

# SOFTWARE DE DOCUMENTAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE INCLUSÕES NÃO METÁLICAS EM AÇOS DE BAIXO CARBONO DESOXIDADOS AO Al ou Si.<sup>(1)</sup>

*Gabriel Mesquita de Paula<sup>(2)</sup>  
Marcolino Fernandes Neto<sup>(3)</sup>  
Cristiane Fonseca Freitas<sup>(4)</sup>  
Ricardo Loschi de Freitas<sup>(5)</sup>*

## Resumo

Este trabalho visa o desenvolvimento de um software para documentar e interpretar a composição química elementar de inclusões não metálicas, presentes em aços de baixo carbono desoxidado ao Al ou Si, em diagramas ternários ou quaternários apropriados. O software desenvolvido para este fim, transforma a composição química elementar de inclusões, obtida através do microscópio eletrônico de varredura (MEV) acoplado a um sistema de análise por energia dispersiva (EDS), em óxidos, por meio de cálculos estequiométricos. Em seguida, os óxidos são representados em diagramas de fases ternários ou quaternários adequados, mostrando claramente as fases constituintes das inclusões além de possibilitar a documentação de tais inclusões. A partir de análises químicas elementares de inclusões não metálicas, obtidas com MEV/ EDS e com a utilização do software desenvolvido neste trabalho, o aciarista poderá documentar e interpretar melhor a composição química de inclusões não metálicas presentes em aços desoxidados ao alumínio ou ao silício.

**Palavras-chave:** inclusão; diagrama de fases; aço;

1- XXXVI SEMINÁRIO DE FUSÃO, REFINO E SOLIDIFICAÇÃO DOS METAIS da ABM, a ser realizado nos dias 16,17 e 18 de maio de 2005, em Vitória – ES.

2- *Graduando em Engenharia Elétrica – ênfase em Telecomunicação.*(PUC-Minas)

3- *Doutor em Engenharia de Materiais ( UNICAMP)*

4- *Mestrado em Bioquímica(UNICAMP)*

5- *Bacharel em Ciência da Computação(PUC-Minas)*

## 1 INTRODUÇÃO

Os processos de fabricação vem sendo aperfeiçoados com o decorrer dos anos. Assim como a maioria dos outros processos industriais, na siderurgia não é diferente e o computador passou a ser uma grande ferramenta de trabalho, pela sua velocidade de processamento de informações e facilidades relacionadas ao tratamento das mesmas, possibilitando assim, obter um controle maior dos dados melhorando a qualidade do produto final.

No processo de fabricação do aço os princípios se mantiveram, alterando apenas o modo de como o trabalho é feito, visando maior segurança, controle e qualidade e evitando perdas de produtos ou matéria prima.

Um dos fatores determinantes da qualidade do aço são as inclusões não metálicas presentes no produto acabado.

Os produtos siderúrgicos, ao serem fabricados, apresentam normalmente, além do carbono como principal elemento de liga, uma série de outros elementos de natureza metálica ou não, que são chamados de impurezas, que se originam de reações entre as matérias-primas empregadas ou de outros tipos de reações. As impurezas normais são: fósforo, enxofre, manganês, silício e alumínio. A maior parte delas reage entre si ou com outros elementos não-metálicos, como o oxigênio e, eventualmente, o nitrogênio, formando as chamadas inclusões não-metálicas.<sup>(1)</sup>

É comum o relacionamento de uma determinada microestrutura, por exemplo, martensita revenida, com as propriedades mecânicas, tais como dureza, limite de resistência à tração, limite de escoamento e alongamento. É também comum o relacionamento de uma microestrutura com o processo de fabricação e os elementos de liga do aço. Entretanto, não devem ser desprezadas as impurezas (O, S, P, etc) que dão origens as inclusões não-metálicas ou ficam em solução sólida, sempre inevitáveis, que são fatores determinantes das propriedades mecânicas do aço produzido. As inclusões não-metálicas criam um campo de concentração de tensões ao seu redor, resultando no início de fraturas sempre a partir dessas regiões. As impurezas que ficam em solução sólida se concentram ao redor das inclusões, aumentando a concentração de tensões e agravando ainda mais o efeito prejudicial das inclusões nos aços. Como não é possível eliminar completamente as impurezas, e conseqüentemente as inclusões não-metálicas, é importante reduzi-las ao menor nível possível e controlar sua morfologia e distribuição no produto final.

Uma quantidade considerável de inclusões de composição bem definida pode ser desejável para melhorar certas propriedades no emprego dos produtos siderúrgicos. Como por exemplo, sulfetos e/ou óxidos plásticos a alta temperatura melhoram a usinabilidade nos aços de corte, parafusos, barras e lâ de aço. Entretanto, para a maioria dos aços, a presença de inclusões causa um efeito nocivo sobre suas propriedades físicas e mecânicas. É por isso que sempre se procura obter um aço o mais limpo possível durante o processo de fabricação e, em certos casos, o aciarista tem que controlar a composição química das inclusões residuais a fim de diminuir sua nocividade.<sup>(2)</sup>

A formação de inclusões não-metálicas é uma conseqüência inevitável da físico-química das reações metalúrgicas que ocorrem durante o processo de fabricação dos aços. Deste modo, todos os tipos de aços contém inclusões não-metálicas de alguma espécie, no mínimo em pequenas quantidades. Apesar do volume proporcionalmente pequeno, tais inclusões influenciam as propriedades mecânicas, a trabalhabilidade, a usinabilidade e o acabamento superficial dos produtos siderúrgicos. A intensidade da nocividade dessas inclusões depende da composição

química, tamanho, morfologia e distribuição das mesmas nos aços. Assim, o estudo das inclusões não-metálicas nos aços torna-se cada vez mais necessário, tanto para a indústria siderúrgica, interessada na elaboração de procedimentos de controle e minimização da ocorrência de tais inclusões, quanto para o cliente, cujas exigências aumentam na medida do desenvolvimento da tecnologia.<sup>(3)</sup>

O diagrama de fases ternário é uma ferramenta que vem sendo utilizada para a representação e a interpretação das composições químicas de inclusões que podem ser plotadas em sistemas adequados, obtendo, deste modo, um conhecimento mais amplo de tais inclusões, podendo-se determinar as fases primárias não-metálicas que constituem as inclusões, e conseqüentemente o comportamento das mesmas, através de uma análise mais detalhada dos pontos plotados sobre o diagrama ternário. Assim, as mudanças na composição química das inclusões observadas pelo exame de amostras, ao longo do seu processo de fabricação, podem ser mais facilmente acompanhadas e interpretadas quando as composições químicas são plotadas sobre um diagrama triangular com os contornos de fases do sistema de três componentes sobrepostos.<sup>(4)</sup>

Com o intuito de melhorar este trabalho, foi desenvolvido um software capaz de documentar e interpretar a composição química elementar das inclusões não metálicas e representa-las em diagrama ternário adequado.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Os óxidos mais comuns encontrados em inclusões de aços desoxidados ao alumínio são:  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $CaO$ ,  $MgO$ ,  $FeO$  e  $MnO$ . Os óxidos podem ser agrupados de acordo com sua relação oxigênio/metálico. Por exemplo, os óxidos ( $CaO$ ,  $MgO$ ,  $MnO$ , e  $FeO$ ) formam um grupo de óxidos representados pela fórmula "RO". Uma característica interessante desse grupo é a ocorrência de substituição entre os seus óxidos. Outro grupo é da  $Al_2O_3$  (alumina), representado pela fórmula " $R_2O_3$ ". O grupo do  $SiO_2$  (quartzo) é representado pela fórmula  $RO_2$ . Quando se plotam pontos referentes aos valores de composições químicas de inclusões sobre um diagrama de fases ternário, é prática comum agrupar os óxidos na seguinte ordem, RO,  $R_2O_3$  e  $RO_2$ , e então escolher o diagrama que melhor se ajusta aos grupos de óxidos. Assim, os pontos plotados no diagrama ternário representam a composição química das inclusões e indicam as fases prováveis constituintes de tais inclusões.

Para que pudéssemos transformar a composição química elementar das inclusões em óxidos, utilizamos a tabela 1 de estequiometria das reações químicas de formação de inclusões não metálicas.

Portanto, utilizando-se esse programa computacional, o aciarista obterá a representação e melhor interpretação das inclusões não-metálicas, presentes nesse tipo de aço, de forma rápida e eficiente, em diagramas de fases ternários ou quaternários apropriados.

**Tabela 1.** Estequiometria das reações químicas de formação de inclusões não metálicas

2 Al 54 g/mol	+	3 O 48 g/mol	=	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 102 g/mol
Si 28 g/mol	+	2 O 32 g/mol	=	SiO <sub>2</sub> 60 g/mol
Ca 40 g/mol	+	O 16 g/mol	=	CaO 56 g/mol
Mg 24 g/mol	+	O 16 g/mol	=	MgO 40 g/mol
Mn 24 g/mol	+	O 16 g/mol	=	MnO 71 g/mol
Fe 56 g/mol	+	O 16 g/mol	=	FeO 72 g/mol
Ti 48 g/mol	+	2 O 32 g/mol	=	TiO <sub>2</sub> 80 g/mol
K 39 g/mol	+	O 16 g/mol	=	KO 55 g/mol
Na 23 g/mol	+	O 16 g/mol	=	NaO 39 g/mol

A partir da composição química de uma dada inclusão, na forma de óxidos, a determinação do ponto, que será plotado sobre a seção de um determinado diagrama de fases ternário, é estabelecido se o valor percentual do componente em questão estiver dentro da faixa correspondente a tal diagrama. Assim, todas as composições químicas das inclusões que possuem um teor em MgO menor que 2,5% e MnO menor que 7,5% serão automaticamente selecionadas para sobrepor a seção do sistema CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>. Aquelas que possuem um teor de MnO entre 7,5% a 17,5% serão automaticamente selecionadas para sobrepor a seção de 15% de MnO do sistema CaO-MnO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>. As que possuem um teor de MnO maior do que 17,5% serão automaticamente selecionadas para sobrepor a seção de 20% de MnO do sistema CaO-MnO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>. Já aquelas que possuem um teor de MgO entre 2,5% a 7,5% serão automaticamente selecionadas para sobrepor a seção de 5% de MgO do sistema CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>. As que possuem um teor de MgO maior do que 7,5% serão automaticamente selecionadas para sobrepor a seção de 10% de MgO do sistema CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>.<sup>(3)</sup>

Os diagramas utilizados neste programa são os representados na figura 1.

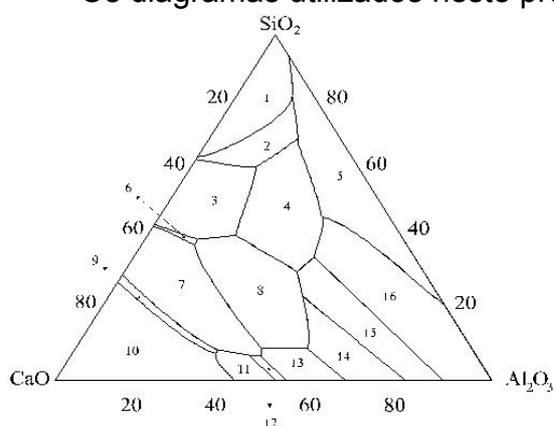


Figura 1(a)

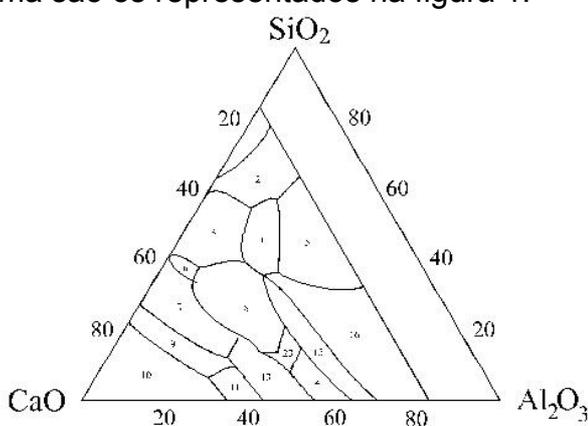
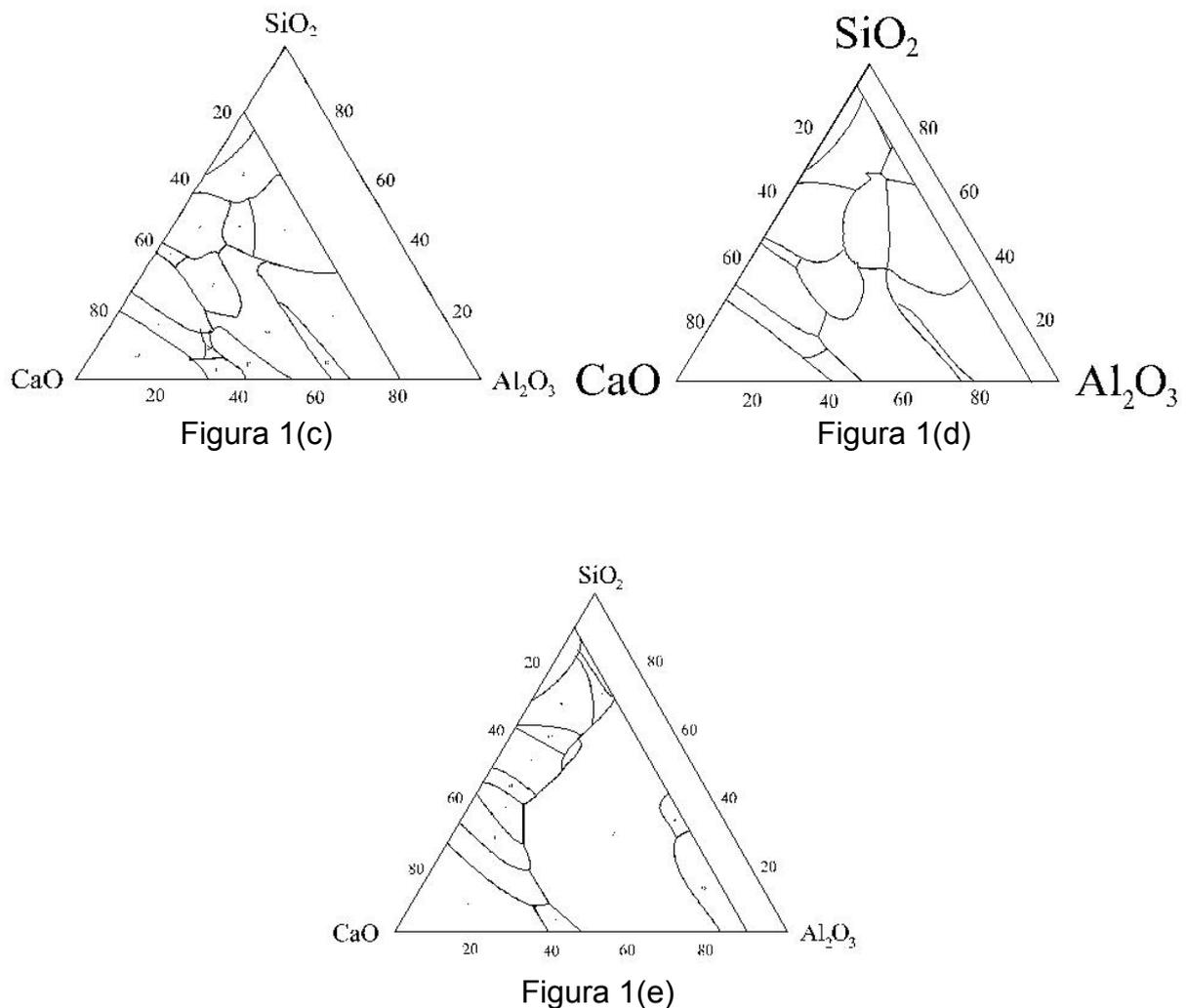


Figura 1(b)



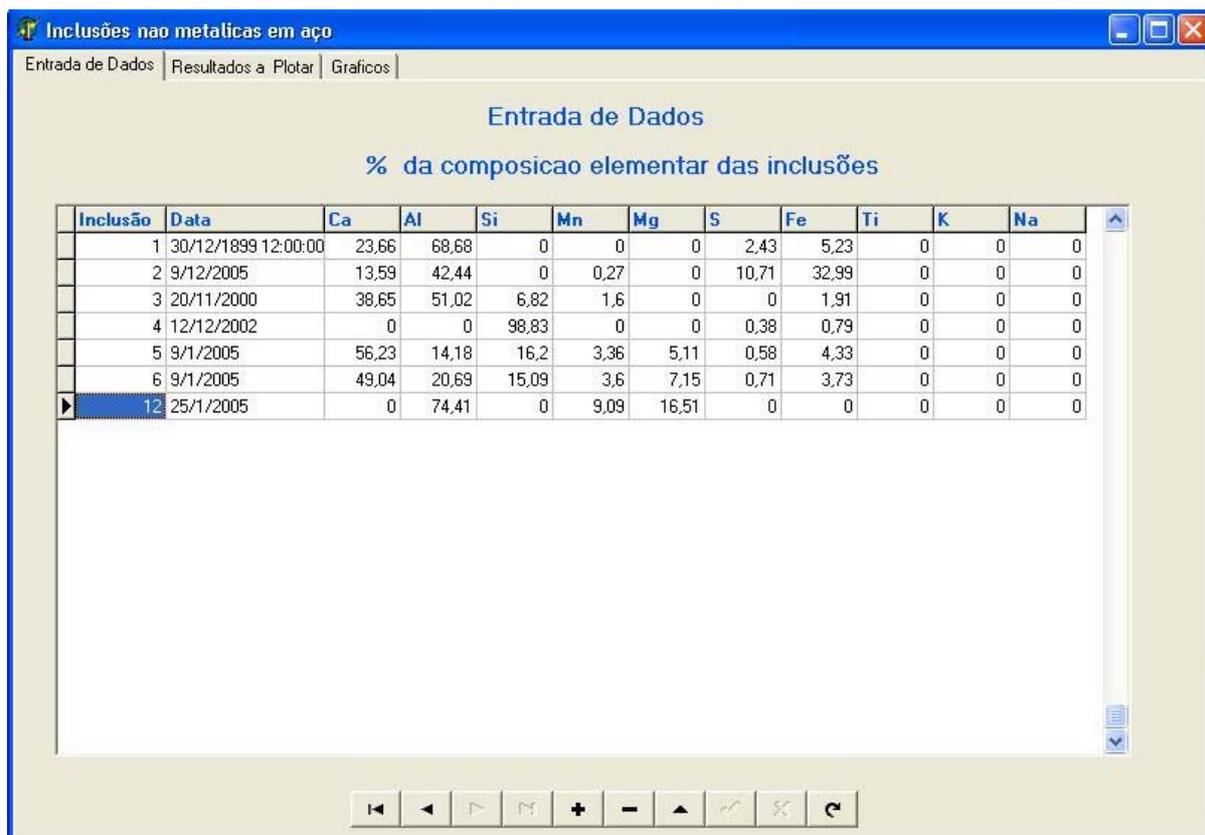
**Figura 1.** Diagramas ternários e quaternários utilizados no software. (a) Sistema - CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> com MnO < 7,5% e MgO < 2,5%. (b) Sistema - CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> com %7,5 < MnO < 17,5% e %MnO > %MgO. (c) Sistema CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> com MnO > 17,5% e %MnO > %MgO. (d) Sistema CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> com 2,5% < MgO < 7,5% e %MgO > %MnO. (e) Sistema CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> com MgO > 7,5% e %MgO > %MnO.

Todos os dados referentes às inclusões não metálicas foram retirados da tese de doutorado do professor Marcolino Fernandes Neto, inclusive os dados obtidos neste software foram comparados com o programa por ele desenvolvido.

O Programa foi desenvolvido em linguagem de programação Delphi, por ser o programa disponível nos laboratórios da universidade e pela facilidade de programação encontrada. O Delphi disponibiliza facilidades maiores para tratar recursos gráficos além de serem necessárias menos linhas de comando do que a linguagem C de programação, por ser uma linguagem de nível maior.

### 3 RESULTADOS

O programa obteve uma interface gráfica amigável e fácil de ser manipulada. A Figura 2 mostra esta interface gráfica.



**Figura 2.** Interface gráfica obtida para o programa de representação de inclusões não metálicas em diagrama ternário.

O programa foi dividido em 'Entrada de Dados', Resultados a Plotar e Gráficos. Em entrada de dados a composição química elemental é inserida através da tabela vista na Figura 2. Na paleta 'Resultados a Plotar' são mostrados os resultados das transformações da composição química da inclusão em óxidos. Em 'Gráficos' as inclusões selecionadas são mostradas sobre um diagrama de fases adequado. Nesta divisão existe um opção de imprimir os gráficos com as inclusões, fornecendo um arquivo em forma física e um arquivo em forma de bits , pois as inclusões ficam gravadas em um banco de dados no computador.

As inclusões da Tabela 2 foram inseridas no programa e obtivemos os resultados da Figura 3.

**Tabela 2.** Composição química das inclusões plotadas no software de análise.

Elemento (%) peso	Inclusão 1	Inclusão 2	Inclusão 3	Inclusão 4	Inclusão 5
Ca	13,46	16,12	1,63	14,13	5,68
Si	-	-	-	-	-
Al	32,81	50,13	13,13	51,93	16,51
S	6,83	9,69	26,15	6,99	0,82
Mn	7,08	20,4	58,79	1,99	0,12
Mg	-	3,66	-	-	-
Ti	-	-	-	-	-
K	-	-	-	-	-
Na	-	-	-	-	-
Fe	39,82	-	-	24,95	76,87

As composições químicas elementares das inclusões apresentadas na Tabela 2 são transformadas em óxidos e apresentadas em resultados a plotar para que se possa observar a porcentagem de óxido existente na inclusão. O ponto é plotado e apresentado em diagrama ternário adequado conforme mostram as Figuras de 3 a 5.

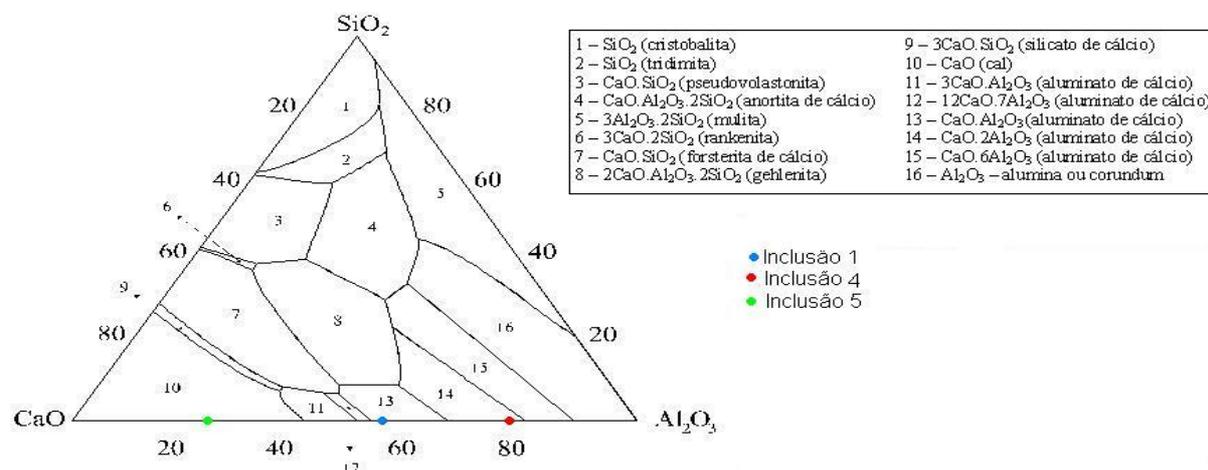


Figura 3. Resultado obtido para as inclusões 1, 4 e 5 plotadas em um sistema CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> com MnO<7,5% e MgO<2,5%.

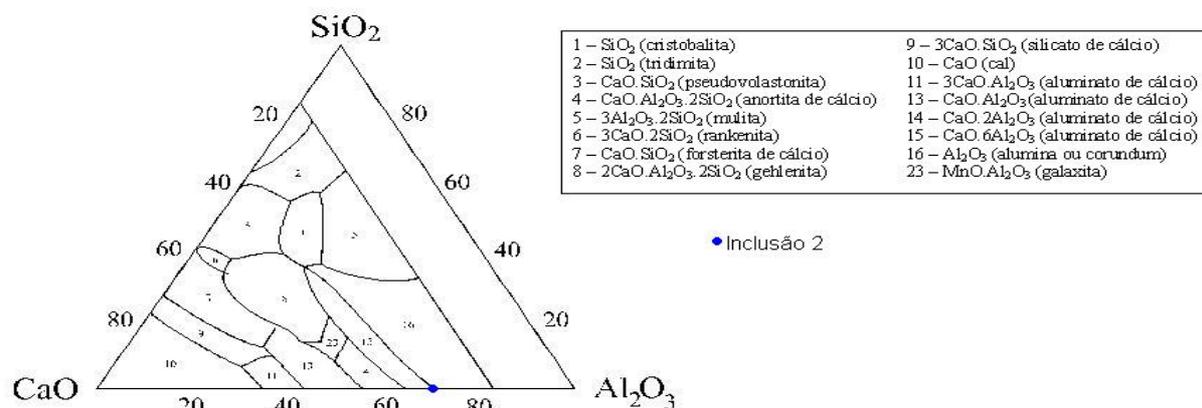


Figura 4. Resultado obtido para a inclusão 2 plotada em um sistema Sistema - CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> com %7,5<MnO<17,5% e %MnO>%MgO.

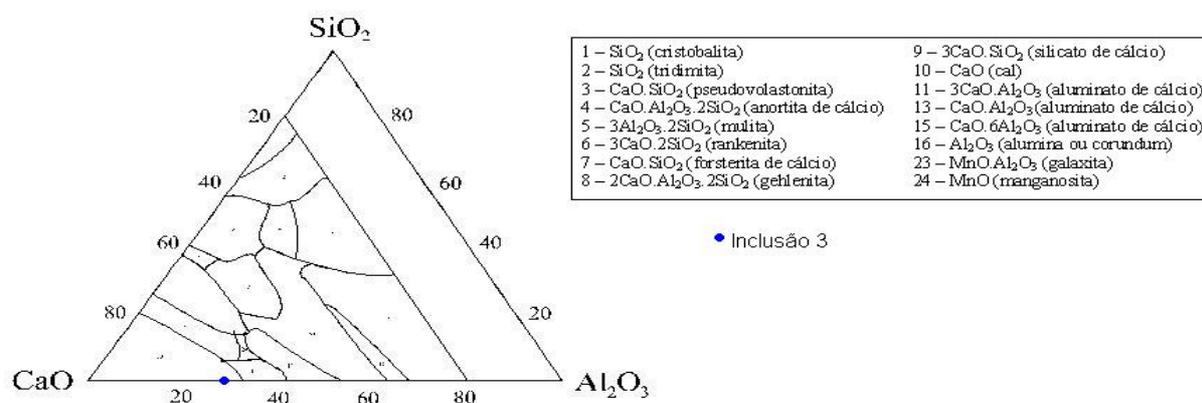


Figura 5- Resultado obtido para a inclusão 3 plotada em um sistema CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> com MnO>17,5% e %MnO>%MgO.



As inclusões no software são plotadas com diferentes cores para que possam ser facilmente identificadas na legenda do gráfico impresso.

## 5 CONCLUSÃO

Conforme observado e averiguado através dos cálculos utilizados podemos concluir que o software funciona de acordo com o programa desenvolvido no Excel. A interface gráfica ficou muito mais fácil de ser utilizada facilitando a inserção dos dados e a visualização dos mesmos devido a diferença de cor existente entre as diferentes inclusões.

Com a fácil manipulação da linguagem Delphi de programação, pode-se adaptar o programa para qualquer tipo de processo de fabricação de aço, desde que haja um estudo para se verificar as condições do processo e o levantamento dos padrões do mesmo.

### Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao FIP pelo auxílio monetário dado ao projeto, ao Professor Dr. Marcolino Fernandes Neto pela confiança e ajuda e ao Núcleo de Pesquisa e Pós Graduação da PUC Minas – campus de Poços de Caldas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 1 CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 6.ed. São Paulo: ABM, 1988.
- 2 GATELLIER, C., GAYE, H.; LEHMANN, J. Origine des inclusions dans les aciers Peu Alliés. **La Revue de Métallurgie**, p. 541-553, abril 1995.
- 3 FERNANDES NETO, M. **Análise de inclusões não metálicas em aço de baixo carbono desoxidado ao alumínio produzido por lingotamento contínuo**. 2001, Campinas. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, 2001.
- 4 WILCOX, D. P.; WHITWOOD, M. M.; DYSON, D. J. Representation and interpretation of composition of inclusions. **Ironmaking and Steelmaking**, v. 24, n. 3, 1997.

# SOFTWARE FOR DOCUMENTATION AND INTERPRETATION OF CHEMICAL COMPOSITION OF NON-METALLIC INCLUSIONS IN ALUMINUM OR SILICON KILLED LOW CARBON STEELS

## Abstract

The present inclusions in the steels' microstructure are constituted by stable non-metallic phases that harm the metallurgical product's final quality depending on its chemical nature. The behavior of those inclusions has been studied by the determination of the non-metallic phases chemical composition that form them. In this way, the present paper describes the development and the applicability of a software. With the aid of a scanning electron microscope (SEM) connected to an energy-dispersive spectrometer system (EDS), the data of the elementary chemical composition of a certain inclusion are obtained that is used as entrance of data in the software. As result is determined a point in an appropriate ternary diagram that indicates the phase primary representative of the analyzed inclusion.

**Key-words:** inclusion; diagram of phases; steel