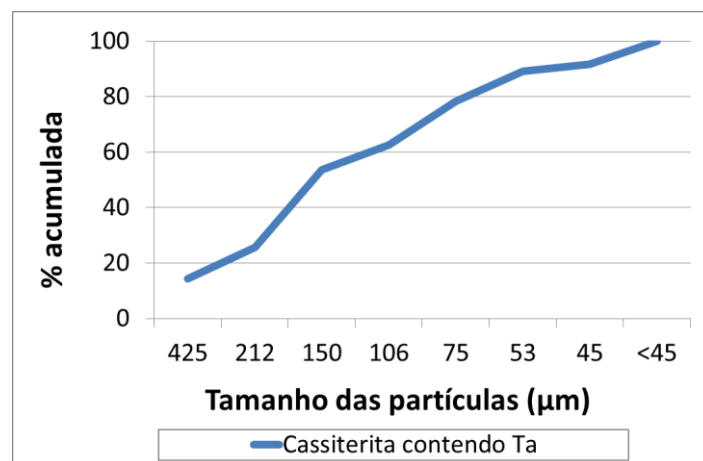


Figura 2. Distribuição granulométrica da Cassiterita utilizada.

A análise da cassiterita é mostrada na Tabela 1. No total, 10740 kg foram processados nesse teste. Verifica-se, então, uma entrada de 5265 kg de Sn, que precisam ser recuperados com alto rendimento. Ainda, há 690 kg de Ta, que deverá permanecer na escória, possibilitando o maior teor possível de  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ .

Tabela 1. Composição química da cassiterita utilizada (em %).

$\text{SnO}_2$	$\text{Ta}_2\text{O}_5$	$\text{Nb}_2\text{O}_5$	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2$	$\text{CaO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{H}_2\text{O}$
62,27	7,85	4,86	7,63	4,58	1,68	1,37	0,0	0,0	0,11

O leito de fusão utilizado nas diferentes etapas do processo é apresentado na Tabela 2. As percentagens se referem à quantidade a ser adicionada em relação à massa total de matéria-prima contendo Sn utilizada como *input*. Nota-se que há diminuição da quantidade de redutor no processamento das demais etapas. Esse fato se deve a menor presença de  $\text{SnO}_2$  em relação à cassiterita, assim como aos riscos de ocorrer redução de  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  caso haja carbono em excesso.

**Tabela 2:** leito utilizado nas etapas de redução.

<b>Etapa de redução</b>	<b>Carvão</b>	<b>Silício metálico</b>	<b>Carbonato de sódio</b>
Primeira etapa (%)	8	2	4
Demais etapas (%)	4	2	4

A composição das matérias primas é mostrada na Tabela 3. A adição de silício metálico é realizada para evitar a perda de Sn para a liga FeSn. Por meio da formação de liga ternária FeSnSi há diminuição da solubilidade de Sn na liga e, portanto, formação de Sn metálico, o que aumenta o rendimento da operação [11].

**Tabela 3.** Composição das adições.

	<b>C</b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Si</b>
Carvão (%)	76,0	-	-	-
Carbonato de sódio (%)	-	57,4	-	-
Silício metálico (%)	-	-	-	99,03

Considerando a proposição do uso de carbonato de sódio, realizou-se para melhor compreensão, uma análise da viscosidade da escória por meio do modelo descrito por K.C. Mills, disponível no Slag Atlas [14]. Esse modelo permite verificar a influência da presença de Na<sub>2</sub>O na viscosidade da escória, assim como o efeito do aumento de temperatura.

Por fim, para o presente trabalho, não foi realizado refino da liga Sn Bruto, uma vez que o foco foi o processamento no forno de redução. Portanto, todo o Sn contido nessa liga foi considerado para o rendimento.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O processamento da cassiterita (primeira etapa) transcorreu sem qualquer tipo de dificuldade técnica. O mesmo fato pôde ser verificado na segunda etapa: o forno manteve-se abafado e visualmente não foi identificada evolução de gases, o que poderia sinalizar problemas operacionais. Dessa forma, a adição de carbonato de sódio teve efeito positivo sobre o processamento nas duas primeiras etapas, dispensando quantidades significativas de CaO que viriam a diluir os teores de Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na escória. A análise da escória proveniente do processamento da segunda etapa revelou teores de CaO de apenas 2,02%. Ainda, a análise mostrou que um teor de Sn de 3,2% foi identificado. Como esse valor está acima de algumas análises encontradas na literatura, optou-se por uma nova etapa de processamento [11,16].

Na terceira etapa, diferentemente das anteriores, verificou-se dificuldade de processamento. A escória ficou bastante viscosa e a produção de Sn foi muito inferior à segunda etapa. É possível que o aumento do teor de Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e diminuição de SnO<sub>2</sub> elevaram a temperatura de fusão da escória [18]. A baixa recuperação exigiu então a interrupção do processamento antes da finalização dessa etapa. Considerando os problemas acima citados, questiona-se a viabilidade da terceira etapa nas condições do experimento.

Com o forno desligado, foram coletados do sistema 702 kg de pó de filtro e a análise indicou teor da ordem de 37,59 % de SnO<sub>2</sub>, o que representa um potencial de recuperação de 208 kg de Sn. Com o objetivo de se alcançar maior rendimento metálico, o pó de filtro foi então recirculado numa quarta etapa. Em função da

granulometria desse material foi necessária a adição de escória, de forma a garantir permeabilidade de carga e, portanto, a estabilidade da operação. Foi utilizada escória em uma proporção 1:1.

O processamento foi mais estável quando comparado com a terceira etapa. Possivelmente, a presença de uma maior quantidade de  $\text{SnO}_2$  levou à diminuição da temperatura de fusão da escória, facilitando a operação. Mesmo assim, verificou-se próximo ao fim do processamento da 4ª etapa que pouco estanho estava sendo produzido. Além disso, houve um aumento da viscosidade da escória nos últimos vazamentos, o que levou à decisão de finalizar a operação ao fim dessa etapa.

A quantidade de Sn Bruto produzido por turno pode ser visto na Figura 3. Nota-se que há um pico logo no segundo turno de operação e, em seguida, uma produção de Sn inferior no terceiro turno. Esse pico foi causado por um vazamento entre a troca de turno do 1º e 2º turno de operação. A produção dessa corrida foi pesada juntamente com a produção do 2º turno, o que acabou por gerar uma distorção no gráfico.

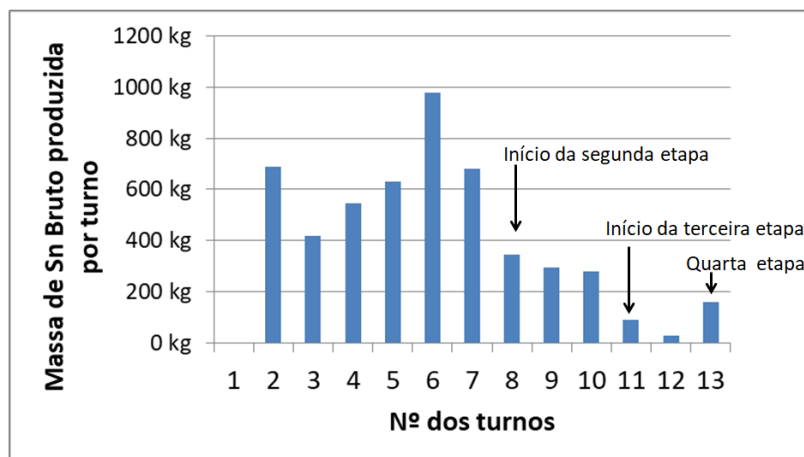


Figura 3. Produção de Sn por turnos, mostrando a divisão por etapas.

Ao realizar a análise dos dados, foi possível identificar algumas peculiaridades do processo relevantes para a compreensão dos resultados. Dentre elas, foi verificada uma limitação no cálculo da distribuição da produção de Sn por etapas, uma vez que o forno opera de forma contínua e a interface entre etapas se torna de difícil distinção. A Figura 4 mostra essa distribuição de Sn, considerando as limitações mencionadas.

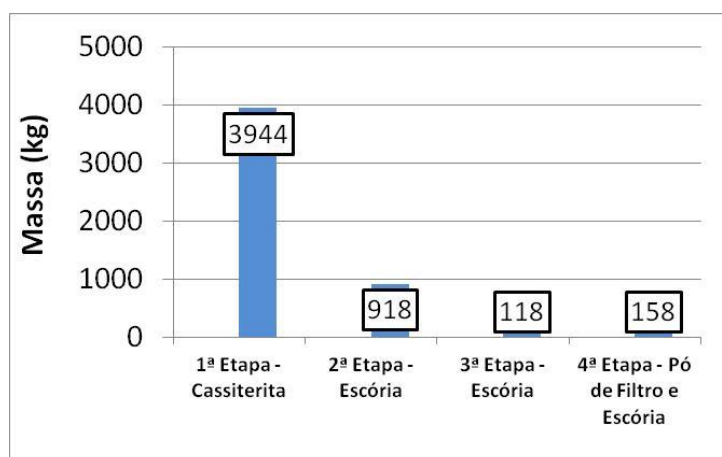


Figura 4. Produção de Sn por etapas.

Embora com as restrições impostas pela natureza contínua da operação, a redução progressiva do óxido  $\text{SnO}_2$  sugere um enriquecimento também progressivo da escória residual em  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ . A Figura 5 mostra os teores de  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  e  $\text{SnO}_2$  para a cassiterita, para as etapas de processamento intermediárias e para a escória final. Ressalta-se que cassiterita e escória final foram amostradas utilizando a D75/D75M, enquanto as etapas 2,3 e 4, por meio de bastão inserido no momento do vazamento.

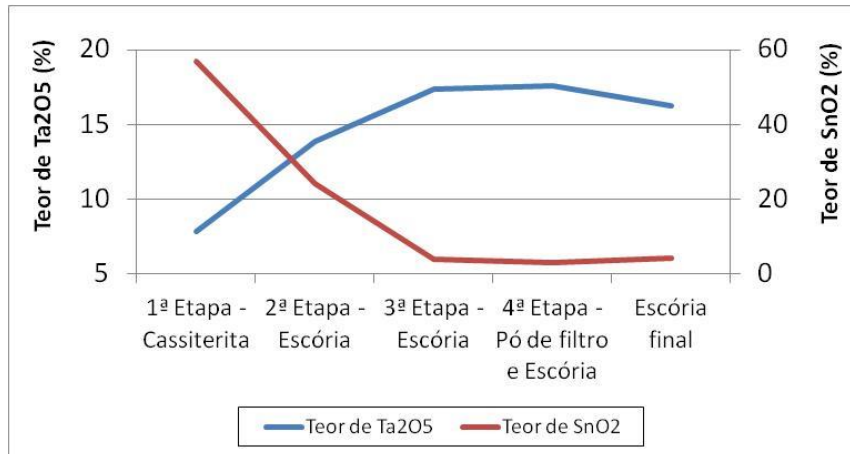


Figura 5. Evolução dos teores de  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  ao longo do processamento.

Verifica-se estabilização dos teores de  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  e  $\text{SnO}_2$  na quarta etapa, o que é natural uma vez que a remoção de  $\text{SnO}_2$  tende a ser cada vez menor. Eventuais diferenças entre a 4ª etapa e escória final decorrem da diferença de método de amostragem. Um total de 5192 kg de escória final foi produzido em função do processamento da cassiterita. A análise dessa escória é mostrada na Tabela 4.

Tabela 4. Análise da escória de saída em %.

$\text{SnO}_2$	$\text{Ta}_2\text{O}_5$	$\text{Nb}_2\text{O}_5$	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2$	$\text{CaO}$	$\text{Na}_2\text{O}$
4,21	16,79	8,19	26,77	9,21	2,64	2,31	2,73	3,07

Analisando-se primeiramente o Sn, pode-se ver na Tabela 5 mostra comparativo entre os teores da escória final do presente trabalho e valores disponíveis na literatura. Verifica-se semelhança entre os teores finais obtidos nesse estudo e no trabalho de Clemente *et al* [12]. Ambos estudos relataram sistemas de escórias com altas temperaturas de fusão, o que pode ser relacionado com a perda de Sn para a escória ou liga  $\text{FeSnSi}$ . Nota-se que essa liga não foi gerada no caso desse trabalho. Esse fato indica que a adição de silício metálico foi desnecessária e, não sendo encontrada fase metálica contendo Si, houve oxidação desse elemento.

Tabela 5 – Comparativo do teor de Sn em algumas escórias finais de processamento de Sn.

	Mantell [16]	Wright [11]	Clemente <i>et al</i> [12]	Trabalho Atual
% Sn escória	1%-1,6%	0,1%-0,9%	4,80%	3,31%

Com relação à redução do  $\text{SnO}_2$ , verifica-se que um total de 5138 kg de Sn Bruto (liga) foi produzido, sendo a composição do mesmo mostrada na Tabela 6. Nota-se que  $\text{PbO}$  também foi reduzido, o que se deve ao seu potencial de redução, que é maior que do  $\text{SnO}_2$ .

**Tabela 6.** Composição do Sn Bruto.

%Sn	%Pb	%Fe	%Cu	%Zn	%Sb	%Bi
98,273	1,511	0,086	0,060	0,025	0,009	0,036

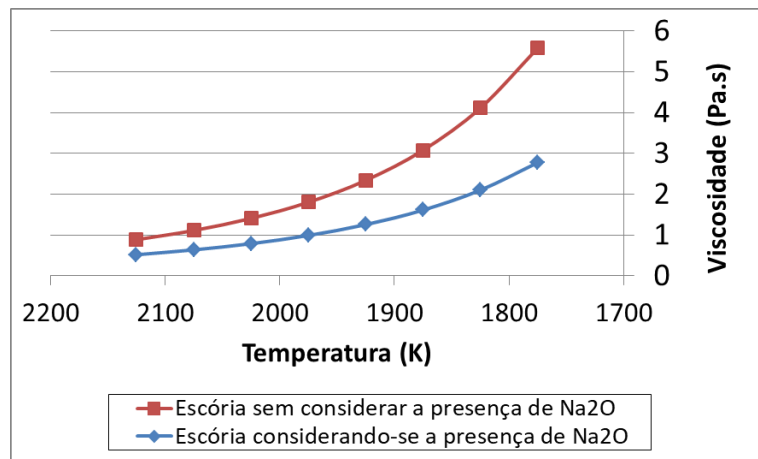
O balanço de Sn fechou em 99,18%. Desse total, 5049 kg foram encontrados na liga, o que representa um rendimento de 95,90%. Esse valor demonstra a eficiência da operação, que atingiu o objetivo no que tange a recuperação de Sn. Ainda, um total de 172 kg foram encontrado na escória, sendo tanto ocluso em forma metálica quanto em solução na forma oxidada. Os resultados sugerem ainda que cerca de 44 kg de Sn foram volatilizados e não captados pelo sistema de exaustão, o que corresponde a apenas 0,8 % do Sn contido.

Com relação ao tântalo, verifica-se que o teor de  $Ta_2O_5$  mostrado na Tabela 4 é condizente com aqueles encontrados na literatura. Enquanto teores de 11 % de  $Ta_2O_5$  nas escórias foram relatados em processamento de cassiterita [7], Roethe [17], afirma que a escória pode conter até 30% de  $Ta_2O_5$ , dependendo da origem do minério. Segundo Köck e Paschen [8], essas escórias podem ser tratadas por processos químicos para recuperação de Ta. Esse fato é bastante relevante, uma vez que explicita que as escórias obtidas no presente trabalho podem ser utilizadas nos processos seguintes para a produção de produtos mais nobres contendo Ta. Além disso, o  $Nb_2O_5$ , outro óxido que normalmente ocorre em associação com o de tântalo, também acabou sendo concentrado, o que pode ser relacionado com as similaridades nos potenciais de redução desses compostos [6].

Verifica-se também que os teores de CaO e  $Na_2O$  somam 5,8%, valor inferior aos cerca de 20% de CaO normalmente relatados pela literatura para escórias de Sn [11,12]. A título de ilustração, este teor de CaO poderia levar à diluição de  $Ta_2O_5$  dos atuais 16,79% para cerca de 14,7%, considerando as mesmas condições de processamento. Portanto, a adição de  $Na_2CO_3$  foi benéfica, pois permitiu um bom funcionamento do processo mesmo sem o uso de outros fundentes, que diluiriam a escória. Como a viscosidade da escória aumentou bastante a partir da terceira etapa, entende-se que diminuição da quantidade de  $Na_2CO_3$  não seria adequada em um primeiro momento, uma vez que levaria a menor rendimento de Sn, prejudicando o balanço econômico da operação. Dessa forma, pode-se afirmar que a adição de  $Na_2CO_3$  nas quantidades propostas levou à maximização do teor de  $Ta_2O_5$  sem comprometer o rendimento de Sn.

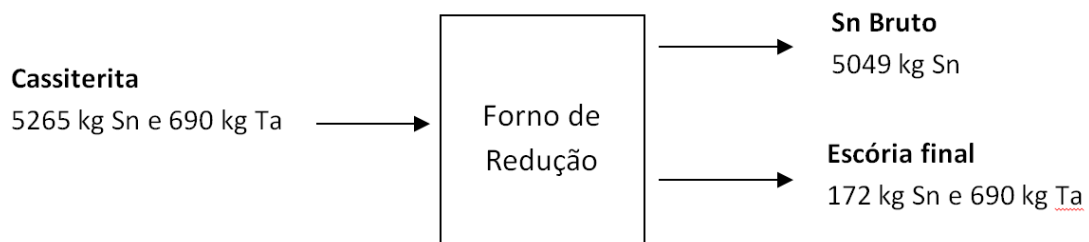
O efeito da adição desse fluidificante na viscosidade da escória pode ser visto na Figura 6. Este foi inferido por meio do modelo de viscosidade descrito por K.C. Mills e disponível no Slag Atlas [14]. Verifica-se que, assim como observado no experimento, a adição indireta de  $Na_2O$  é benéfica ao processo. Outro fator de impacto na viscosidade é a temperatura. Embora esse fator tenha sido explorado no passado para o processamento de cassiteritas contendo Ta, sabe-se também que o aumento de temperatura favorece a volatilização de Sn [11]. Portanto, o foco do aprimoramento do processamento visando alto rendimento de Sn deve residir no efeito do fluidificante, e não no aumento de temperatura.





**Figura 6.** Efeito da adição de Na<sub>2</sub>O na escória segundo modelo descrito por K. C. Mills [14].

Por meio de balanço de massa foram encontrados 714 kg Ta na escória, em comparação com os 690 kg da entrada. Esse fechamento em 103 % pode ser atribuído a desvios de amostragem e análise. Dessa forma, o balanço sugere que todo o Ta contido na entrada foi encontrado na escória de saída, atingindo assim um dos objetivos do trabalho. A Figura 7 apresenta, de forma resumida, o balanço de massa da operação com a saída de Ta ajustada ao valor da entrada.



**Figura 7.** Balanço de massa final da operação.

## 4 CONCLUSÃO

O presente trabalho realizou um estudo sobre o aprimoramento do processamento de cassiterita contendo teores relevantes de Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Objetivou-se a recuperação do Sn na forma metálica e do tântalo na forma oxidada, assim como a maximização dos teores de Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na escória de saída. De forma a atingir tal objetivo, utilizou-se como fluidificante o carbonato de sódio em substituição ao calcário. O uso desse fluidificante visou uma menor diluição dos teores de Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na escória final.

O processamento foi realizado em forno de redução a arco elétrico e foram necessárias um total de 4 fusões até que um alto rendimento de Sn fosse obtido na fase metálica (95,90%). Além disso, verificou-se que não seria viável nova etapa de processamento, em função da instabilidade da operação e do aumento de viscosidade da escória.

Ainda, há de se ressaltar que o teor de Sn obtido na escória final foi de 3,31%, o qual está acima de valores encontrados na literatura [11,16]. Esse fato pode estar relacionado com a alta temperatura de fusão da escória, que é favorecida pelo aumento de Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e diminuição de SnO<sub>2</sub> na escória [18]. Entretanto, a alteração de parâmetros como o aumento de temperatura de trabalho e da quantidade de fluidificante teria efeito adverso aos objetivos do processamento.

Não foi verificada perda de Ta no processo, o que é essencial para a viabilidade da operação. Ainda, 16,79% de  $Ta_2O_5$  foi encontrado na escória final, o que pode ser considerado um alto teor. Esse fato pode ser relacionado com a adição de carbonato de sódio, uma vez que sua adição foi muito inferior à normalmente realizada em processos que utilizam calcário como fundente. Enquanto no presente trabalho foram encontrados um total de 5,8% de CaO e  $Na_2O$ , a literatura aponta valores da ordem de 20% de CaO em escórias de Sn [11]. Portanto, o fluidificante proposto atuou na maximização dos teores de  $Ta_2O_5$ .

Diante da inviabilidade do aumento de temperatura e da quantidade de fluidificante, trabalhos futuros podem focar no efeito do uso de outros fundentes, como a fluorita. Ainda, o efeito da adição de carbono na primeira etapa também pode ser explorado. Uma menor taxa de redução de  $SnO_2$  na primeira etapa poderia tornar as etapas seguintes mais estáveis, evitando que o processamento seja interrompido por problemas operacionais. Por fim, entende-se que esses estudos poderiam ser realizados em escala laboratorial, uma vez que isso permitiria que uma série de testes pudessem ser realizados, elucidando com maior precisão os questionamentos levantados.

## REFERÊNCIAS

1. TIC. Tantalum Applications & Products [publicação online]. Lasne; 2018. [Acesso em 14 de janeiro de 2019]. Disponível em <https://tanb.org/images/Tantalum%20for%20technology.pdf>
2. International Tin Association [publicação online]. St Albans; 2019. [Acesso em 22 de janeiro de 2019]. Disponível em <https://www.internationaltin.org/how-is-tin-used/>
3. OECD, organizador. OECD Due Diligence Guidance for Responsible Supply Chains of Minerals from Conflict-Affected and High-Risk Areas. 3 ed. Paris: OECD Publishing; 2016.
4. Vogel C, Raeymaekers T. Terr (it) or (ies) of peace? The Congolese mining frontier and the fight against “conflict minerals”. *Antipode*. 2016;48(4):1102-21.
5. RMI - Responsible Minerals Initiative is helping companies make informed choices about minerals sourcing in their supply chains. [publicação online]. Washington; 2019. [Acesso em 01 de abril de 2019]. Disponível em <http://www.responsiblemineralsinitiative.org/>
6. Bose DK, Gupta CK. Extractive Metallurgy of Tantalum. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2002;22(4-6):389-412.
7. Gupta CK. Extractive metallurgy of niobium, tantalum, and vanadium. *International Metals Reviews*. 1984;29(1):405-44.
8. Köck W, Paschen P. Tantalum—processing, properties and applications. *JOM*. 1989;41(10):33-9.
9. Simandl GJ. Tantalum Market and Resources: An Overview. *Geological Fieldwork* 2001:2002-1:313-8.
10. Somani OP, Sarbajana C, Sinha RP. Tantalum in tin slag—a report from Bastar pegmatite belt, Chattisgarh, India. *Journal of the Geological Society of India*. 2005;65(1):101-4.
11. Wright PA. Extractive metallurgy of tin. 2nd rev. ed. Amsterdam: Elsevier Scientific Pub. Co; 1982.
12. Clemente DM, Silva CA da, Silva IA da. Optimization of tin recovery from concentrates through a model for prediction of slag composition. 48º

- Seminário de Aciaria, Fundição e Metalurgia de Não-Ferrosos. 2017 [Acesso em 13 de Abril de 2019]; 503–13. Disponível em: <http://abmproceedings.com.br/ptbr/article/optimization-of-tin-recovery-from-concentrates-through-a-model-for-prediction-of-slag-composition>
13. Graf GG. Tin, tin alloys, and tin compounds. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, organizador. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry [Internet]. Weinheim. Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; 2000 [Acesso em 22 de Maio de 2019]. Disponível em: [http://doi.wiley.com/10.1002/14356007.a27\\_049](http://doi.wiley.com/10.1002/14356007.a27_049)
  14. Verein Deutscher Eisenhüttenleute. Slag atlas. 2nd ed. Düsseldorf: Verl. Stahleisen; 1995.
  15. ASTM Internacional. Standard practice for sampling aggregates [Internet]. 2014 [acesso em 15 de janeiro de 2019]. Disponível em: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D75D75M-14>
  16. Mantell CL. Tin Smelting in Brazil. JOM. 1963;15(2):152–6.
  17. Roethe G. Processing of Tantalum and Niobium Ores. Möller P., Černý P., Saupé, organizadores. Lanthanides, Tantalum and Niobium [Internet]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 1989 [Acesso em 15 de dezembro de 2018]. p. 331–41. Disponível em: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-87262-4\\_17](http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-87262-4_17)
  18. Kim SS. Thermodynamic Modeling of the Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-SnO<sub>2</sub> Phase Diagram. Journal of the American Ceramic Society. 2012;95(12):4004–7.