INTERCORR2008_054

Copyright 2008, ABRACO
Trabalho apresentado durante o INTERCORR 2008, em Recife/PE, no mês de maio de 2008.
As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Efeito do perfil de rugosidade de substratos de aço-carbono na medição de espessura de revestimentos anticorrosivos por pintura

Alberto Pires Ordine[1], Fernando de Loureiro Fragata [1], Mauro Zanini Sebrão[2]

Abstract

The surface roughness of steel substrates cleaned by abrasive blasting is an important factor to consider in the measurement of dry film thickness of coatings applied on metallic surfaces. That is why international standards such as ISO 19840 and SSPC-PA 2 point out correction values to be discounted from thickness measurements, in order to guarantee that one is, in fact, obtaining the typical thickness above the peaks of the surface profile. So, considering the relevance of dry film thickness measurement to evaluate the homogeneity of coatings and to be a means of checking the fulfillment of technical requirements of coatings, in this work, an experimental approach was developed to investigate the subject. Carbon steel surface profiles ranging from 4 μm to 115 μm were studied. Different methods were applied to evaluate the effect of the surface profile on thickness measurements. Also, the dry film thickness measurements of coatings were performed with different equipments and the results compared with the determination of the layers thickness by the cross section images microscopy analysis of the specimens. It was possible to obtain a graph which relates the surface profile with the correction value. This graph showed to be a satisfactory way to determine the correction value and may be used when it is not possible to do so experimentally.

Key words: roughness, coating**,** thickness.

Resumo

O valor da rugosidade dos substratos de aço-carbono, que são magnéticos, é um fator importante a se considerar na medição de espessura de revestimentos anticorrosivos não magnéticos. Normas internacionais como ISO 19840 e SSPC-PA 2 destacam que ao se medir a espessura, com equipamentos que operam por indução magnética, deve-se descontar valores de correção devido ao efeito do perfil de rugosidade do substrato para se garantir que a espessura da camada corresponda aquela acima dos picos de rugosidade. Neste trabalho investigaram-se substratos de aço-carbono, com perfis de rugosidade entre 4 μm a 115 μm. A espessura de camadas de tintas aplicadas sobre os substratos foi determinada com diferentes equipamentos, e por meio da técnica de microscopia ótica da seção transversal dos corpos-de-prova. Quanto ao efeito do perfil de rugosidade, as medições sobre os substratos foram mais uniformes quando o valor da leitura, obtida diretamente do substrato, foi determinado com o auxílio de um padrão de espessura, conforme recomenda a norma ISO 19840. Com os dados experimentais, construiu-se um gráfico que relaciona a rugosidade do substrato com o valor a ser subtraído da leitura do equipamento. O gráfico pode ser utilizado nos casos em que não se tenha acesso ao substrato, mas se conheça o perfil de rugosidade do mesmo.

Palavras-chave: rugosidade, revestimento**,** espessura.

[1] Engenheiro químico, Pesquisador – CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, ordine@cepel.br, fragata@cepel.br.
[2] Engenheiro metalúrgico, Pesquisador – CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, zanini@cepel.br.

1 INTRODUÇÃO

Independente do mecanismo de proteção anticorrosiva de um esquema de pintura, a espessura do revestimento é uma propriedade fundamental para que o mesmo proporcione aos substratos, em geral, o desempenho esperado. Por esta razão, a espessura é um requisito importante e constante das especificações técnicas das tintas e dos esquemas de pintura. Neste sentido, para que o objetivo seja alcançado, a espessura tem que atender aos limites máximo e mínimo estabelecidos nas especificações. Como é conhecido, uma espessura abaixo do valor mínimo recomendado poderá reduzir substancialmente a durabilidade do revestimento, especialmente no que diz respeito à proteção anticorrosiva. Por outro lado, uma espessura muito acima do valor máximo poderá ocasionar problemas no revestimento, como por exemplo retenção de solventes, enrugamento, fendimento, retardamento da secagem e cura e formação de bolhas. Logo, a medição correta da espessura é importante não só para a durabilidade do revestimento mas também para evitar atritos entre as empresas envolvidas na aplicação de revestimentos anticorrosivos por pintura. Também nos trabalhos de pesquisa e desenvolvimento é uma atividade importante para assegurar a uniformidade dos revestimentos, em relação à metodologia adotada e, com isso, evitar erros de avaliação no desempenho dos mesmos.

A medição de espessura de revestimentos orgânicos por pintura (não-magnéticos) sobre substratos de aço-carbono (magnéticos) requer alguns cuidados importantes, principalmente quando se utilizam equipamentos eletrônicos, cujo princípio básico é o de indução magnética, e a limpeza da superfície é feita por meio de jateamento abrasivo. Neste caso, o processo de jateamento altera as propriedades magnéticas superficiais do aço-carbono. A conseqüência disto é que, quando os referidos equipamentos são ajustados, com o auxílio de um padrão de espessura, em uma chapa de aço-carbono polida, e posteriormente são colocados em contato com a superfície jateada com abrasivo, mesmo esta estando sem revestimento algum, os medidores de espessura acusam um valor positivo de leitura, no mostrador, o qual é função da rugosidade superficial. Vale ressaltar que este valor não corresponde à rugosidade superficial do substrato e sim a uma variação devida à alteração das propriedades magnéticas superficiais do mesmo. Este valor lido no equipamento será denominado ao longo deste trabalho como **LS** (leitura do substrato). Ao se executar a medição de um revestimento por pintura, o valor da espessura, acima dos picos de rugosidade, será obtida deduzindo-se do valor lido no equipamento, o valor da **LS**, no caso do equipamento ter sido ajustado sobre uma superfície de aço polida. Esta é uma das recomendações citadas nas normas ISO 19840 [1] e SSPC-PA2 [2]. Tal procedimento é pouco utilizado no Brasil o que pode, portanto, gerar erros nos processos de medição. A própria norma brasileira atual, NBR 10443 [3], não menciona este aspecto, embora se saiba que no processo de revisão em andamento este está sendo abordado.

Face à importância do tema em questão, o CEPEL realizou um estudo no qual se avaliou a influência da altura do perfil de rugosidade no valor da **LS**, bem como na medição de camadas de tintas, utilizando-se três equipamentos eletrônicos, de modelos e fabricantes diferentes, porém com mesmo princípio básico de medição (indução magnética).

Na primeira etapa do trabalho, utilizando-se substratos de aço-carbono com diferentes perfis de rugosidade, sendo os mesmos determinados por meio de rugosímetro digital, avaliou-se a influência da altura do perfil de rugosidade no valor da **LS**, por meio de dois métodos distintos: realizando-se a medida diretamente sobre o substrato (medição direta) e com o emprego de um padrão de espessura, como descrito no anexo D da norma ISO 19840 [1]

(medição indireta). A partir destas informações pode-se construir um gráfico relacionando-se a rugosidade do substrato com o fator **LS**.

Na segunda etapa do trabalho, aplicaram-se camadas de tintas sobre as chapas de aço-carbono com diferentes perfis de rugosidade, e a espessura foi determinada por meio de três equipamentos, como mencionado anteriormente. Além disso, para fins comparativos, a espessura das camadas de tinta foi determinada por meio da técnica de microscopia ótica. O valor da **LS** foi determinado pelo método direto e também pelo gráfico obtido na etapa anterior. Os resultados obtidos mostram que o método gráfico, para obtenção da **LS,** é uma boa alternativa, principalmente nos casos em que se conhece a rugosidade do substrato, mas não se tem acesso ao mesmo.

2 METODOLOGIA

Antes da descrição do desenvolvimento experimental deste trabalho, serão destacados os principais aspectos das normas ISO 19840 [1] e SSPC-PA 2 [2]. O objetivo destas é estabelecer a metodologia de medição de espessura de revestimentos utilizando equipamentos que se baseiam em diferença de propriedades magnéticas da película, em relação ao substrato, ou mesmo na medição quando o substrato não é magnético, como contempla a norma ISO 19840 [1].

2.1 Norma ISO 19840 [1]

Nesta norma, vale destacar os seguintes aspectos:

- Está baseada em instrumentos com magnetos permanentes ou do tipo de indução magnética, entretanto, considera também aqueles baseados no princípio de correntes parasitas (para medições de espessura de revestimentos aplicados em substratos não-magnéticos).

- A norma se aplica para espessuras de revestimento maiores ou iguais a 40 μm.

- As medições de espessura devem ser realizadas em áreas de inspeção em quantidade definida de acordo com o tamanho da área (Tabela I). Os locais de medição dentro da área de inspeção são escolhidos aleatoriamente.

Tabela I – Plano de inspeção de acordo com a norma ISO 19840 [1].

Área de inspeção (m^2)	Número mínimo de medidas	Nº máximo de medidas repetidas
Até 1	5	1
Entre 1 e 3	10	2
Entre 3 e 10	15	3
Entre 10 e 30	20	4
Entre 30 e 100	30	6
Acima de 100 [(a)]	+10 para cada 100 m^2 adicionais	20% do número mínimo de medidas

[(a)] Áreas acima de 1000m^2 são subdivididas em áreas de inspeção menores.

• As medições individuais podem ser repetidas em quantidade definida na Tabela I, quando forem menores que 80% do valor mínimo de espessura especificado ou maiores que o valor máximo de espessura especificado. Nestes casos, as novas medidas devem ser realizadas a uma distância máxima de 10 mm do ponto da primeira medida. As medições repetidas substituem as anteriores, atendendo ou não o critério de aceitação.

• Em cada ponto de inspeção, pode-se adotar um procedimento de leituras múltiplas compreendidas dentro de uma área circular de 30 mm de diâmetro. A média destas leituras múltiplas é adotada como um valor individual. O número de leituras múltiplas pode ser estabelecido no contrato, definido entre as partes, ou assumido como igual a 5.

• Antes de realizar a medição, o instrumento deve ser ajustado a zero com o uso de placa de aço polida, sem curvatura, visualmente limpa, de no mínimo 3 mm de espessura e com dimensões mínimas de 25 mm x 25 mm. Além disso, faz-se uma verificação utilizando padrões de espessura, sobre a superfície do aço polido, com valores acima e abaixo do valor de espessura a ser medido (especificado). Ao invés dos padrões de espessura, pode-se usar placas de teste pré-revestidas e certificadas, com dimensões mínimas de 25 mm x 25 mm e 3 mm de espessura.

• O equipamento deve ser operado de acordo com instruções do fabricante. Ao se completar uma série de medições, o ajuste do equipamento deve ser verificado novamente. Caso não esteja de acordo com o ajuste inicial, os resultados das medições devem ser rejeitados e um novo procedimento de medição, reiniciado.

• O valor efetivo de espessura do revestimento é determinado após a subtração do valor lido por um valor de correção, dado pelo valor da **LS** de rugosidade do substrato. Caso o perfil atenda a norma ISO 8503 [4], o valor de correção é determinado de acordo com a Tabela II, para superfícies jateadas com granalha de aço angular e cujo perfil de rugosidade foi determinado, utilizando-se comparadores visuais de rugosidade. Se o perfil não é conhecido e nem pode ser determinado, recomenda-se utilizar 25 μm como valor de correção. Se o perfil não está de acordo com a norma ISO 8503 [4] ou o contrato exige que se determine o valor da **LS**, o valor de correção específico pode ser obtido da seguinte maneira (descrito no anexo D da norma):

∗ Ajustar o instrumento de acordo com recomendações do fabricante, zerando-o numa superfície de aço polida de dimensões mínimas de 25 mm x 25 mm e 3 mm de espessura.

∗ Selecionar um padrão de espessura entre 125 μm e 150 μm.

∗ Medir a espessura do padrão sobre a superfície jateada em 10 locais diferentes, e obter o valor médio.

∗ Subtrair a média do valor do padrão, obtendo-se o valor de correção.

Tabela II – Valores de correção na medição de espessura segundo a norma ISO 8503 [4], sendo a rugosidade determinada por comparadores visuais e a faixa apresentada correspondente a superfícies jateadas com granalha de aço angular.

Perfil de rugosidade	Faixa de rugosidade (μm)	Valor de correção (μm)
baixo	25 a 60 (exclusive)	10
médio	60 a 100 (exclusive)	25
alto	100 a 150 (exclusive)	40

• O resultado de espessura do revestimento é expresso como uma média das medições realizadas na área de inspeção. Esta média deve ser maior ou igual ao valor mínimo de espessura especificado. Aceita-se que medições de espessura individuais sejam de, no mínimo, 80% do valor especificado, desde que a quantidade destas medições não ultrapasse 20% do número total de medições individuais. Todas as medições individuais devem ser menores ou iguais que o valor máximo de espessura especificado. Se tais critérios não forem atendidos, a área inspecionada deve ser rejeitada.

2.2 Norma SSPC-PA 2 [2]

Os aspectos a serem destacados nesta norma são os seguintes:

• Abrange os equipamentos denominados *pull-off* (tipo 1) e eletrônicos (tipo 2), sendo que em ambos se empregam propriedades magnéticas para a medição de espessura. Não trata, contudo, dos equipamentos que usam o princípio de medição baseado em correntes parasitas.

• A medição é afetada pela rugosidade, formato, espessura e composição do substrato, por isso a norma recomenda que se tenha acesso ao substrato com as mesmas características daquele revestido e que o mesmo tenha área suficiente para se evitar efeitos de borda na medição. Recomenda-se que as medições no substrato sejam realizadas antes da pintura, ou pelo emprego de máscaras durante a pintura que permitam o acesso posterior ao substrato em áreas representativas do mesmo. Se o revestimento já tiver sido aplicado, recomenda-se a remoção deste em certas áreas para se ter acesso ao substrato, reparando-se as áreas danificadas posteriormente.

• A calibração do instrumento é realizada pelo fabricante do mesmo. Uma verificação da exatidão do instrumento deve ser feita pelo usuário, utilizando padrões de espessura que cobrem a faixa de medição. O instrumento deve ser verificado no início e no final de uma série de medições. Caso a verificação final seja diferente da inicial, a exatidão dos resultados de toda série de medições é questionável.

• Cada ponto de medição realizada no substrato ou no revestimento deve ser uma média de no mínimo três leituras, compreendidas dentro de um círculo imaginário de diâmetro igual a 4 cm, o que a norma denomina como medição em ponto. Caso se observe alguma leitura muito mais alta ou muito mais baixa que não se repete, a mesma deve ser descartada para realizar a média e substituída por nova leitura.

• No revestimento, são realizadas 5 medições em ponto diferentes, distribuídas aleatoriamente dentro de uma área de 10 m^2. Se as partes interessadas concordarem, podem ser realizadas mais do que 5 medições em ponto em uma determinada área. Para estruturas com até 30 m^2,

cada 10 m^2 é medido. Para estruturas com até 100 m^2, três áreas de 10 m^2 são escolhidas arbitrariamente para a medição. Para estruturas com mais de 100 m^2, nos primeiros 100 m^2, mede-se três áreas de 10 m^2, escolhidas arbitrariamente. E a cada 100 m^2 adicionais, escolhe-se aleatoriamente uma área de 10 m^2 para se medir.

• A média das medições em ponto não pode ser menor que o valor mínimo, nem maior que o valor máximo de espessura especificados, para cada 10 m^2 de área avaliada. Além disso, em cada ponto de medição, não se deve encontrar valor menor que 80% do valor mínimo, nem valor maior que 120 % do valor máximo. Caso contrário, a área deve ser marcada como não conforme e sujeita a uma análise mais detalhada, visando o reparo.

• Para medição de revestimentos aplicados sobre superfícies jateadas com abrasivo, o ideal é que se tenha parte da superfície não revestida, para se ajustar o equipamento. Se isto não for possível, pode-se ajustá-lo em superfície polida (do mesmo material do substrato revestido), seguindo as recomendações do fabricante. Entretanto, ao se realizar as medições de espessura, é necessário descontar de cada valor lido no equipamento um valor de correção devido ao valor da **LS** na medição de espessura. Este valor é função do perfil e está apresentado na Tabela II para os perfis alto, médio e baixo, de acordo com a norma ISO 8503 [4]. Ao se descontar o valor de correção, a leitura de espessura corresponde aquela medida acima dos picos do perfil de rugosidade do substrato.

2.3 Desenvolvimento Experimental

2.3.1 Equipamentos

Na condução do trabalho experimental foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Medidor de rugosidade do tipo agulha com mostrador digital, com características de operação conforme a descrição do método B, da norma ASTM D 4417 [5].
- Medidor de espessura digital para substratos ferrosos, sendo que a sonda de medição faz parte do corpo do equipamento. Este medidor será referenciado no texto como **EQ1**.
- Medidor de espessura digital para substratos ferrosos e não ferrosos, com sonda externa de medição, acoplada ao medidor, sendo esta para substratos ferrosos. Este medidor será referenciado no texto como **EQ2**.
- Medidor de espessura digital para substratos ferrosos e não ferrosos, sendo que a sonda de medição faz parte do corpo do equipamento. Este medidor detecta automaticamente o tipo de substrato (ferroso ou não ferroso) e não requer ajuste antes da medição, sendo referenciado no texto como **EQ3**.

2.3.2 Metodologia

O desenvolvimento experimental deste trabalho pode ser dividido, basicamente, em duas etapas. Na primeira, utilizou-se, como substrato, chapas de aço-carbono com área de 15 cm x 10 cm e com espessura de 4,8 mm. Tais chapas foram submetidas a vários processos de jateamento abrasivo, de modo a gerar diferentes perfis de rugosidade. Os processos empregados foram jateamento abrasivo com esfera de vidro, jateamento abrasivo com granalha de aço e hidrojateamento a alta pressão com abrasivo. Em função das condições operacionais dos equipamentos de tratamento de superfície empregados (pressão, granulometria do abrasivo, etc), foram obtidos perfis médios de rugosidade variando desde 4

μm até 115 μm, sendo realizadas de 35 a 40 medições em cada caso, exceto para o tratamento de hidrojateamento com abrasivo, em que foram realizadas 12 medições. As medições foram tratadas empregando-se ferramentas estatísticas, de modo a se construir um gráfico que compreende 85% das medidas individuais em torno das médias.

Após a medição da rugosidade, foi obtido o valor da **LS** utilizando dois equipamentos de medição de espessura diferentes, EQ1 e EQ2. Novamente, foram realizadas de 35 a 40 medições, em cada caso, exceto para o tratamento de hidrojateamento, em que foram realizadas 10 medições. Com cada equipamento, empregaram-se dois métodos para a determinação da **LS**, denominados como direto e indireto. No método direto, após ajuste do equipamento como recomenda o fabricante, e utilizando-se chapa de aço-carbono polido e padrão de espessura de 125 μm, as medições foram obtidas aplicando-se a sonda diretamente sobre o substrato. Já no método indireto, seguiu-se o procedimento do anexo D da norma ISO 19840 [1], descrito no item 2.1, utilizando-se um padrão de 125 μm.

Da mesma forma do que foi realizado para a rugosidade, os resultados das medições do valor da **LS** foram analisados estatisticamente e utilizados para a construção de um gráfico composto por 85% das medidas em torno das médias. Este gráfico e aquele da rugosidade foram dispostos em um único gráfico, definindo regiões em que os resultados dos perfis de rugosidade e dos efeitos dos perfis na medição de espessura estão compreendidos. Esta informação permitiu relacionar o valor da **LS** com a rugosidade do substrato, em cada caso.

Após a construção do gráfico, novos corpos-de-prova foram preparados, apresentando perfis de rugosidade variando desde 15 μm até 90 μm. Seus respectivos valores de **LS** foram determinados e comparados com aqueles obtidos pela leitura direta do gráfico.

A segunda etapa do trabalho consistiu na aplicação de uma demão de tinta de fundo epóxi de cor vermelha aos substratos de aço-carbono com diferentes perfis de rugosidade. As medições de espessura foram determinadas utilizando 3 equipamentos diferentes, EQ1, EQ2 e EQ3. O valor da **LS** foi descontado nestas medições, sendo que o valor de correção foi determinado pelas medidas diretas com os equipamentos mencionados e utilizando o método gráfico, podendo, assim, tais resultados serem comparados. Além disso, a espessura do revestimento por pintura, acima dos picos, também foi determinada através de microscopia ótica da seção transversal dos corpos-de-prova.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela III apresenta a denominação dos diferentes perfis de rugosidade investigados, sua faixa de valores e o tratamento de limpeza de superfície empregado para a obtenção de tais perfis. Tal denominação será utilizada na apresentação e discussão dos resultados.

Tabela III – Denominação dos diferentes perfis de rugosidade e suas características.

Denominação do perfil	Faixa de valores (μm)				Tratamento de superfície
	Mínimo	Máximo	Média	DP*	
A	1,0	10,0	4,4	1,7	Jateamento abrasivo com esfera de vidro
B	10,0	23,0	14,6	1,7	Jateamento abrasivo com granalha de aço angular
C	28,0	50,0	38,7	1,8	
D	55,0	79,0	62,8	6,6	
E	66,0	110,0	88,1	9,0	
F	71,0	130,0	113,6	25,6	Hidrojateamento (com abrasivo) a alta pressão

*Desvio Padrão

Como se pode observar pela Tabela III, a medida que o perfil de rugosidade aumenta, também aumenta a variação das medições em torno da média, o que está representado pelo desvio padrão da média, em cada caso. Dessa forma, o desvio padrão, coerentemente, aumenta com o aumento do perfil.

Conforme descrito no item 2.3.2, após a medição de rugosidade, o valor da **LS**, utilizando os equipamentos de medição de espessura, foi determinado para cada perfil considerado. A Tabela IV mostra tais resultados em função do equipamento e do método utilizado na medição, sendo a notação "direto", referente ao método direto e "indireto", referente ao método indireto, de acordo com as descrições dos métodos apresentadas anteriormente.

Tabela IV – Valor da LS (leitura do substrato) em função do tipo de equipamento e método de medição.

Perfil	EQ1- direto		EQ1- indireto		EQ2- direto		EQ2- indireto	
	Média (μm)	DP* (μm)	Média (μm)	DP* (μm)	Média (μm)	DP* (μm)	Média (μm)	DP* (μm)
A	4,2	0,9	2,3	0,4	2,7	0,2	1,8	0,2
B	16,4	0,8	15,9	2,0	9,8	0,9	15,7	1,5
C	23,3	1,9	23,2	2,0	16,4	0,6	20,9	2,0
D	38,4	1,6	37,7	2,3	22,3	1,4	37,1	2,5
E	35,9	1,0	40,1	2,8	25,7	5,2	38,8	1,2
F	35,5	13,6	(a)		(a)		(a)	

*Desvio Padrão; (a) medições não realizadas neste perfil

Pela Tabela IV, pode-se comparar o valor da **LS**, empregando-se diferentes equipamentos de medição de espessura e diferentes métodos de medição. Em todos os casos, observou-se que quando se emprega o método direto, há uma diferença significativa entre as médias das medições dos diferentes equipamentos. O mesmo não ocorreu quando se empregou o método indireto, conforme recomenda a norma ISO 19840 [1]. Ou seja, utilizando-se o método indireto, obtiveram-se valores da **LS** muito próximos, para qualquer dos equipamentos empregados. Estes resultados também indicam que a partir do perfil de rugosidade D, o valor da **LS** pouco se altera, mantendo-se na faixa de 35 a 40 μm, o que está de acordo com a norma ISO 19840 [1], que recomenda o valor de correção de 40 μm para perfis de rugosidade altos. Entretanto, comparando-se as Tabelas III e IV, como a Tabela II (referente à norma ISO 19840 [1]), vale ressaltar que a faixa de valores nominais de rugosidade da norma para perfis altos é diferente daquela observada no presente trabalho, visto que a norma baseia-se na medição de

rugosidade por comparadores visuais, que têm uma exatidão menor do que a medição realizada com rugosímetro digital, como foi o caso.

Visando investigar a dispersão das medidas individuais em torno da média, diagramas como aqueles apresentados nas Figuras 1, 2 e 3 foram obtidos para os diferentes perfis. Nestes casos, consideraram-se, respectivamente, os perfis C, D e E.

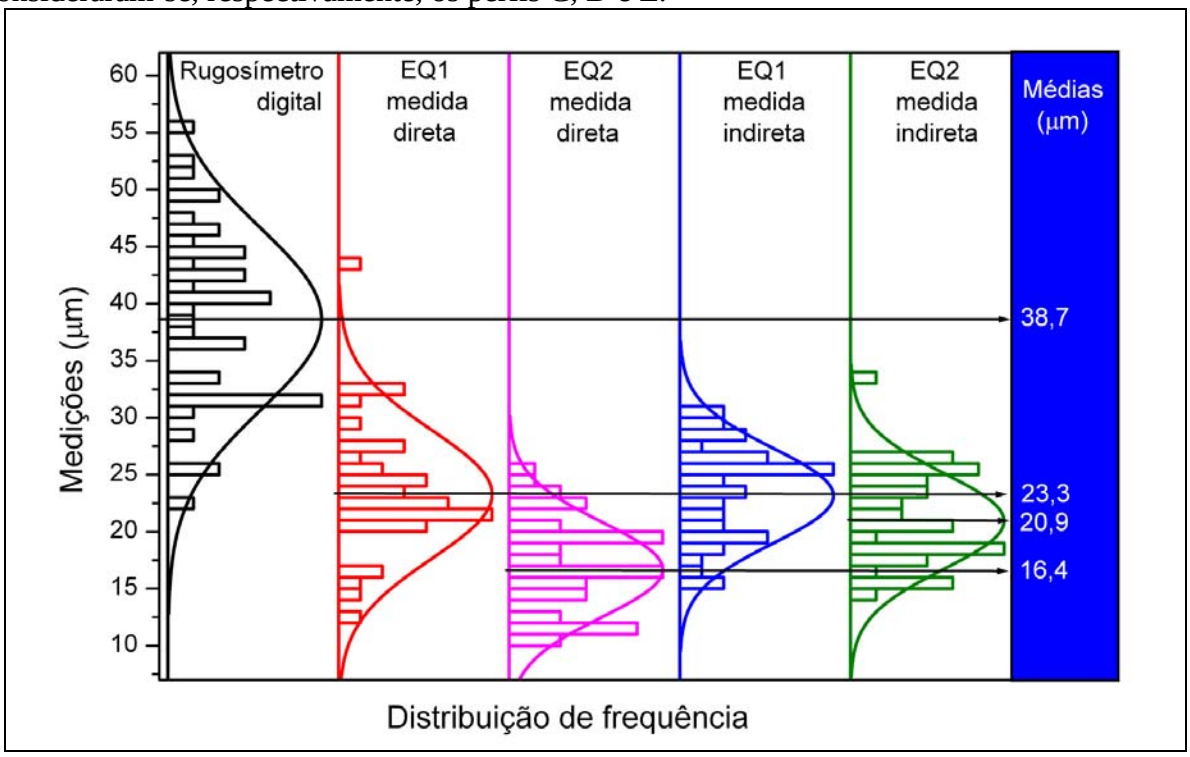

Figura 1 – Dispersão das medições em torno das médias do perfil de rugosidade C.

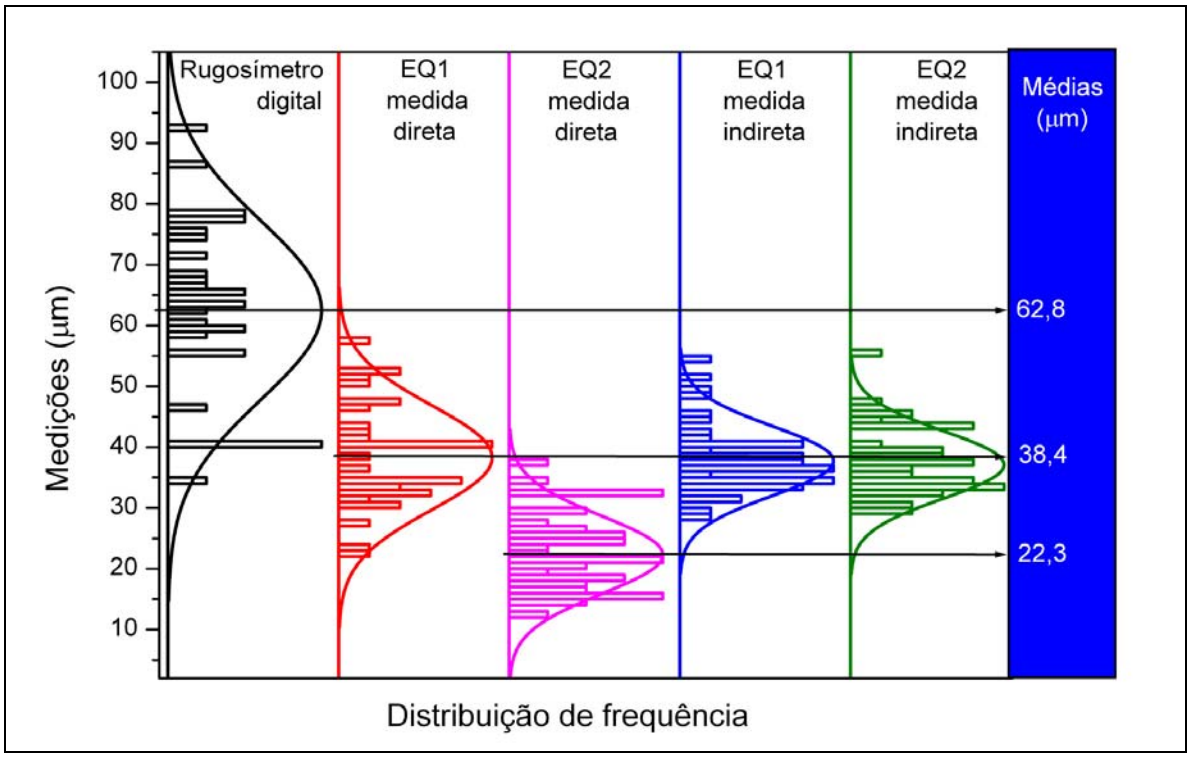

Figura 2 – Dispersão das medições em torno das médias do perfil de rugosidade D.

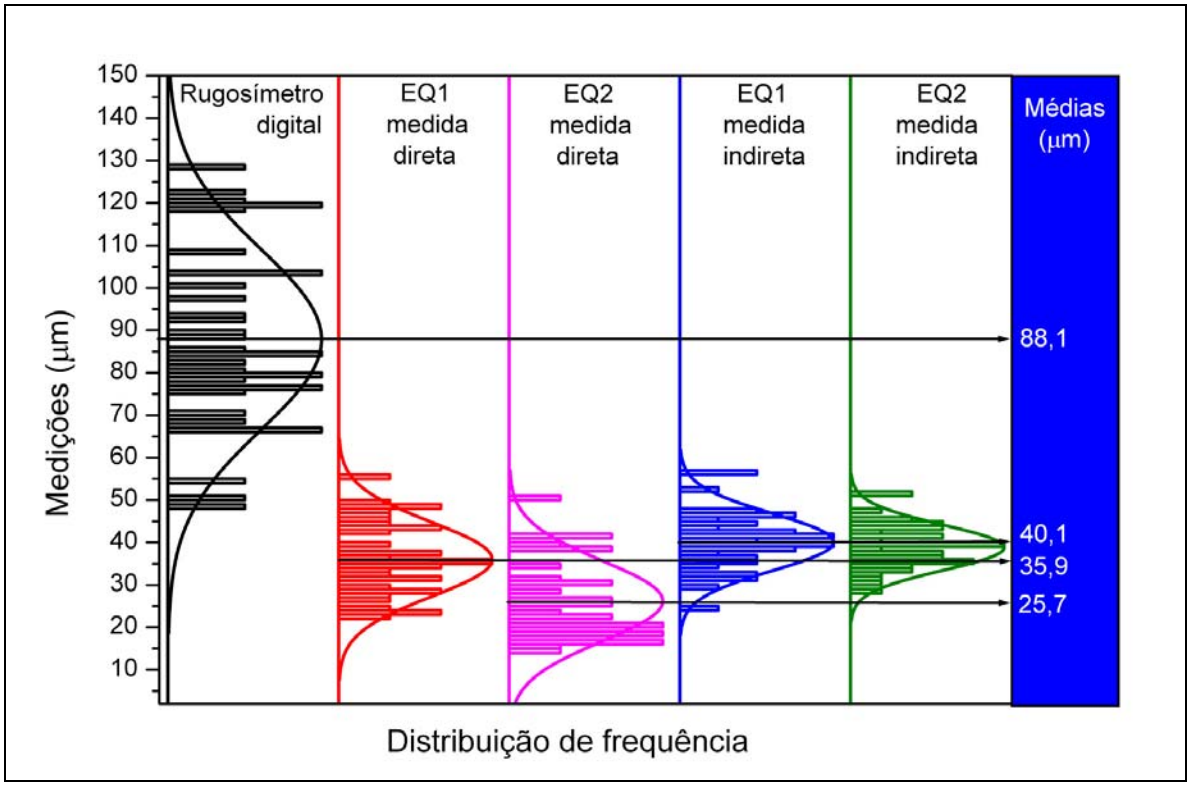

Figura 3 – Dispersão das medições em torno das médias do perfil de rugosidade E.

As Figuras 1, 2 e 3 apresentam os resultados na forma de distribuição de freqüências, além da curva de distribuição normal das medições, indicando, em cada caso, a média. Estas Figuras confirmam o resultado da Tabela IV em relação ao valor da **LS** como função dos equipamentos e métodos de medição. O efeito do tipo de equipamento não foi importante quando a medida foi indireta. E na medida direta, houve uma diferença mais significativa de acordo com o equipamento utilizado. A partir destes dados, selecionou-se aqueles representantes de 85% dos valores em torno da média e construiu-se o diagrama mostrado na Figura 4, incluindo-se a rugosidade e o valor da **LS**, utilizando-se o método indireto e o medidor EQ1 (com exceção do perfil F, em que foi utilizado o método direto e o medidor EQ1). Na Figura 4, as áreas hachuradas foram definidas pelos valores extremos dos 85% dos dados considerados em torno de cada ponto médio. Esse valor de 85% foi escolhido a fim de se desprezar as medidas de valores muito extremos.

Analisando-se a Figura 4, observa-se um comportamento bem definido da relação do valor da **LS** com a rugosidade do substrato. No geral, poderia-se definir 3 regiões da referida Figura. Uma faixa de baixa rugosidade (0 a 20 µm), em que os valores de rugosidade chegam a se confundir com os valores da **LS**. Nesta faixa, pode-se adotar um valor de correção de 10 µm, como recomenda a norma ISO 19840 [1], que é um procedimento bastante razoável. A segunda região vai de 20 µm a 60 µm de rugosidade, em que o valor da **LS** variou de 15 µm a 40 µm, aproximadamente. Esta faixa pode ser tratada como aquela de perfil médio [1]. E finalmente, a terceira região, corresponde àquela em que o aumento da rugosidade parece não influenciar mais o valor da **LS**, cujo comportamento também está definido na norma ISO 19840 [1] para perfis “altos”, observados nestes resultados como aqueles acima de 60 µm. Vale ressaltar que as diferenças de valores de rugosidade observados em relação aqueles da norma

ISO 19840 [1] devem-se ao tipo de equipamento utilizado na medição, como discutido anteriormente.

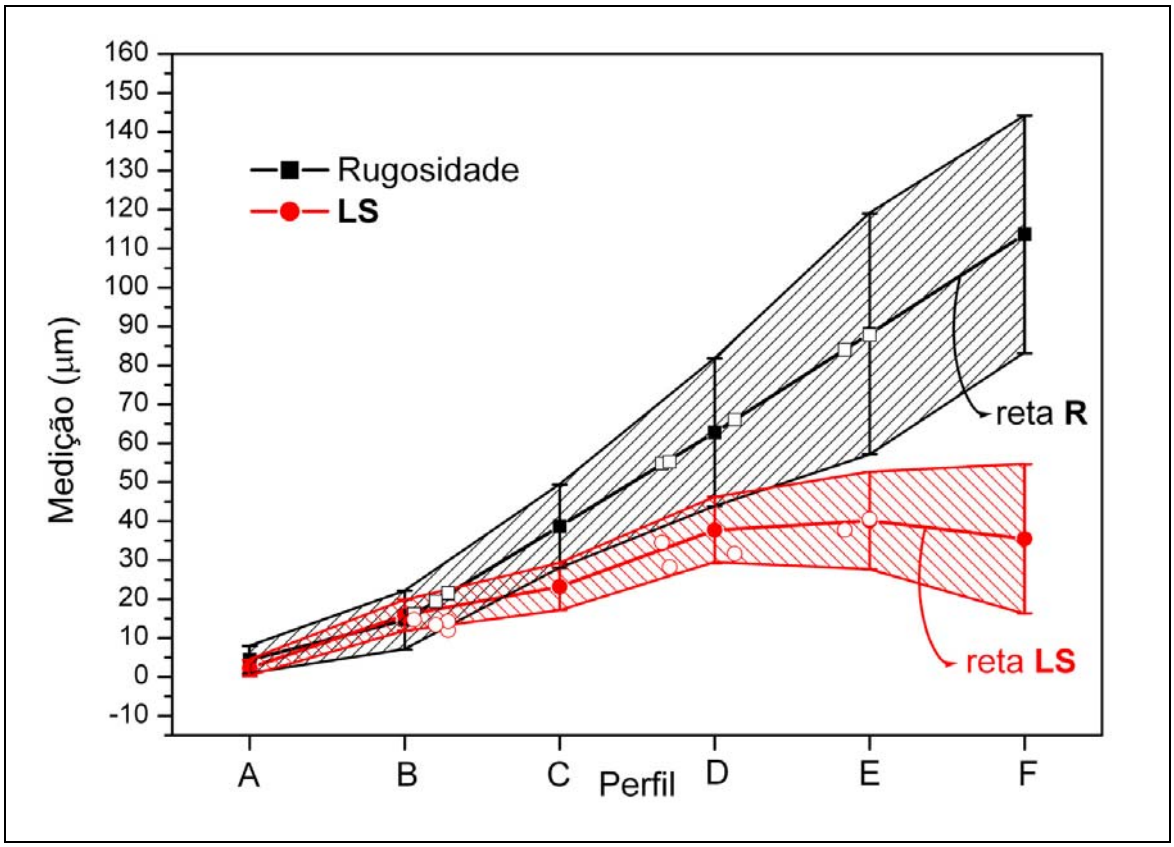

Figura 4 – Diagrama dos resultados de medição de rugosidade e do valor da LS.

O objetivo do levantamento do diagrama apresentado na Figura 4 foi investigar se tal diagrama podia ser utilizado para determinar o valor da **LS** na medição de espessura, nos casos em que não se tem acesso ao substrato metálico para determinar o valor da **LS** experimentalmente, havendo uma vantagem adicional pelo fato do diagrama da Figura 4 permitir interpolações. Para verificar se o mesmo poderia vir a ser utilizado conforme o objetivo proposto, algumas experiências foram conduzidas.

A primeira e mais imediata verificação foi realizar medidas de rugosidade e de valor da **LS** em outros substratos de aço-carbono, com perfis variando de 15 a 90 µm, e verificar se os valores da **LS** estão dentro da área hachurada vermelha do diagrama. Na própria Figura 4, tais resultados são indicados pelos pontos de símbolo vazio, sendo que os perfis medidos correspondem ao símbolo "quadrado vazio" e os respectivos valores de **LS,** ao "círculo vazio", podendo cada conjunto de dois pontos medidos (rugosidade-valor de **LS**) definir uma reta vertical, paralela ao eixo Y. Estes resultados mostram que tal verificação foi satisfeita, pois os "círculos vazios" encontram-se dentro da área hachurada, ou seja, houve uma correspondência coerente e satisfatória entre os novos dados experimentais e o gráfico da Figura 4.

A segunda verificação foi possível com a realização da etapa seguinte do trabalho descrita no item 2.3.2. Nesta etapa, foram aplicadas camadas de tinta nos substratos submetidos a diferentes tratamentos de superfície, e a seção transversal das camadas analisada por meio de microscopia ótica. Assim, pode-se determinar a espessura das camadas, considerada como aquela acima dos picos do perfil de rugosidade. Neste caso, os perfis de rugosidade variaram de 3 a 40 µm. A Tabela V apresenta os resultados da determinação da **LS** utilizando diferentes

equipamentos de medição de espessura, em função dos diferentes perfis de rugosidade investigados, incluindo-se também a determinação do valor da **LS** graficamente, utilizando-se a Figura 4. Para isto, o valor de rugosidade foi marcado sobre a reta **R** e uma reta vertical, paralela ao eixo Y, a partir deste ponto, foi tracejada até encontrar a reta **LS**, sendo a **LS** determinada pela leitura direta no eixo Y, deste ponto de encontro entre a reta vertical e a reta **LS**.

Tabela V – Resultados da determinação da LS em função da rugosidade.

Perfil	Rugosidade (μm)		Valor da LS (μm)						
			EQ1		EQ2		EQ3		Método Gráfico
	Média	DP*	Média	DP*	Média	DP*	Média	DP*	
A	3,3	1,0	5,9	1,1	4,2	1,3	4,7	1,4	3,3
B	16,8	2,2	13,4	1,8	11,5	3,3	13,0	4,2	16,8
C	43,3	9,7	19,3	3,8	12,5	3,5	22,2	5,2	26,3

*Desvio Padrão

Os valores dos perfis investigados nesta etapa do trabalho podem ser classificados como baixo (perfis A e B) e médio (perfil C). Os dois primeiros situam-se na primeira região do gráfico da Figura 4, em que os valores de rugosidade e valor da **LS** se confundem. Já o perfil médio, denominado de C, está situado entre os perfis C e D da Figura 4. Comparando-se o valor da **LS** obtido pelos diferentes equipamentos, observa-se que há uma boa correlação entre o EQ1 e o EQ3, e sempre uma tendência do EQ2 apresentar médias mais baixas que os demais, em cada caso. Esta tendência confirma o resultado apresentado na primeira etapa do trabalho, visto que aqui as medidas foram realizadas aplicando a sonda dos medidores diretamente sobre o substrato e também lá, havia se observado tal tendência em relação ao equipamento EQ2. Esta é uma das evidências da reprodutibilidade das medições e da confiabilidade que se pode atribuir aos resultados deste trabalho. O método gráfico apresentou valores muito próximos daqueles obtidos pelos equipamentos, principalmente quando comparados com os medidos pelos equipamentos EQ1 e EQ3.

Após a aplicação da camada de tinta sobre os substratos dos perfis A, B e C, a espessura da camada foi determinada por microscopia ótica da seção transversal e pelos diferentes equipamentos de medição de espessura. No caso da microscopia ótica, realizou-se uma média de cinco medições da espessura da camada acima dos picos de rugosidade. Portanto neste caso, não é necessário descontar nenhum valor, pois se está lendo diretamente a espessura da camada. Por outro lado, com o emprego dos medidores de espessura, há a necessidade de se descontar da média de leituras, o valor devido à **LS**. Assim, obteve-se a espessura da camada com cada equipamento utilizado, considerando dois tipos de valor de correção, um destes, sendo aquele medido por cada equipamento, e outro, aquele determinado graficamente com o auxílio da Figura 4. A Tabela VI apresenta estes resultados.

Tabela VI – Medições de espessura por microscopia ótica e utilizando diferentes equipamentos, sendo o valor da LS determinado pelos medidores e pelo método gráfico.

Perfil	Microscopia (μm)		Correção pelos equipamentos (μm)			Correção pelo gráfico (μm)		
	Média	DP*	EQ1	EQ2	EQ3	EQ1	EQ2	EQ3
A	80,1	3,7	79,7	82,3	81,5	82,3	83,2	82,9
B	74,8	8,0	68,2	71,1	68,6	64,8	65,9	64,8
C	57,3	11,6	55,5	65,1	53,4	48,5	51,4	49,3

*Desvio Padrão

Pode-se observar pela Tabela VI que, a medida que o perfil de rugosidade aumenta o valor da espessura acima dos picos diminui, o que é coerente, pois existem mais vales para serem preenchidos pela tinta. Como a aplicação da tinta foi feita na mesma condição para todos os corpos-de-prova, a observação mencionada já era esperada. Os resultados da Tabela VI podem ser melhor comparados na Figura 5, onde os símbolos vazios representam as medidas realizadas com cada equipamento diferente e os símbolos azuis cheios representam as medidas de espessura após a determinação do valor de correção pelo método gráfico com cada equipamento, respectivamente. O método gráfico corresponde em se determinar o valor da **LS** pelo diagrama da Figura 4 utilizando apenas a informação da rugosidade da superfície do substrato em cada caso. Os resultados da análise de microscopia ótica são apresentados em vermelho na Figura 5 e as barras de erro são definidas pelos valores extremos do total de 5 medições realizadas. Como se pode observar, todos os resultados apresentaram uma boa correspondência entre si, comprovando-se que o método gráfico pode ser uma alternativa viável na determinação da **LS**, e posteriormente, na determinação da espessura de revestimentos quando se conhece a rugosidade mas não se tem acesso ao substrato.

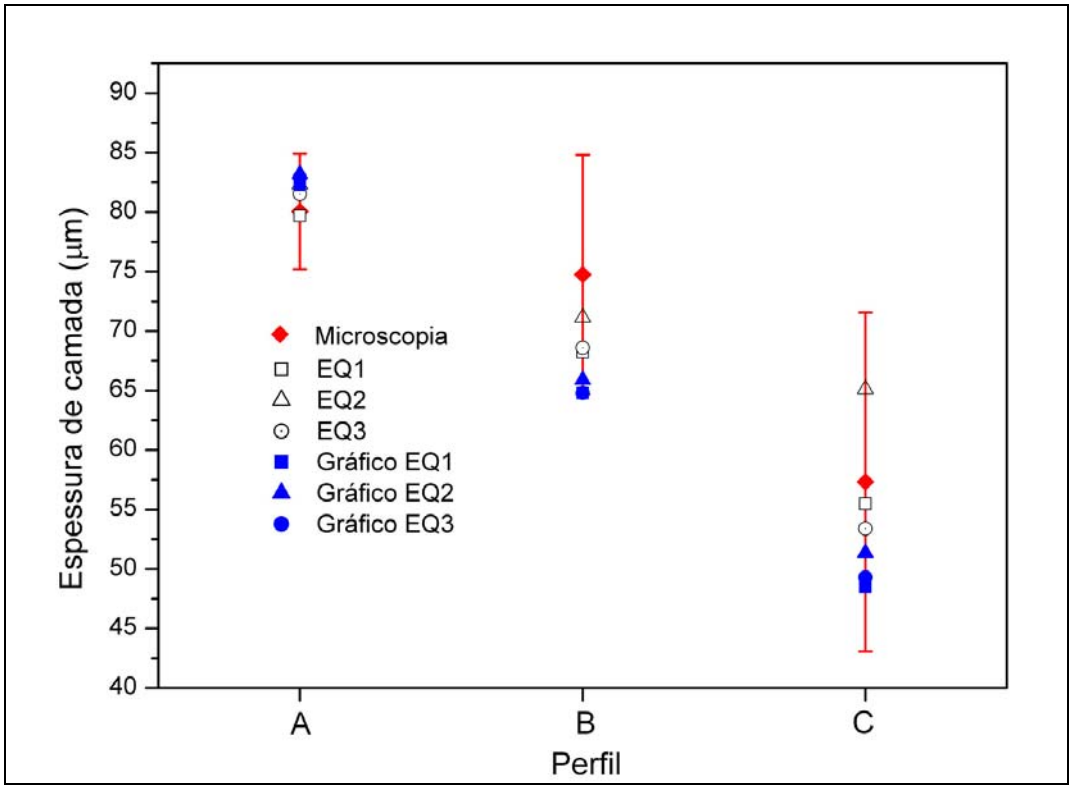

Figura 5 – Resultados das medições de espessura do revestimento, utilizando os valores de LS obtidos com cada equipamento e por meio do método gráfico.

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho investigou-se o efeito do perfil de rugosidade na medição de espessura de revestimentos aplicados em substratos de aço-carbono, com a preparação de superfície executada por meio de jateamento abrasivo. Com base nos resultados obtidos e na discussão dos mesmos, pode-se concluir que:

- É importante considerar o valor da **LS** na medição de espessura de revestimentos não magnéticos aplicados em aço-carbono, com tratamento de superfície por jateamento abrasivo, e tal valor deve ser descontado da espessura medida. O valor da **LS** varia em função do perfil de rugosidade.

- Neste trabalho, o valor da **LS** foi relacionado com os respectivos perfis de rugosidade, obtendo-se um diagrama que se mostrou útil na determinação do valor de correção, quando apenas se conhece a rugosidade do substrato e não se tem acesso ao mesmo para se determinar o valor da **LS** experimentalmente.

- Observou-se uma boa correlação entre os métodos estudados e dada a reprodutibilidade dos resultados, pode-se ter confiabilidade no emprego do método gráfico para a determinação do valor de correção.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ISO 19840:2004(E), **Paints and varnishes – Corrosion protection of steel structures by protective paint systems – Measurement of, and acceptance criteria for, the thickness of dry films on rough surfaces**, ISO, Gèneve, Switzerland, 2004.

[2] SSPC-PA 2, **PAINT APPLICATION SPECIFICATION NO. 2 – Measurement of Dry Coating Thickness with Magnetic Gages**, SSPC, Pittsburgh, USA, 2004.

[3] NBR 10443, **Tintas — Determinação da espessura da película seca — Método de ensaio**, ABNT, Rio de Janeiro, Brasil, 1988.

[4] ISO 8503, **Preparation of steel substrates before application of paints and related products – Surface roughness characteristics of blast-cleaned steel substrates**, ISO, Gèneve, Switzerland, 2003.

[5] ASTM D 4417, **Standard Test Methods for Field Measurement of Surface Profile of Blast Cleaned Steel**, ASTM, Philadelphia, USA, 2003.