

LES MINERAIS DE CHROME DANS LA PRODUCTION DE FERRO-CHROME CARBURE

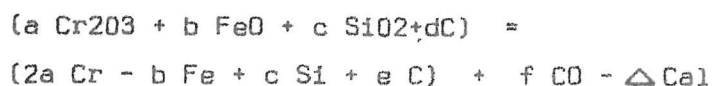
(Principes d'évaluation des chromites. Leur utilisation dans le procédé de réduction en fonction de la structure chimique et cristalline ainsi que de la distribution granulométrique. Choix du réducteur).

par C. Fornaini*
(présenté par Dr. Fornaini)

1. Introduction

Les divers alliages de ferro-chrome qui servent à préparer des types spéciaux de fontes et d'aciers sont produits au four électrique suivant des procédés bien différents.

La réaction chimique globale et simplifiée qui est exploitée pour obtenir le ferro-chrome carburé (en supposant que cette réaction se déplace complètement vers la droite) est indiquée ci-après (1) (2) :



(Réaction globalement endothermique).

En supposant, également, que la pression de l'oxyde de carbone à l'intérieur du four soit à la pression atmosphérique, le procédé de réduction pour l'exploitation industrielle commence à environ 1500°/1600° C. alors que la température théorique pour obtenir le ferro-chrome carburé est autour de 1150° C. (3) (4).

On sait bien que la température doit être élevée aux valeurs indiquées précédemment, de façon que les phénomènes lents, surtout ceux de fusion et de diffusion, puissent atteindre des vitesses telles que le procédé puisse être économique.

Le four électrique, un type très particulier de réacteur, exige la symbiose de trois processus distincts : chimique, électrique et physique. Ces processus à leur tour sont fonction de plusieurs paramètres tels que température, granulométrie et composition de la charge, coefficients d'activité des solvants dans le laitier et des gaz dans l'environnement.

Afin d'illustrer par des exemples la complexité du procédé, il vaudrait mieux le considérer comme une lente solubilisation du sesquioxyde de chrome et de l'oxyde ferreux dans le laitier liquide (phénomène dépendant de la structure cristalline du minerai, de la composition de la gangue et de la granulométrie de la chromite) pouvant causer la formation, dans des cas particuliers, d'ions qui contiennent de l'oxygène "oxydant et décarburant" au contact de l'alliage provenant du premier stade du procédé de réduction, émulsionné et fortement carburé. C'est ainsi que se rendent disponibles les agents qui permettent son affinage progressif.

* Ferroleghes S.p.A., Italie

Nous ne voudrions pas nous étendre ici sur la présentation de diagrammes d'état et d'équations de genre divers qui montrent les variations d'activité en fonction des températures ou qui donnent l'ordre des différentes réactions. Nous procéderons donc à des estimations qui sont le résultat de plusieurs années de travail au four électrique, ce qui est le but de cet exposé.

2. Les minerais de chrome

A présent, nombreux sont les problèmes concernant la matière première de base, par suite de l'amenuisement des réserves mondiales et, par conséquent, des coûts croissants des chromites de bonne qualité.

La production de ferro-chrome était effectuée dans le passé avec des chromites dont la teneur en Cr_2O_3 oscillait entre 45 et 55 % et dont les rapports Cr/Fe étaient constamment au-dessus de 3; en outre, le pourcentage en MgO , aussi bien que la perte à la calcination étaient relativement faibles. La composition de l'alliage de ferro-chrome obtenu avait une teneur en Cr supérieure à 65 %, une teneur en C entre 4 et 6 %, et une teneur en Si qui ne dépassait pas 2 %. La valeur de Cr_2O_3 dans le laitier n'était jamais au-dessous de 10 %, alors que le rendement en Cr ne dépassait jamais 0,82-0,84 (4).

Aujourd'hui, l'emploi de minerais très diversifiés tant en ce qui concerne la teneur en Cr_2O_3 que l'état physique (enrichi, fin, briqueté, pelletisé, préréduit) a pour conséquence que les techniques de production, autrefois bien définies et immuables, doivent être continuellement adaptées aux caractéristiques de ces minerais. Cette adaptation est devenue particulièrement importante mais, en même temps, de plus en plus difficile.

a) Principaux constituants des minerais de chrome

Le chrome et le fer, qui sont les principaux constituants du procédé de réduction, se trouvent dans les minerais respectivement sous forme de sesquioxyde et d'oxyde du métal bivalent, connus du point de vue minéralogique comme spinelles, de formule générale $\text{M}_2\text{O}_3 \cdot \text{MeO}$.

Les types principaux sont le $\text{Cr}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO}$ et $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO}$, mais il y a aussi des composés avec des rapports Cr/Fe intermédiaires où le fer ferrique est substitué de Cr trivalent et de l'aluminium alors que Mg et Ca, en proportion plus faible, sont substitués de Fe bivalent.

Il en résulte que même en ne prenant en considération que les éléments les plus importants, la gamme des types minéralogiques est très vaste et s'élargit démesurément quand l'on veut introduire aussi une différenciation en fonction du type de gangue.

Le tableau ci-après rassemble quelques constituants des minerais de chrome.

Tableau 1 - Composés contenus dans les chromites

<u>Oxydes métalliques</u>		
Spinelle chromifère	$MgO \cdot Cr_2O_3$	
Spinelle chromifère	$FeO \cdot Cr_2O_3$	
Magnétite	$FeO \cdot Fe_2O_3$	
Spinelle alumineux	$FeO \cdot Al_2O_3$	
Spinelle alumineux	$MgO \cdot Al_2O_3$	
<u>Gangues</u>		
Serpentine	}	$3MgO \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$
Antigorite		$6MgO \cdot 4SiO_2 \cdot 4H_2O$
Chrisotile		
Olivine	}	$2 (MgFe) O \cdot SiO_2$
Forstérite		$2MgO \cdot SiO_2$
Hyalosidérite		$(MgO \ 0,64 \ FeO \ 0,36) \ SiO_2$

La présence de silice dans les composés de la chromite est due probablement aux minerais étrangers qui composent la gangue où se trouve le spinelle de chrome.

En supposant qu'en moyenne la gangue des chromites soit formée surtout par antigorite $Mg_6Si_4O_{10}OH_8$, la silice peut être combinée suivant la formule susmentionnée; c'est ainsi que l'on peut éliminer de tout minerai les constituants propres de la gangue, de façon à identifier avec une bonne approximation la quantité de composés qui représentent la partie réductible du minerai.

b) Constantes réticulaires

Des spectres Debye-Scherrer ont été faits sur quelques charges de chromite en employant comme référence les constantes réticulaires des composés suivants :

$FeO (Cr-Al)_2O_3$	Aluminium chromite Al oscillant entre 0 et 33 % Constante réticulaire de 0,36 à 8,20 Å ⁰
$(Mg-Fe) (Cr-Al)_2O_4$	Chromopicotite Constante réticulaire 8,33 Å ⁰

Le tableau ci-après indique les constantes réticulaires des minerais analysés :

Tableau 2 - Constantes réticulaires

<u>Chromites turques</u>		<u>Chromites albanaises</u>	
8,306	8,300	8,302	8,304
8,300	8,306	8,302	8,304
8,304	8,303	8,304	8,301

Le nombre des types pris en examen n'est pas tel que l'on puisse arriver à des déductions définitives, mais il est par contre possible de supposer que tant les chromites turques que les chromites albanaises ont une composition semblable à celle de la chromopicotite, les constantes réticulaires étant comprises entre les valeurs de 8,30 et 8,32 Å.

c) Propriétés chimiques

Les trois paramètres auxquels nous nous référons généralement au moment de juger une chromite sont la teneur en Cr₂O₃ du minerai, le rapport Cr/Fe et la perte à la calcination.

A notre avis, ces éléments donnent la possibilité de formuler un jugement préliminaire qui permet d'établir les grands traits du processus d'élaboration.

Naturellement, ces paramètres de nature chimique ne peuvent pas se détacher des paramètres de nature physique tels que par exemple la distribution granulométrique, la résistance mécanique et la friabilité du minerai.

Le tableau suivant indique les propriétés chimiques de certains types de chromite qui, à notre avis, sont utiles pour leur standardisation :

Tableau 3 - Composition type en % et origine de certains minerais

Provenance	Cr2O3	FeO	P.C.	Cr/Fe	MgO
U.R.S.S.	54	12	2,8	4,0	16
Albanie	44	13	1,5	3,0	21
Afrique du Sud	41	25	-(1)	1,4	10
Rhodésie	50	16	-(1)	2,7	14
Turquie (2)	48	13	2,0	3,2	17
"	34	11	6,0	2,6	24
Inde	44	15	-(2)	2,6	17

(1) on a la tendance à augmenter le poids à la calcination en raison de l'oxydation de FeO

(2) on n'a indiqué que deux types, négligeant les innombrables intermédiaires.

Les caractéristiques de composition et de structure aussi bien que les propriétés chimiques des gammes diverses de minerais, prises rapidement en considération, revêtent une grande importance pour la définition de leur comportement au four électrique, bien qu'il y en ait d'autres qui soient également essentielles parmi lesquelles il faudrait bien signaler comme exemple l'influence de la dimension des cristaux.

Il n'est pas toujours possible d'obtenir, par un seul processus, du FeCr à taux de carbone relativement bas (4-6 %) en raison du laitier à bas point de fusion ou de la vitesse de réduction excessive des microspinelles.

Même si en tant que producteurs de ferro-chrome, nous avons essayé et essayons tous les jours de corréliser tant les caractéristiques des minerais, les paramètres électriques et de marche de nos fours, que les propriétés chimiques et physiques des réducteurs employés, il nous a été impossible (même pour les analyses types de minerais) de recueillir toutes nos expériences dans une seule relation ou bien dans un petit nombre de relations qui puissent devenir un outil de conduite des installations.

Nous ne pouvons donc que présenter les expériences faites sur nos fours en employant les divers types de minerais qui constituent un apport efficace au sujet de cette relation.

Les travaux expérimentaux que nous allons citer ont été conduits par nous sur des fours de 0,5 (1) - 2,5 et 7 MW.

four expérimental à employer dans les laboratoires de recherches.

3. Paramètre de marche et type de laitier

Le procédé au four électrique pour la production de ferro-chrome dont les paramètres électriques, physiques et chimiques caractérisent la marche peut être développé de plusieurs façons qui représentent toujours, en tous cas, un compromis entre les exigences "théoriques" de fonctionnement (c'est-à-dire les exigences optimales qu'on peut obtenir sur la base des caractéristiques du minerai et des réducteurs) et celles du four dont on dispose.

Pour mieux expliquer ce concept de compromis, le laitier est pris comme exemple : le type de laitier que nous avons utilisé (constituant le résultat de plusieurs tentatives) peut être considéré comme le mieux approprié lorsqu'on atteint un indice de basicité neutre :

$$\frac{\frac{\text{MgO}}{\text{PM}} + \frac{\text{CaO}}{\text{PM}}}{\frac{\text{SiO}_2}{\text{PM}}} = 1,6$$

avec une variation en alumine de 10 à 12 % molaire.

En travaillant dans ces conditions, il en résulte qu'une haute teneur en MgO dans les chromites et, par conséquent, de faibles teneurs en SiO₂ et Al₂O₃, nécessitent d'ajouter des quantités notables d'additions entraînant des consommations spécifiques d'énergie élevées.

Les consommations spécifiques d'énergie n'augmentent pas seulement à cause de la grande quantité de laitier en question, mais aussi par suite des faibles solubilité et réductibilité des spinelles de magnésie.

C'est pour cette raison que nous considérons toujours important (ce qui a été mis en évidence au tableau 3) la teneur en MgO dans les chromites.

Même en admettant que le type de laitier choisi conduit à un rapport en poids laitier/ferro-alliage très élevé (c'est-à-dire de 1,5 à 1,8), particulièrement lorsque la teneur en Cr₂O₃ dans les chromites est faible, cette combinaison nous a permis d'obtenir une bonne séparation du laitier de l'alliage. En effet, le rendement en chrome atteint des valeurs réelles de 0,94 et le laitier ne contenant qu'un petit nombre de composés de chrome (3 % au maximum) tous insolubles, peut être utilisé comme matière inerte.

Les travaux expérimentaux qui font l'objet du point 5 ont tous été conduits sur un certain nombre de fours utilisés dans les conditions suivantes :

Tableau 4 - Types de fours et paramètres de marche

Four type	Electrodes Ø (mm)	Puissance de marche (KW)	Tension adoptée (V)	Courant électrode (A)
triphasé	130	400	130	2.000
monophasé	720	2500	120	25.000
triphasé	350	2500	110	14.000
triphasé	1020	7000	115	38.000

Avant de passer au point suivant, il paraît intéressant, sur la base de ce qui précède, d'indiquer les principales caractéristiques des chromites influençant le procédé, auxquelles on se réfère pour établir les paramètres de marche :

- distribution cristalline
- teneur en Cr₂O₃
- teneur en MgO
- rapport Cr/Fe
- perte à la calcination
- pourcentage de fines au-dessous d'un pouce.

4. Types de réducteurs et leurs caractéristiques

Dans le procédé au four électrique pour la production de ferro-chrome carburé, on utilise généralement du coke métallurgique de différentes granulométries ayant une teneur en cendres élevée.

L'influence du réducteur sur le procédé est de nature chimique et électrique et nous sommes tentés de l'associer aux dimensions des grains plutôt qu'à la nature du charbon.

Nous nous référons à l'utilisation pratique de charbons normaux en excluant donc ceux qui sont employés dans les essais expérimentaux tels que graphite, coke de pétrole, anthracite de petit calibre, charbon végétal, etc.

Le tableau ci-après donne une analyse type du coke utilisé comme réducteur de la chromite qui peut être utilisé en différentes granulométries :

Tableau 5 - Analyse type du coke métallurgique en %

- cendre	11,5	
- S.V.	1,7	
- humidité	10,5	
- S	1,0	
- résistivité	7000	mm ² /m
- réactivité Rieffel	15	

Il faut noter que généralement les caractéristiques électriques sont mesurées à 25° C. tandis que les températures dans le four électrique sont variables (6).

Le tableau suivant montre les valeurs de résistivité électrique aux différentes températures d'un coke, en morceaux de 10-40 mm, que nous avons utilisé.

Tableau 6 - Résistivité électrique du coke aux différentes températures

<u>température</u>	<u>résistivité Ωmm²/m (°)</u>
25° C	7000
100° C	6000
300° C	4000
500° C	3000
700° C	2500
1400° C	1500 (°°)
(°) valeur à titre indicatif	
(°°) valeur applicable seulement dans un sens comparatif	

Les coques de lignite qui ont été utilisés dans des travaux expérimentaux spéciaux ne se sont pas montrés favorables en raison de la fragilité des grains et des pertes considérables qui causaient des rendements très bas.

Afin de minimiser la vitesse de réaction, qui ne permettait pas l'affinage de l'alliage, on a utilisé, à titre expérimental, un graphite en morceaux relativement gros de 40-60 mm, qui donnait des résultats positifs du point de vue chimique mais qui montrait une marche irrégulière par suite du réglage difficile des paramètres électriques.

5. Principes expérimentaux d'utilisation de quelques types de chromite

Comme on l'a déjà dit, les nombreux essais que nous avons effectués nous ont permis d'établir des principes pour adapter les différents paramètres de marche aux matières premières utilisées.

Ces principes représentent un compromis entre les exigences théoriques et celles technico-économiques qui coïncident très rarement.

1er cas

- Spinelles microcristallines en gangue à base de serpentine friable
- Cr₂O₃ inférieur à 35 %
- MgO supérieur à 23 %
- Rapport Cr/Fe 2,5/2,7
- Perte à la calcination 6 %
- Fines au-dessous du pouce 4 %.

Ce type de chromite nécessitait une addition considérable de quartz de façon à atteindre un rapport SiO₂/MgO de 1/1 en poids.

On utilisait un coke en morceaux de 20-40 mm à faible réactivité dans le but de réduire la vitesse de réaction.

Les tensions étaient relativement élevées. Pour minimiser la tendance à la fusion en liquide surchauffé et non homogène dans les différentes zones de la charge, en raison du type de la gangue du minerai, on réalisait des coulées avec une fréquence supérieure à la normale entraînant donc des prélèvements fréquents de cette charge.

La qualité de l'alliage était insuffisante et présentait une teneur en carbone au-delà de 7 % et une teneur en Si supérieure à 3 %.

On rencontrait des difficultés en ce qui concerne un meilleur affinage de l'alliage par suite de la réduction à basse température.

Une augmentation de la teneur en Al₂O₃ dans le laitier n'améliorait pas les résultats à cause de la fusion continue des fines et de la gangue.

Des granulométries de carbone plus grossières entraînaient des difficultés dans la marche des fours au point de vue électrique et d'autres phénomènes négatifs pour les opérations de coulée.

Il faut remarquer que la nature du minerai, par suite du pourcentage de perte élevé à la calcination conduisait à une augmentation des fines en raison de la fragmentation naturelle à chaud et à des complications dans la zone de réaction pendant la marche.

Des tentatives d'affiner l'alliage avant la coulée en utilisant une tension plus élevée aux électrodes n'ont conduit à aucun résultat positif notable.

2ème cas

- Roches très compactes - spinelles macrocristallines Cr/Fe et Cr/Mg
- Cr₂O₃ inférieur à 45 %
- MgO inférieur à 20 %

- Rapport Cr/Fe supérieur à 3 %
- Perte à la calcination inférieure à 2 %
- Fines au-dessous du pouce 15 %.

Ces caractéristiques sont propres au minerai albanais. Sa réaction est lente mais il conduit à des procédés et des produits très diversifiés. Avec ce type de chromite, on utilisait du charbon en morceaux de 5-40 mm ayant une porosité, une réactivité et une résistivité relativement élevées (naturellement dans les limites dans lesquelles on peut concilier ces caractéristiques). Le minerai étant bon conducteur, des tensions élevées n'étaient pas utilisées au four (110 V dans nos fours de 7000 KW) et le laitier pouvait être tenu à 30-30-30 MgO-Al₂O₃-SiO₂ avec une faible séparation de l'alliage du métal et une consommation spécifique d'énergie relativement basse. Avec 40-20-40 la consommation spécifique d'énergie était plus élevée, tandis que la séparation du laitier de l'alliage était optimale et le rendement en chrome bon ($\mu = 0,91$).

Des températures voisines de 1700° C amenaient une tendance du trou de coulée à s'agrandir. Les qualités du produit étaient optimales, même s'il y avait des difficultés à réduire l'alliage en petits morceaux (une possibilité pouvait être la coulée sur chaîne), celui-ci étant très solide du point de vue mécanique (Si inférieur à 1 %).

Les difficultés principales provenaient de la géométrie peu convenable de nos fours qui avaient été conçus pour la production de carbure de calcium. En effet, la production de ferro-chrome 4/6 aurait demandé à notre avis des électrodes avec un diamètre inférieur, une densité de puissance plus élevée dans la zone de réaction ainsi qu'un réfractaire et un trou de coulée placés le plus loin possible de ladite zone.

3ème cas

- Macrospinelles de Cr₂O₃ FeO - Cr₂O₃ - MgO
- Roches compactes
- Cr₂O₃ supérieur à 40 %
- MgO inférieur à 12 %
- Rapport Cr/Fe inférieur à 1,5
- Perte à la calcination nulle
- Fines au-dessous du pouce 5 %
- Tendance à l'augmentation de poids par suite d'oxydation.

La spécification ci-dessus se réfère à une chromite de l'Afrique du Sud. Il s'agit d'un minerai très solide à haute vitesse de réaction, qui montre une tendance à se pré-réduire en charge pour arriver à la zone de réaction dans un état spongieux avec tendance à la fusion.

Le laitier utilisé présentait des caractéristiques particulières en raison de la faible teneur en MgO dans la roche; bien que 20 % de fines de chromite à haute teneur en MgO aient été ajoutées et 120 kgs de quartz par rapport à 1000 kgs de minerai employés, le rapport laitier/alliage n'était pas supérieur à 1,2. En outre, l'indice de basicité du laitier ne dépassait pas 1,4-1,5. La charge était très conductible et le laitier se présentait peu émulsionné et faiblement fluide, bien qu'un coke en morceaux de 5-20 mm ait été utilisé de façon à augmenter la résistivité électrique totale, même par addition de copeaux de bois.

En raison de la haute vitesse de réaction, il paraît difficile d'affiner l'alliage contenant des carbures à haute teneur en carbone, la température du bain étant relativement basse.

Une analyse type du ferro-chrome obtenu par l'emploi de chromites d'Afrique du Sud présentait des pourcentages en carbone et silicium très élevés, de l'ordre de 8 % et 4 % respectivement. Nous n'avons jamais réussi à obtenir des qualités de charge chrome plus satisfaisantes par un processus unique. La consommation spécifique d'énergie par rapport au chrome était, toutefois, très basse, c'est-à-dire inférieure à 3800 Kwh/t avec une teneur en Cr de 50-52.

4ème cas

- chromite indienne briquetée contenant Fe_2O_3 , microspinelles Cr-Fe et Cr-Mg et gangue de types divers.
- Cr_2O_3 supérieur à 45 %
- MgO inférieur à 14 %
- Rapport Cr/Fe inférieur à 2,5
- Perte à la calcination inférieure à 3 %
- Fines au-dessous du ponce 10 %.

Le minerai briqueté est caractérisé par une forte zone de réaction se préréduisant beaucoup au sommet de la charge, ce qui rendait le produit semi-fondu très réactif. Le point de fusion relativement bas et la difficulté à homogénéiser le bain amenaient à un ferro-chrome très carburé avec teneurs en silicium variables. Les coulées étaient alternativement abondantes et faibles.

Avec ce type de minerai briqueté (dimensions des briquettes de l'ordre du dm^3) on a conduit un essai caractérisé par un laitier de 40-35-25 (SiO_2 - MgO - Al_2O_3) et un coke métallurgique en morceaux de 40-70 mm. La tension était inférieure à la normale.

L'utilisation de graphite artificiel, afin de réduire la vitesse de réaction (grains 30-40 mm) présentait des difficultés de fonctionnement toutes spéciales tant en ce qui concerne le réglage du rapport tension-courant (inférieur à 2.10^{-3}) que la phase de coulée en raison de la faible puissance de marche.

Les consommations spécifiques avec ce type de minerai pouvaient être considérées comme satisfaisantes. Le rendement en chrome était de l'ordre de 0,88, même si la séparation du laitier de l'alliage n'était pas toujours bonne.

5ème cas

- Chromite turque de différentes natures
- Cr_2O_3 inférieur à 35 %
- MgO inférieur à 24 %
- Cr/Fe inférieur à 2,5 %
- Perte à la calcination supérieure à 6 %
- Toutes les fines au-dessous du ponce.

L'alliage obtenu avec ce type de minerai a été toujours insatisfaisant, caractérisé par une charge chrome très variable aux limites de l'acceptable.

Du coke faiblement réactif en morceaux de 20-40 mm était utilisé comme réducteur.

La tension, après coulée, doit être amenée à des valeurs supérieures à la normale, tandis qu'une réduction de quelques volts doit être prévue avant la coulée même.

Avec ce minerai et ce type d'essai (laitier 40-40-20), on a obtenu des consommations spécifiques d'énergie et de matières premières très basses (4000 Kwh/T) avec une teneur en chrome dans l'alliage de 50-60 %. Le rendement en chrome dépassait 0,92 et la teneur en Cr₂O₃ dans le laitier était inférieure à 3 %.

6. Conclusions

Le traitement du minerai de chrome pour la production de ferro-chrome est certainement l'un des plus compliqués parmi ceux du four électrique, surtout lorsqu'on veut obtenir des ferro-alliages de bonne qualité (bas carbone et bas silicium).

Au cours des récentes années, ces difficultés se sont aggravées de plus en plus. En effet, bien que les techniques modernes de production des aciers, même des plus sophistiqués, permettent d'utiliser des ferro-chromes à faible teneur en chrome et à haute teneur en carbone, il est nécessaire d'envisager la construction de nouveaux fours avec une puissance de plus en plus élevée et d'utiliser des minerais de plus en plus pauvres afin de satisfaire les besoins accrus qui se sont manifestés en ces ferro-alliages conduisant à des coûts de production plus compétitifs.

C'est de l'emploi de ces minerais pauvres (en morceaux, fines, tels quels et agglomérés) que viennent les plus grandes difficultés mentionnées ici et donc la nécessité actuelle d'exécuter des travaux expérimentaux intensifs, de façon à rendre les nouvelles techniques de production au four électrique compétitives.

DISCUSSION

Dr. D. Slatter*

I would like to congratulate Dr. Fornaini on his paper which I found very interesting, particularly because we have made this the subject of a study in Zimbabwe - that is the question of the properties of chrome ores which are required for the production of high carbon ferro-chromium and, in particular, high carbon ferro-chromium containing less than 6% carbon. I must reiterate what Dr. Fornaini has said, that it is an extremely complex question as to which are the important properties in chromium ores which determine furnace performance and which decide the composition of your high carbon ferro-chromium. I have not studied his paper in detail yet and I hope I don't repeat anything he said here, but when we consider chromium ores we cannot consider their physical and chemical properties in isolation. They have to be taken together. The physical properties and the chemical properties control the reaction and performance of the ore in the furnace. In particular they determine whether that ore is going to descend a long way in the furnace and, therefore, get to the stage where the carbon content of the alloy is lowered. Therefore, the physical properties you have to look at are not just the question of the fines production from the ore.

Friability is, of course, one of the most important properties. That concerns the break up of the ore in the furnace. The porosity of the ore also has to be taken into consideration. The possibility of the ore decrepitating that is explosively breaking apart when it comes into a high temperature zone, also has to be taken into account because all of these factors will determine whether the ore is going to descend far in the furnace or whether it is going to break apart and be released to the slag resulting in high chromium losses and no carbon refining action.

Turning to the chemical properties these are just as important as Dr. Fornaini has indicated, not only in terms of total chromium content and chromium to iron ratio, but in terms of the actual composition of the spinel which governs how it is going to reduce and how rapidly it is going to reduce. There is a ratio which we have been working on at our Institute which we have called the refractory to non-refractory ratio of the ore. It is a fairly simple ratio. It is the ratio of the oxides of chromium plus magnesium plus aluminium to iron plus silica, but we have found that this ratio can be correlated exactly with the chemical reducibility of the ore and we intend to produce a publication on this fairly shortly.

Thank you Mr. Chairman. This was just a short comment that I would like to add to Dr. Fornaini's paper and I would like to congratulate him again on his paper.

* University of Zimbabwe, Zimbabwe