

MEDIÇÃO DE INCLUSÕES E PARTÍCULAS

Cynthia Serra Castro Batista¹
Diana Pérez Escobar¹
Antonio Malynowskyj²
Kenji Camey³
Ed Juarez Mendes Taiss⁴
Margareth Spangler Andrade⁵

Resumo

Este trabalho tem como objetivo estabelecer uma metodologia de avaliação de inclusões não metálicas em aços microligados através dos resultados obtidos por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). A metodologia central é baseada na definição de uma relação estequiométrica crítica entre óxidos, sulfetos, carbonetos e nitretos para classificação destas. Pode-se assim analisar de forma quantitativa e completa o mapeamento inclusionário, avaliando as inclusões e partículas predominantes do material, caracterizando as mais representativas e reduzindo o tempo de uso do MEV.

Palavras-chave: Inclusões; Partículas; Aço Microligado; MEV

INCLUSIONS AND PARTICLES MEASUREMENT

Abstract

The objective of this work is to establish a methodology for the evaluation of nonmetallic inclusions in microalloy steels through the results obtained by Scanning Electron Microscopy (SEM). The focus is based on the definition of a critical stoichiometric relation between oxides, sulfides, carbides and nitrites for their classification. It is possible to analyze quantitatively and completely the inclusionary mapping, evaluating the inclusions and predominant particles of the material, characterizing the most representative and reducing the time of use of the SEM.

Keywords: Inclusions; Particles; Micro alloyed Steel; SEM

¹ *Doutora em Engenharia Metalúrgica, Pesquisadora em Tecnologia, Instituto SENAI de Inovação em Metalurgia e Ligas Especiais, CIT SENAI FIEMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Doutor em Engenharia Metalúrgica, Gerente Técnico, GAB-OB-TAG - PESQUISA E DESENVOLVIMENTO, Chapas grossas, Gerdau Ouro Branco, Ouro Branco, MG, Brasil.*

³ *Ph.D em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Gerente Técnico, GAB-OB-TAG -TECNOLOGIA AÇOS E GESTÃO, Chapas grossas, Gerdau Ouro Branco, Ouro Branco, MG, Brasil.*

⁴ *Engenharia Metalúrgica, Consultor, Companhia Brasileira em Mineração e Metalurgia CBMM, Araxá, MG, Brasil.*

⁵ *Doutora em Ciências aplicadas, Professora, REDEMAT, UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

Aços microligados são pesquisados, desenvolvidos e fabricados desde meados do século passado. Porém, devido ao grau de complexidade e sofisticação crescente para determinadas aplicações, a metalurgia de processamento requer atenção. Pode-se observar isto em ampla revisão bibliográfica feita por Villalobos *et al.* [1].

O controle e engenharia de inclusões nestes aços são de suma importância nas propriedades do material, e é amplamente discutido em diversas referências revisionais relatadas Zhang *et al.* [2] e Costa e Silva [3], principalmente no que concerne ao uso destes em ambiente ácido (“sour service”) e susceptibilidade ao “HIC” (Hydrogen Induced Crack).

Existe uma vasta diversidade de métodos para análise de inclusões, que foram objeto de estudos detalhados relatados Cathcart [4] e Cicutti *et al.* [5] e apresentada de forma pragmática em dissertação [6], como Métodos Diretos e Indiretos, a ser detalhado a seguir.

Para Métodos Diretos, consideram-se duas partes: Avaliação de Inclusões em Seções Planas e Avaliação de Inclusões em Volumes Sólidos. No caso de Seções Planas, as técnicas são: Microscopia Ótica (MO), Análise de Imagem (IA), Análise de Baumann, Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Espectrometria de Emissão Ótica com Análise de Discriminação de Pulso (OES-PDA). Para o caso de Volumes Sólidos as técnicas são: Ultrassom, Detecção de Inclusões Mannesmann (MIDAS), Microscopia Acústica de Varredura, Detecção por Raios-X, Eletrólise.

Para Métodos Indiretos temos as seguintes técnicas: Medição de Oxigênio Total, Pick-up de Nitrogênio, Perda de Alumínio Dissolvido, e *Clogging* na Válvula Submersa.

Alguns autores [7-9] mostram desenvolvimentos e desdobramentos metodológicos para análise e mapeamento inclusivo para diversas situações e tipos de aços, estabelecendo regras bem definidas e automatizadas (softwares ASPEX, INCA, AZTEC etc.), para denominação, classificação e quantificação de inclusões não metálicas e partículas, obtendo bons resultados para as situações e exemplos apresentados. A aplicação deste método neste trabalho (AZTEC - Oxford), para amostras de aços microligados, de placas lingotada continuamente, mostrou ser incompleto, devido a não classificação de grande parte das inclusões/partículas detectadas, além do fato de generalizar as classificações de forma muito abrangente, dificultando uma análise eficaz.

Apesar da precisão para uma inclusão individual, que normalmente são heterogêneas e possuem diversas fases, fica a questão de como fazer isto de forma robusta, em tempo exequível, para um conjunto de dados elevados (p. ex. acima de 4000 inclusões por amostra). Esta foi a motivação para o desenvolvimento de uma metodologia de análise que atenda todos os tipos de partículas/inclusões, propondo os passos iniciais para uma padronização e norma de classificação de inclusões/partículas em MEV.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Métodos e Materiais

Para análise das inclusões e partículas foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura modelo JEM 7100 FLV, marca JEOL, com detector de EDS (Energy-dispersive X-ray spectroscopy) da marca Oxford, modelo X-80.

Durante uma análise por EDS, uma fase contendo inclusão e/ou partícula pode apresentar as seguintes características, de forma individual ou mesclada:

- Inclusões não metálicas endógenas puras: Óxido, Sulfeto, Oxisulfeto, conforme Fig. 1a.
- Partículas puras: Nitreto, Carboneto, Carbonitreto, conforme Fig. 1b.
- Associação de Inclusão pura, com Partícula pura, intercalada com uma região Mista, conforme Fig. 1c.
- Idem Fig. 1c, de forma mais complexa, acoplada a uma região sem classificação definida.

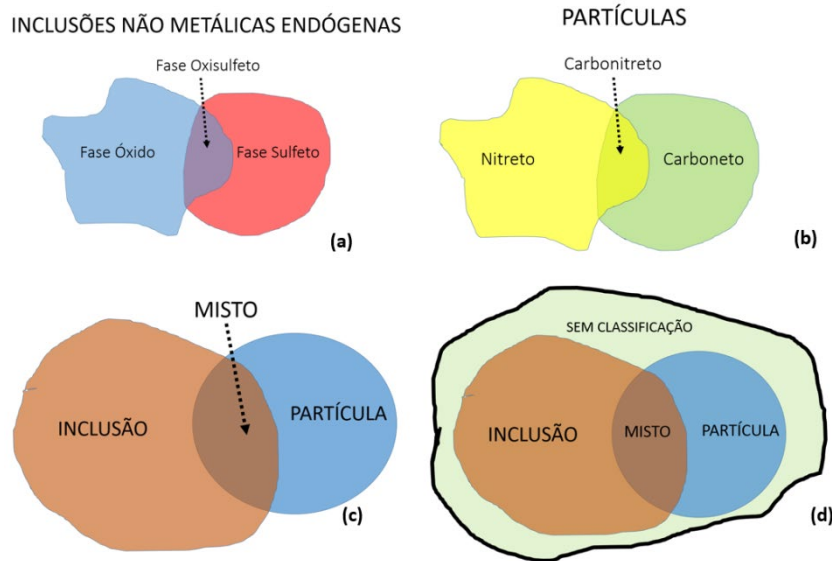


Figura 1. Classificação genérica de uma fase contendo inclusão e/ou partícula.

As fases de óxidos simples mais comumente encontrada nos aços microligados estudados são o Al_2O_3 , CaO e MgO , e os sulfetos simples o MnS , CaS e MgS conforme mostra esquematicamente a Fig. 2a, existindo ainda a possibilidade de formação de óxidos ou sulfetos duplos/ternários, conforme mostram as Figs. 2b e 2c respectivamente. Os oxisulfetos são a mistura entre óxido e sulfetos, com as respectivas fases, conforme mostra a Fig. 2d.

Seguindo este raciocínio, as partículas na forma simples de nitreto mais frequente são o AlN , TiN e NbN , e os carbonetos TiC e NbC conforme mostra esquematicamente a Fig. 3a. A formação de nitretos e carbonetos duplos/ternários, também é válida, conforme mostram as Figs. 3b e 3c respectivamente, sendo que os carbonitreto a exemplo dos oxisulfetos são a mistura entre estas fases conforme mostra a Fig. 3d. É possível a formação de óxidos complexos p. ex. aluminatos de cálcio do tipo $xAl_2O_3.yCaO$ e espinélio ($Al_2O_3.MgO$), além de sulfetos duplos por exemplo, $CaS.MnS$, de forma que a combinação de fases entre si aumentam exponencialmente sua complexidade, o mesmo ocorrendo para a formação de carbonetos e nitretos complexos.

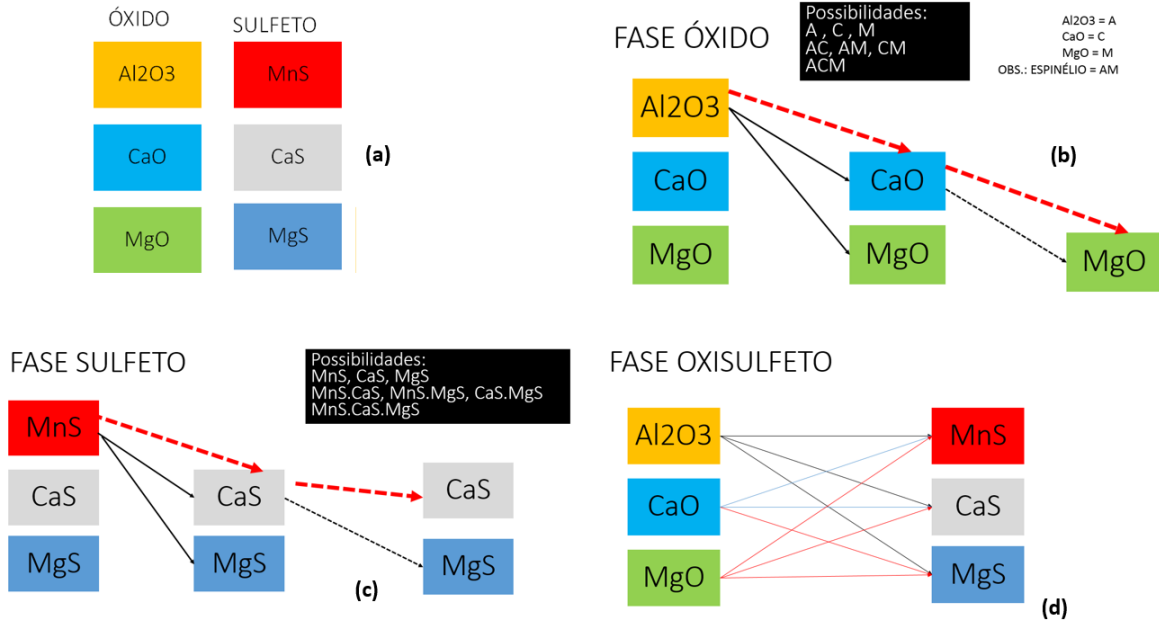


Figura 2. Classificação genérica de uma inclusão contendo óxido e sulfeto.

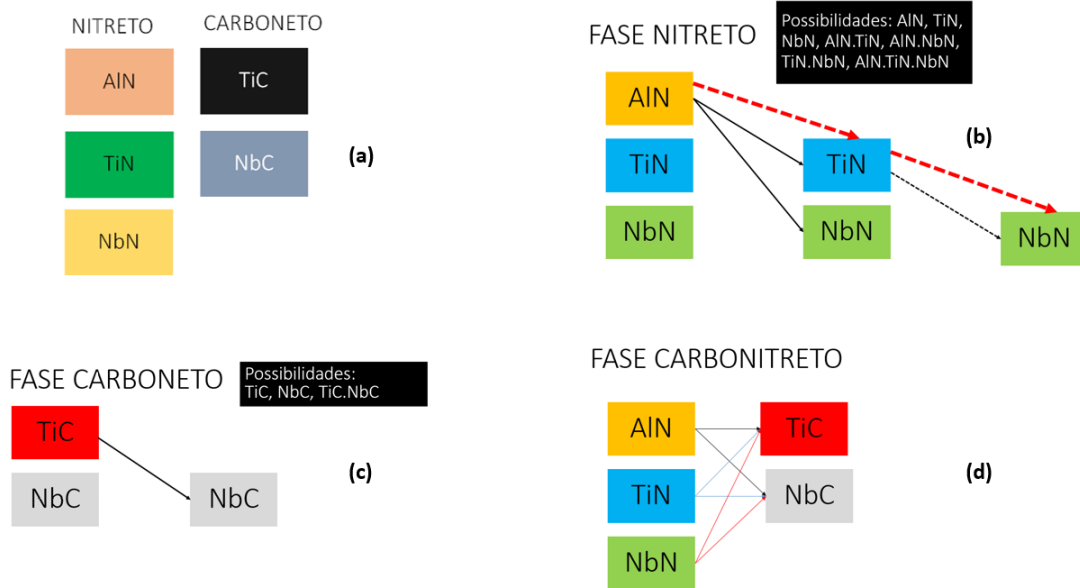


Figura 3. Classificação genérica de uma partícula contendo nitreto e carboneto.

Softwares de cálculos termodinâmicos (p. ex.: FactSage, ThermoCalc, etc) podem modelar com bastante precisão uma precipitação de fases para a condição de equilíbrio. Para um check dos resultados por meio de EPMA (Electron probe microanalysis) a avaliação destes mostrou uma séria dificuldade de classificação das inclusões partículas conforme descritas no item 1.

Para isso desenvolveu-se a metodologia, baseando-se na relação estequiométrica das diversas fases, e em diversas partículas. Tomando por base inclusões de sulfetos, observamos pela Fig. 4, que as relações estequiométricas X_i/S , para um sulfeto simples, onde $X_i = \{Mn, Ca, S\}$ são respectivamente, 1,71, 1,25 e 0,76 para o MnS, CaS, MgS (Figs. 4a, 4b e 4c respectivamente).

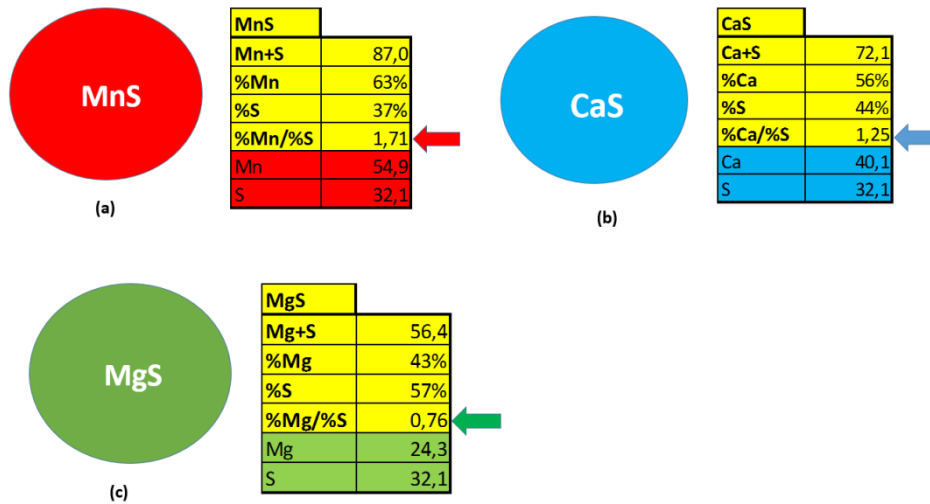


Figura 4. Relação estequiométrica em sulfetos simples (MnS, CaS, MgS).

Da mesma forma, para sulfetos duplos as relações estequiométricas são de 0,86 para o MnS e 0,62, para o CaS. Para os sulfetos triplos estas relações estequiométricas são mais reduzidas. No caso do MnS passa a ser 0,57, para o CaS 0,42 e MgS igual a 0,25, conforme mostra a Figura 5. Ou seja, quanto mais complexo for o sulfeto, menor será a relação estequiométrica em relação a sua fase mais simples.

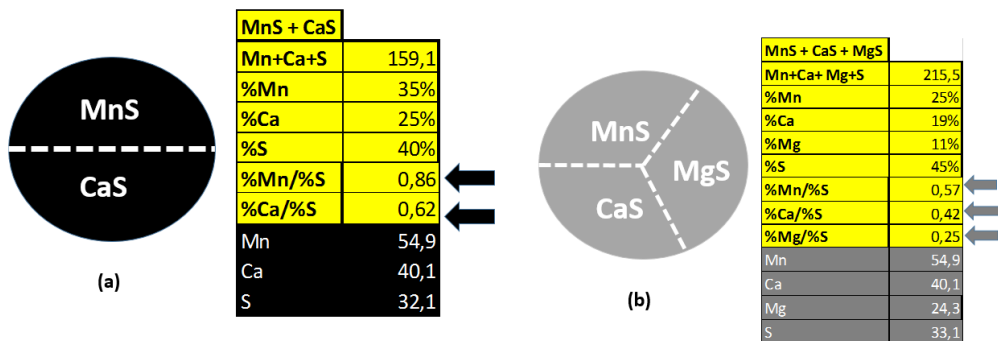


Figura 5. Relação estequiométrica em sulfetos duplo (MnS.CaS) e triplo (MnS.CaS.MgS)

Desta maneira é possível resumir na Tabela 1 estas relações para os sulfetos, e definir um valor crítico para relação $[X_i/S]^*$, mostrando assim a presença ou não, destas fases em determinada inclusão e/ou partícula. O mesmo raciocínio pode ser estendido para óxidos (X_i/O), nitretos (X_i/N) e carbonetos (X_k/C), conforme a Figura 6, sendo possível obter tabelas similares à Tabela 1 para óxidos, nitretos e carbonetos respectivamente.

Tabela 1 – Relação X_i/S para sulfetos			
X_i/S	Mn/S	Ca/S	Mg/S
Simplex	1,71	1,25	0,76
Duplo	0,86	0,62	-
Triplo	0,57	0,42	0,25

SULFETO	MnS		CaS 68%		MgS 47%	$X_i = \{Mn, Ca, Mg\}$	
	Mn/S	1,71	Ca/S	1,25	Mg/S		0,76
	Mn+S	87,00	Ca+S	72,14	Mg+S		56,37
	Mn	54,94	Ca	40,08	Mg		24,31
	S	32,07	S	32,07	S	32,07	
ÓXIDO	Al₂O₃		CaO		MgO	$X_j = \{Al, Ca, Mg\}$	
	Al/O	1,12	Ca/O	2,51	Mg/O		1,52
	2Al+3O	101,96	Ca+O	56,08	Mg+O		40,30
	Al	26,98	Ca	40,08	Mg		24,31
	O	16,00	O	16,00	O	16,00	
NITRETO	AlN		TiN		NbN	$X_k = \{Al, Ti, Nb\}$	
	Al/N	1,93	Ti/N	3,42	Nb/N		6,63
	Al+N	40,99	Ti+N	61,87	Nb+N		106,91
	Al	26,98	Ti	47,87	Nb		92,91
	N	14,01	N	14,01	N	14,01	
CARBONETO	TiC		NbC			$X_l = \{Ti, Nb\}$	
	Ti/C	3,99	Nb/C	7,74			
	Ti+C	59,88	Nb+C	104,92			
	Ti	47,87	Nb	92,91			
	C	12,01	C	12,01			

Figura 6. Relação estequiométrica para os óxidos, sulfetos, nitretos e carbonetos simples.

Após esta análise, pode-se estabelecer a seguinte regra para este método:

A inclusão ou partícula somente terá o:

- Sulfeto: quando X_i/S for maior que $[X_i/S]^*$
- Óxido: quando X_j/O for maior que $[X_k/O]^*$
- Nitreto: quando X_k/N for maior que $[X_l/N]^*$
- Carboneto: quando X_l/C for maior que $[X_i/C]^*$

Os valores de $[X_i/S]^*$, $[X_k/O]^*$, $[X_l/N]^*$ e $[X_i/C]^*$ deverão ser definidos para cada família de aço. Se estes forem acima do limite das fases simples, estas não seriam consideradas na metodologia de classificação. Se forem muitos pequenos, seriam considerados resultados falsos positivos de presença de determinadas inclusões e/ou partículas. Neste trabalho, após levantamento extensivo, foi arbitrado pelos autores, o valor limite de $[X_i/S]^* = [X_k/O]^* = [X_l/N]^* = [X_i/C]^* = 0,4$ para classificação das fases dentro de uma inclusão e/ou partícula, para o aço microligado.

Para exemplificar a aplicação metodológica, foi utilizada uma amostra de placa de aço HTP API X65, desenvolvido pela Gerdau Ouro Branco, lingotada continuamente, com composição química apresentada na Tabela 2.

Tabela 2. Composição química do aço HTP API X65

C	Mn	Si	Nb	Al	N	Adições
0,050	0,701	0,201	0,070	0,033	0,0042	Cu, Ni, Ti, Cr

A Tabela 3 apresenta resultados obtidos da análise da composição química de algumas inclusões/partículas detectadas.

Adotando o critério $[X_i/S]^* = [X_j/O]^* = [X_k/N]^* = [X_l/C]^*$ maior/igual a 0,4, a Tabela 4, mostra os resultados para valores superiores a este limite. Desta forma, a presença das fases é consolidada conforme a Tabela 5 e, como mostrado na Tabela 6, estabelece-se as classificações para inclusões e partículas.

Tabela 3. Composição química das inclusões/partículas, para demonstração da metodologia.

Elemento (em Peso %)														
N	Id	C	N	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Ti	Mn	Fe	Nb	Total %
1	1	7,18		9,92	0,53	6,40			6,91	0,67		68,40		100
2	2	3,95		3,46		0,84		1,66	6,08	2,03		81,99		100
3	10	4,52		6,14	1,68	2,56		5,16	7,64	2,12		68,97	1,20	100
4	17	9,70		2,80			0,80					86,70		100
5	18	2,67		9,49	6,86	6,34			4,79	3,05		66,80		100
6	38	3,47		14,98	0,70	9,80		4,46	16,56	3,35		44,71	1,96	100
7	49	3,36		4,42	0,95	2,97		0,99	3,31	3,18		80,83		100
8	57	3,87		8,17	5,38	3,40			2,48	4,75		69,95	2,00	100
9	64	10,02		7,00	1,80	1,81			1,77	1,16		76,43		100
10	67	3,89	9,32		3,71	1,09		2,02	3,33	24,16		47,51	4,98	100
11	83	12,22		3,22			0,54					84,02		100
12	146	3,59						5,85	8,63	2,92		76,92	2,08	100
13	189	2,81	3,70	7,91	2,12	4,21			1,82	6,33		68,55	2,55	100
14	449	3,04		6,94	3,73	4,01			2,07	5,63		72,23	2,34	100
15	686	5,37						2,53	3,19			88,92		100
16	702	5,54	3,13	4,41	0,45	0,75		0,90	0,77	7,07		71,39	5,58	100
17	919		8,50		0,43	2,09		5,30	9,74	4,72		67,41	1,81	100
18	940	4,32	3,59	3,96		1,94			1,14	1,71		81,90	1,43	100

Tabela 4. Relações estequiométricas superiores a 0,4, conforme critério adotado, para $[X_i/S]^*$, $[X_i/O]^*$, $[X_k/N]^*$ e $[X_i/C]^*$ para demonstração da metodologia.

N	Id	Mn/S	Ca/S	Mg/S	Al/O	Ca/O	Mg/O	Al/N	Ti/N	Nb/N	Ti/C	Nb/C
1	1				0,65	0,70						
2	2		3,67			1,76					0,51	
3	10		1,48		0,42	1,25					0,47	
4	17											
5	18				0,67	0,51	0,72				1,14	
6	38		3,71		0,65	1,11					0,96	0,56
7	49		3,34	0,96	0,67	0,75					0,95	
8	57				0,42		0,66				1,23	0,52
9	64											
10	67		1,64	1,83					2,59	0,53	6,21	1,28
11	83											
12	146		1,47								0,81	0,58
13	189				0,53			1,14	1,71	0,69	2,25	0,91
14	449				0,58		0,54				1,85	0,77
15	686		1,26									
16	702		0,85	0,49					2,26	1,78	1,28	1,01
17	919		1,84						0,56			
18	940				0,49			0,54	0,48			

Tabela 5. Consolidação das fases presentes nas partículas, conforme critério adotado na Tabela 4 para demonstração da metodologia.

N	Id	Mn/S	Ca/S	Mg/S	Al/O	Ca/O	Mg/O	Al/N	Ti/N	Nb/N	Ti/C	Nb/C
1	1				(Al ₂ O ₃)	(CaO)						
2	2		(CaS)			(CaO)					(TiC)	
3	10		(CaS)		(Al ₂ O ₃)	(CaO)					(TiC)	
4	17											
5	18				(Al ₂ O ₃)	(CaO)	(MgO)				(TiC)	
6	38		(CaS)		(Al ₂ O ₃)	(CaO)					(TiC)	(NbC)
7	49		(CaS)	(MgS)	(Al ₂ O ₃)	(CaO)					(TiC)	
8	57				(Al ₂ O ₃)		(MgO)				(TiC)	(NbC)
9	64											
10	67		(CaS)	(MgS)					(TiN)	(NbN)	(TiC)	(NbC)
11	83											
12	146		(CaS)								(TiC)	(NbC)
13	189				(Al ₂ O ₃)			(AlN)	(TiN)	(NbN)	(TiC)	(NbC)
14	449				(Al ₂ O ₃)		(MgO)				(TiC)	(NbC)
15	686		(CaS)									
16	702		(CaS)	(MgS)					(TiN)	(NbN)	(TiC)	(NbC)
17	919		(CaS)						(TiN)			
18	940				(Al ₂ O ₃)			(AlN)	(TiN)			

Tabela 6. Classificação das Inclusões e Partículas para demonstração da metodologia. SC: sem classificação

T	Id	Tipo	Inclusão	Subclasse	Partícula	Subclass1
1	1	Inclusão Pura	Óxido	(Al ₂ O ₃)(CaO)		
2	2	Misto	Oxisulfeto	(CaS)(CaO)	Carboneto	(TiC)
3	10	Misto	Oxisulfeto	(CaS)(Al ₂ O ₃)(CaO)	Carboneto	(TiC)
4	17	SC	SC	SC	SC	SC
5	18	Misto	Óxido	(Al ₂ O ₃)(CaO)(MgO)	Carboneto	(TiC)
6	38	Misto	Oxisulfeto	(CaS)(Al ₂ O ₃)(CaO)	Carboneto	(TiC)(NbC)
7	49	Misto	Oxisulfeto	(CaS)(MgS)(Al ₂ O ₃)(CaO)	Carboneto	(TiC)
8	57	Misto	Espinélio	(Al ₂ O ₃)(MgO)	Carboneto	(TiC)(NbC)
9	64	SC	SC	SC	SC	SC
10	67	Misto	Sulfeto	(CaS)(MgS)	Carbonitreto	(TiN)(NbN)(TiC)(NbC)
11	83	SC	SC	SC	SC	SC
12	146	Misto	Sulfeto	(CaS)	Carboneto	(TiC)(NbC)
13	189	Misto	Óxido	(Al ₂ O ₃)	Carbonitreto	(AlN)(TiN)(NbN)(TiC)(NbC)
14	449	Misto	Espinélio	(Al ₂ O ₃)(MgO)	Carboneto	(TiC)(NbC)
15	686	Inclusão Pura	Sulfeto	(CaS)		
16	702	Misto	Sulfeto	(CaS)(MgS)	Carbonitreto	(TiN)(NbN)(TiC)(NbC)
17	919	Misto	Sulfeto	(CaS)	Nitreto	(TiN)
18	940	Misto	Óxido	(Al ₂ O ₃)	Nitreto	(AlN)(TiN)

Com base nestes dados, obtiveram-se os seguintes resultados: Inclusão Pura: 2; Misto: 13; Sem Classificação: 3. Subclassificando Inclusão Pura temos: Óxido: (Al₂O₃)(CaO) e Sulfeto:(CaS). Para as inclusões/partículas (misto) teremos:

- 02 - Espinélio:(Al₂O₃)(MgO) + Carboneto:(TiC)(NbC)
- 01 – Óxido: (Al₂O₃)(CaO)(MgO) + Carboneto: (TiC)
- 01 - Óxido: (Al₂O₃) + Carbonitreto: (AlN)(TiN)(NbN)(TiC)(NbC)
- 01 – Óxido: (Al₂O₃) + Nitreto: (AlN)(TiN)
- 01 – Oxisulfeto: (CaS)(CaO) + Carboneto: (TiC)
- 01 – Oxisulfeto: (CaS)(Al₂O₃)(CaO) + Carboneto: (TiC)
- 01 – Oxisulfeto: (CaS)(Al₂O₃)(CaO) + Carboneto: (TiC)(NbC)
- 01 – Oxisulfeto: (CaS)(MgS)(Al₂O₃)(CaO) + Carboneto: (TiC)
- 01 – Sulfeto: (CaS)(MgS) + Carbonitreto: (TiN)(NbN)(TiC)(NbC)
- 01 – Sulfeto: (CaS) + Carboneto: (TiC)(NbC)
- 01 – Sulfeto: (CaS)(MgS) + Carbonitreto: (TiN)(NbN)(TiC)(NbC)
- 01 – Sulfeto: (CaS) + Nitreto: (TiN)

2.2 Resultados

Utilizando-se o MEV, conforme descrito no item 1, foi feita uma varredura em uma área de 36 mm², obtendo-se um total de 2822 inclusões e/ou partículas. Para esta amostra, foi aplicado o mesmo procedimento descrito em 2.1, tendo resultado em uma descrição geral do mapeamento das inclusões, apresentados nas Figuras 7, 8, 9, 10,

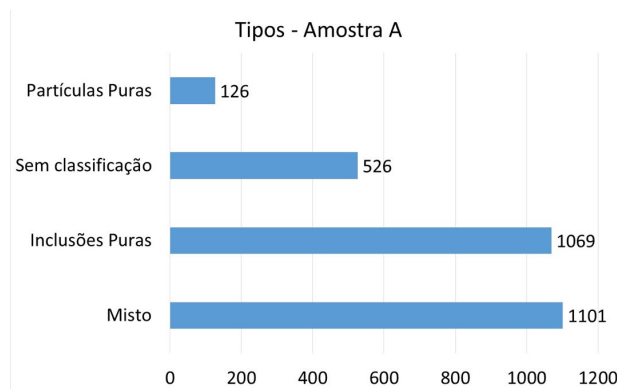


Figura 7. Mapeamento das inclusões por tipos

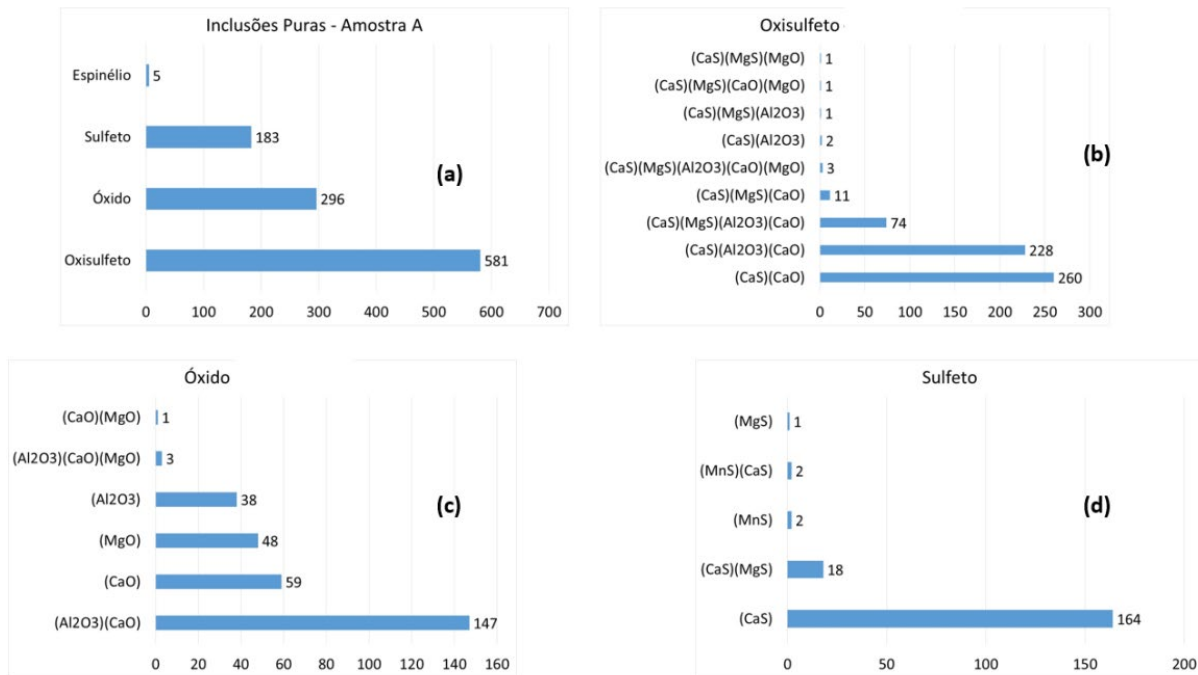


Figura 8. Mapeamento das inclusões puras (oxisulfetos, óxidos e sulfetos)

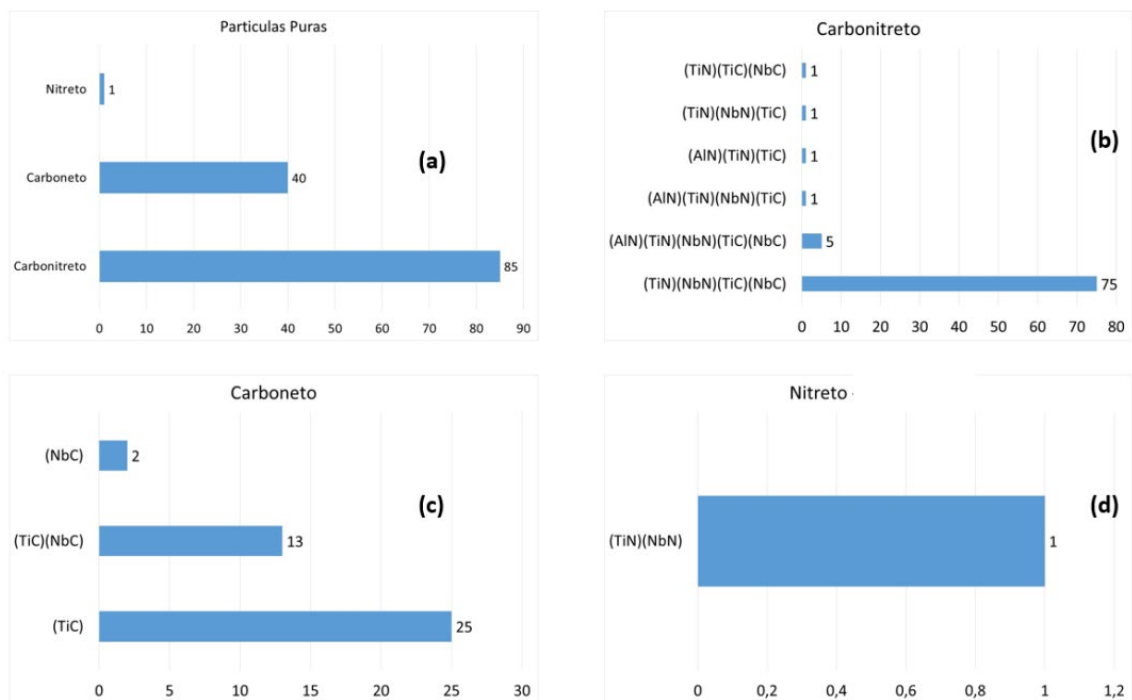


Figura 9. Mapeamento das partículas puras (carbonitreto, carbonetos e nitretos)

2.2 Discussão

Na Figura 7, observa-se que a precipitação de partículas puras é muito pequena (126) quando comparada com as inclusões puras (1069) e mistas (1101). Existe também um número significativo de fases consideradas sem classificação (526), nas quais, após uma análise prévia, mostrou ter em sua composição, (%Fe + %C) superior a 85, sendo o restante Mn e Si, com residuais de oxigênio.

Como pode ser observado na Figura 8, praticamente todos oxissulfetos, que são a maioria das inclusões puras, tem em sua constituição fases de $(CaS).(CaO) = 260$ e $(CaS)(CaO)(Al_2O_3) = 228$, caracterizando assim o processo de metalurgia secundária aplicado (injeção de cálcio). O mesmo se observou para os óxidos (Fig. 8c), onde os aluminatos de cálcio prevaleceram (147). Estas conclusões são fortalecidas pela ausência de sulfetos de Mn, sendo detectadas apenas duas ocorrências, conforme mostra a Fig. 8d, predominando neste caso apenas sulfetos de Ca ($CaS = 164$), típico deste processo.

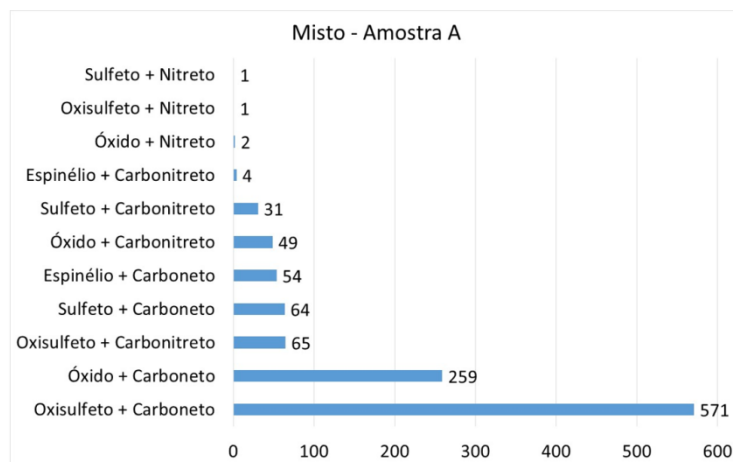


Figura 10. Mapeamento das partículas mistas (inclusões + partículas)

Conforme observamos na Figura 9, a quantidade prevalecente de partículas puras são de carbonitreto complexos $(TiN)(NbN)(TiC)(NbC)$, com um total de 75 ocorrências. Praticamente não houve precipitação de nitretos puros (apenas uma ocorrência). A Figura 10 mostra que as fases mistas (inclusões e partículas), são em sua maioria, constituídas de oxissulfetos + carbonetos (571) seguida de óxidos + carbonetos, com um total de 259 ocorrências.

3 CONCLUSÃO

- Com o emprego desta nova metodologia, pode-se analisar de forma mais completa o mapeamento de inclusões nas amostras de aços estudados.
- Com a aplicação da forma quantitativa apresentada neste trabalho, podem-se avaliar as inclusões e partículas predominantes do material, podendo assim, com o uso de EDS, caracterizar as inclusões mais representativas.
- O pragmatismo do método está na determinação balanceada dos valores limites de $[X_i/S]^*$, $[X_k/O]^*$, $[X_i/N]^*$, $[X_i/C]^*$ para classificação das fases dentro de uma inclusão e/ou partícula, para o aço estudado.
- De forma genérica, podem-se estabelecer os pontos iniciais para uma nova normalização de avaliação de inclusões e partículas pelo método MEV em amostras de aço.

Agradecimentos

Agradecemos à CBMM, Gerdau Ouro Branco – MG e Instituto SENAI de Inovação em Metalurgia e Ligas Especiais CIT SENAI FIEMG, BH-MG pelo apoio e infraestrutura no desenvolvimento deste projeto de P&DI.

REFERÊNCIAS

- 1 Villalobos JC, Del-Pozo A, Campillo B, Mayen J, Serna S. Microalloyed Steels through History until 2018: Review of Chemical Composition, Processing and Hydrogen Service, *Metals* 2018, 8, 351; doi: 10.3390/met805035.
- 2 Zhang L, Thomas BG. State of the Art in Evaluation and Control of Steel Cleanliness. *ISIJ Int* 2003; 43(3):271–91.
- 3 Costa e Silva AL. Non-metallic Inclusions in Steels – Origin and Control. *J Mater Res Technol.* 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.04.003>.
- 4 Cathcart CR. Clean Steel Assessment. *AISTech 2018 Proceedings*, 1523-1547.
- 5 Cicutti C, Capurro C. Steel Cleanliness Evaluation Techniques Review. Application to Different Industrial Cases. 21ª Conferencia del Acero IAS, September 2016, Rosario, Santa Fe, Argentina. doi: 10.13140/rg.2.2.21919.36005
- 6 Berliini CF. Efeito da Adição de Cálcio na Formação de Inclusões em Aços Médio Teor de Carbono Desoxidados ao Alumínio. Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais. Área de Concentração: Metalurgia Extrativa. Orientador: Prof. Dr. Maurício Covcevich Bagatini. Escola de Engenharia da UFMG, 2017, 49-52.
- 7 Adaba O, Harris M, O'Malley RJ, Lekakh SN, Von L. Richards, Sutcliffe N. An SEM/EDS Statistical Study of the Effect of Mini-Mill Practices on the Inclusion Population in Liquid Steel, 2015 [acesso em 01 jun. 2018]. Disponível em: [<https://www.researchgate.net/publication/318311563>].
- 8 Raines JP, Abraham S, Bodnar RL, Wang Y. Comparison of Image Analysis and SEM-Based Cleanliness Rating Systems for Clean Steel Process Improvement. *International Symposium on the Recent Developments in Plate Steels, AISTech 2011 Proceedings*, 329-342.
- 9 Harris M, Adaba O, Lekakh S, O'Malley R, Von L. Richards. Improved Methodology for Automated SEM/EDS Non-Metallic Inclusion Analysis of Mini-Mill and Foundry Steels. *AISTech 2015 Proceedings*, 3315- 3325.