

UMA VERSÃO SIMPLIFICADA DO MODELO DE OROWAN PARA CÁLCULO DA CARGA DE LAMINAÇÃO¹

Antonio Augusto Gorn²
Marcos Roberto Soares da Silva³

RESUMO

O modelo de Orowan para cálculo da carga de laminação é bastante preciso, mas sua execução é bastante complexa e demorada. O objetivo deste trabalho foi propor uma fórmula direta baseada nesse modelo que retivesse a maior parte de sua precisão, mas que tivesse execução rápida e simples. Foram propostas fórmulas interpoladoras para cálculo do fator geométrico Q usado na equação simplificada geral para cálculo de carga em função das condições operacionais específicas da cadeira F1 do trem acabador do laminador de tiras a quente da usina de Cubatão da Usiminas. O desempenho de precisão dos modelos simplificados foi equivalente ao modelo original de Orowan no caso de atrito de agarramento, e até mesmo melhor quando se considerou atrito misto de agarramento-deslizamento.

Palavras-Chave: Carga de Laminação a Quente, Modelo de Orowan, Interpolação

A SIMPLIFIED VERSION OF THE OROWAN MODEL FOR CALCULATION OF HOT ROLLING LOADS

ABSTRACT

The Orowan model that is used for calculation of rolling mill loads is very precise, but its execution is very complex and takes much time. The purpose of this work was to propose a direct formula based on this model that would retain most of its precision but with a quick and simple calculation. Several interpolating formulas were proposed for the geometrical factor Q used in the well known general simplified equation of rolling load. They were fitted to the specific operational conditions of the F1 stand of the hot strip mill from Usiminas, Cubatão works. The precision of such simplified models were equivalent to the original in the case of sticking friction, an even better in the case of mixed sticking-slipping friction.

Keywords: Hot Rolling Load, Orowan Model, Interpolation

¹ Trabalho a ser apresentado no 48º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, Santos SP, 24 a 27 de Outubro de 2011.

² Membro da ABM. Engenheiro de Materiais, M. Eng., Dr. Eng., Especialista em Laminação a Quente, USIMINAS-Cubatão, Cubatão SP, Brasil. E-Mail: Antonio.Gorni@usiminas.com.

³ Membro da ABM. Engenheiro Metalurgista, M.B.A., C.Q.E., Gerente do Suporte Técnico da Laminação a Quente, USIMINAS-Cubatão, Cubatão SP, Brazil. E-Mail: Marcos.Silva@usiminas.com

1. INTRODUÇÃO

Um dos modelos mais precisos e flexíveis para cálculo da carga de laminação é o de Orowan¹, o qual calcula o equilíbrio de forças em cada ponto ao longo do arco de contato, resolvendo-se iterativamente uma equação diferencial. Então, de posse do conjunto de valores de força normal calculados para cada ponto, a carga de laminação é calculada através da sua integração numérica ao longo do arco de contato. Uma das vantagens desse modelo está na sua capacidade de adotar qualquer regime de atrito em cada ponto considerado ao longo do arco de contato, conforme for requerido.

Por outro lado, o nível de detalhamento do modelo de Orowan torna sua execução bastante laboriosa. Supondo-se, por exemplo, que o arco de contato seja subdividido em 100 pontos, será necessário resolver numericamente 200 equações diferenciais para se calcular a colina de atrito. Posteriormente deverá ser feita a integração numérica dessa colina para se chegar ao valor da carga de laminação. Curiosamente, Orowan desenvolveu esse método em 1943 sem contar com qualquer recurso computacional; nessa época seu modelo era calculado graficamente. Aliás, a virtual inexistência dos recursos digitais de cálculo da época fez com que ele abandonasse os estudos na área da conformação mecânica e se dedicasse a outras áreas da metalurgia.

Como se pode observar a partir da figura 1, a espetacular evolução dos recursos computacionais ao longo das últimas décadas não só tornou o cálculo do modelo de Orowan muito menos penoso como também extremamente mais rápido e econômico. Contudo, muito embora esse procedimento seja resolvido atualmente em questões de centésimos de segundo, sua complexidade ainda não é muito bem vista em aplicações *on-line*, onde o tempo disponível para os cálculos é bastante restrito.

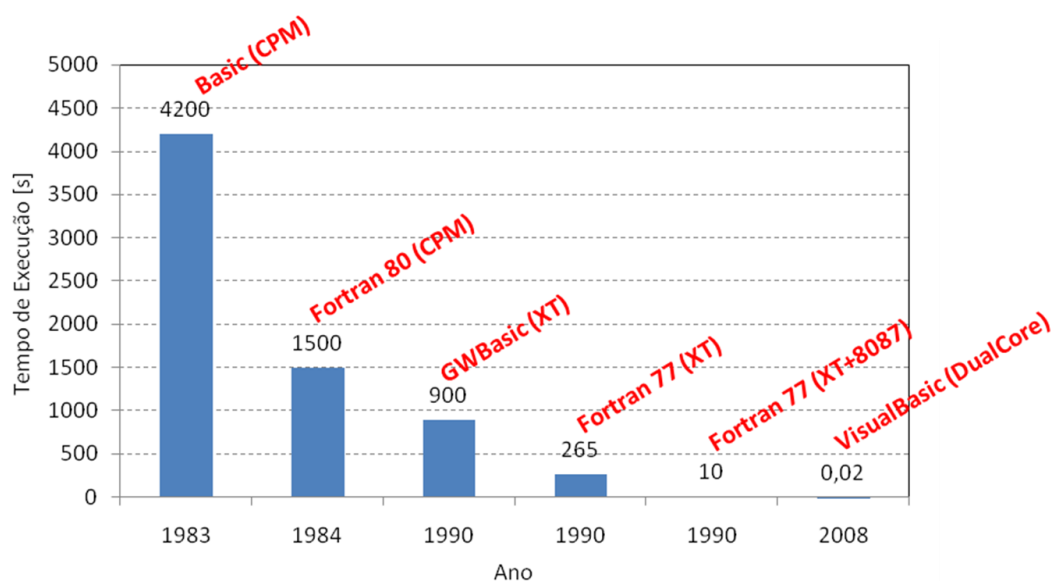


Figura 1: Evolução do tempo necessário para o cálculo da carga de laminação pelo modelo de Orowan, assumindo atrito por agarramento, em função do progresso verificado nos computadores.

Vários autores desenvolveram versões simplificadas do método de Orowan, assumindo a equação simplificada geral para cálculo de carga \mathbf{P} que já havia sido pioneiramente proposta por Ekelund em 1927²:

$$P = L \bar{\sigma} l_d Q \quad (1)$$

onde L é a largura do material, $\bar{\sigma}$ a resistência média à deformação, l_d o comprimento do arco de contato e Q um fator geométrico. Os modelos simplificados propostos pelos vários autores diferem basicamente em função da fórmula proposta para Q , a qual geralmente é deduzida analiticamente, simplificando-se o complexo desenvolvimento matemático proposto por Orowan.

Por outro lado, pode-se também deduzir fórmulas interpoladoras para Q , conforme foi proposto por Simon e outros³ para o caso de cargas de laminação de chapas grossas calculadas pelo método de elementos finitos, cuja execução também é muito complexa e demorada para uso *on line*. O ponto de partida para essa abordagem consistiu da criação de uma abrangente base de dados contendo valores da carga de laminação \mathbf{P}_{MEF} determinada por elementos finitos a partir dos correspondentes parâmetros de processo, dentro das faixas de variação típicas da laminação de chapas grossas e assumindo-se coeficiente de atrito μ constante. Foi calculado o valor de Q_{MEF} para cada registro dessa base de dados a partir da equação (1) rearranjada:

$$Q_{MEF} = \frac{P_{MEF}}{L \bar{\sigma} l_d} \quad (2)$$

Foi então proposta uma correlação entre Q_{MEF} e o fator de forma m associado com o passe de laminação correspondente à carga \mathbf{P}_{MEF} :

$$m = \frac{2 l_d}{(h_i + h_f)} \quad (3)$$

onde h_i e h_f são as espessuras de entrada e saída do esboço, respectivamente. Foi então estabelecida uma relação bastante suave entre Q_{MEF} e m , a qual permite fácil interpolação ou mesmo ajuste de uma função ajustada que permita a determinação de Q_{MEF} em função de m , viabilizando assim o rápido cálculo da carga através da equação (1) com base nos valores determinados pelo método de elementos finitos.

O objetivo deste trabalho foi aplicar a mesma metodologia proposta por Simon³ ao cálculo da carga de laminação pelo modelo de Orowan, considerando atrito por agarramento ou deslizamento, especificamente para a cadeira F1 do trem acabador do laminador de tiras a quente da usina de Cubatão da Usiminas. Para tanto é necessário deduzir algoritmos para calcular um fator geométrico Q_{ORW} específico para o modelo de Orowan.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Inicialmente foram definidas as faixas relevantes de parâmetros de processo para a cadeira F1 do trem acabador do laminador de tiras a quente, conforme descrito a seguir:

- . Espessura inicial: 30 a 35 mm, com intervalo de 1 mm;
- . Redução: 0,05 a 0,65, com intervalo de 0,05;
- . Raio do cilindro de trabalho: 316 mm;
- . Velocidade do cilindro de trabalho: 50 rpm;
- . Temperatura do esboço: 1050°C;
- . Teor de carbono do aço: 0,10%;

Foram calculados o parâmetro de forma m e a carga de laminação P_{ORW} dentro dessa faixa de dados, de acordo com o modelo original de Orowan, assumindo-se inicialmente atrito de agarramento e resistência à deformação a quente calculada pelo modelo de Misaka modificado por Siciliano, o qual considera a eventualidade de recristalização dinâmica durante o passe⁴. O teor de carbono é requerido pela equação de Misaka. Foram descartados os casos em que P_{ORW} ultrapassou 2500 t e onde m foi inferior a 8,0, já que as condições de processo correspondentes a essas situações não são típicas da cadeira F1. Os valores do fator geométrico Q_{ORW} correspondente ao modelo de Orowan foram então calculados usando-se a equação (2). Disso resultou um conjunto de pares de valores de m e Q_{ORW} relativo às condições globais específicas de processo da cadeira F1 considerando-se atrito de agarramento.

Foram feitos testes alterando-se o teor de C (0,01%, 0,05% e de 0,10% até 0,80% com intervalo de 0,10%), temperatura (de 1000°C até 1100°C com intervalo de 20°C) e velocidade do cilindro de trabalho (10 rpm e de 25 rpm a 100 rpm com intervalo de 25 rpm) para verificar os possíveis efeitos da variação dessas variáveis nos conjuntos dos pares de m e Q_{ORW} . Não foram constatadas diferenças significativas entre os conjuntos obtidos para os diferentes valores de teor de C, temperatura e velocidade do cilindro de trabalho.

O mesmo procedimento foi repetido assumindo-se a princípio atrito por deslizamento. Neste caso a carga P^{μ}_{ORW} calculada através do modelo de Orowan levou em conta o coeficiente de atrito μ , cujo valor foi variado entre 0,05 e 0,60, em intervalos de 0,05. Esse modelo assumia condição local de atrito de agarramento caso a tensão de cisalhamento decorrente do atrito num dado ponto do arco de contato ultrapassasse a metade do valor da resistência à deformação a quente. Por esse motivo, os resultados efetivamente obtidos mostraram que o atrito por deslizamento tendeu a ocorrer apenas nas regiões de entrada e saída do esboço, ficando a região central do arco de contato sob atrito de agarramento. Portanto, na realidade, esse segundo cálculo foi feito sob condições de atrito misto. O fator geométrico Q^{μ}_{ORW} específico para este caso também foi determinado pela equação (2). Dessa forma foi obtida uma massa de dados de m , μ e Q_{ORW} relativa às condições globais específicas de processo da cadeira F1 considerando-se atrito misto.

Foram feitos testes para verificar eventuais efeitos da variação de parâmetros de processo, tais como o teor de carbono, temperatura e velocidade do cilindro

de trabalho, sobre os valores dos conjuntos de registros Q_{ORW}^{μ} , m e μ . As alterações nesses conjuntos em função da variação de todos aqueles parâmetros não foram relevantes.

As relações Q_{ORW} em função de m , associada ao atrito por agarramento, e Q_{ORW}^{μ} em função de m e μ , associada ao atrito misto, foram ajustadas usando-se regressão linear múltipla, polinômios interpoladores e redes neurais usando-se o programa computacional *Statistica*. As redes neurais tinham uma única camada oculta, cujo número de neurônios e funções de ativação foram determinados automaticamente pelo programa de forma a se conseguir o melhor grau de precisão possível. O conjunto de dados usado no desenvolvimento das redes neurais foi dividido da seguinte forma: 70% para aprendizado, 15% para teste e 15% para aferição. Em cada caso de atrito foi adotada a rede neural treinada que apresentou valor mínimo de erro quando exposta ao conjunto de dados para aferição.

Os modelos simplificados assim deduzidos, bem como o modelo original de Orowan, foram testados usando-se dados industriais de 2.000 esboços processados na cadeira F1, com teor de carbono entre 0,03 e 0,21% e manganês entre 0,13 e 0,58%. Os teores dos demais elementos foram mantidos em valores metalurgicamente irrelevantes. Essa restrição teve como objetivo garantir a validade da equação de resistência à deformação a quente adotada neste trabalho. Os dados de processo coletados foram: teores de carbono e manganês do laminado; espessura inicial e final do passe; largura do laminado; temperatura do passe; velocidade e raio do cilindro de trabalho; carga aplicada no sistema de contra-flexão de cilindros de trabalho (*roll bending*), tensão no laminado entre as cadeiras F1 e F2 e a carga de laminação medida. O valor da carga aplicado pelo sistema de contra-flexão foi deduzido da carga medida, já que ele não se origina do processo de laminação propriamente dito, obtendo-se assim os valores de carga reais. Uma vez que há tensão no lado de saída da F1, mas não no lado de entrada, foi deduzida metade da tensão aplicada entre as cadeiras F1 e F2 dos valores calculados de resistência à deformação a quente usados no cálculo da carga. Quando o modelo envolvia atrito por deslizamento, o valor do seu coeficiente foi calculado usando-se um modelo desenvolvido especificamente para essa cadeira de laminação em outro trabalho⁵.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 2a mostra a relação obtida entre Q_{ORW} e m correspondente ao cálculo do modelo de carga de Orowan assumindo atrito por agarramento. Conforme pode ser observado na tabela 1, essa relação já é bem descrita através de uma correlação linear, com coeficiente de correlação r^2 igual a 0,998 e erro padrão da estimativa (EPE) de 0,0191 (1,24% em relação ao valor médio). Os polinômios interpoladores e rede neural apresentaram precisão um pouco melhor.

A tabela 2 mostra os níveis de precisão para cálculo de carga relativos à cadeira F1 do Trem Acabador do Laminador de Tiras a Quente conseguidos para os modelos de Orowan, original e simplificado, quando se considerou atrito por agarramento. Como se pode observar, uma comparação direta entre os valores calculados e reais indicou que os níveis de precisão do modelo simplificado estão muito próximos do original, independentemente de ter sido usado polinômio interpolador ou re-

de neural para se calcular Q_{ORW} . A regressão linear entre os dados reais e os calculados, um procedimento de calibração tradicionalmente usado para aumentar o nível de acerto de um modelo, melhorou igualmente os resultados dos modelos de Orowan original e simplificado. Isso mostra que a abordagem adotada neste trabalho conseguiu condensar a metodologia do modelo original na relação Q_{ORW} em função de m .

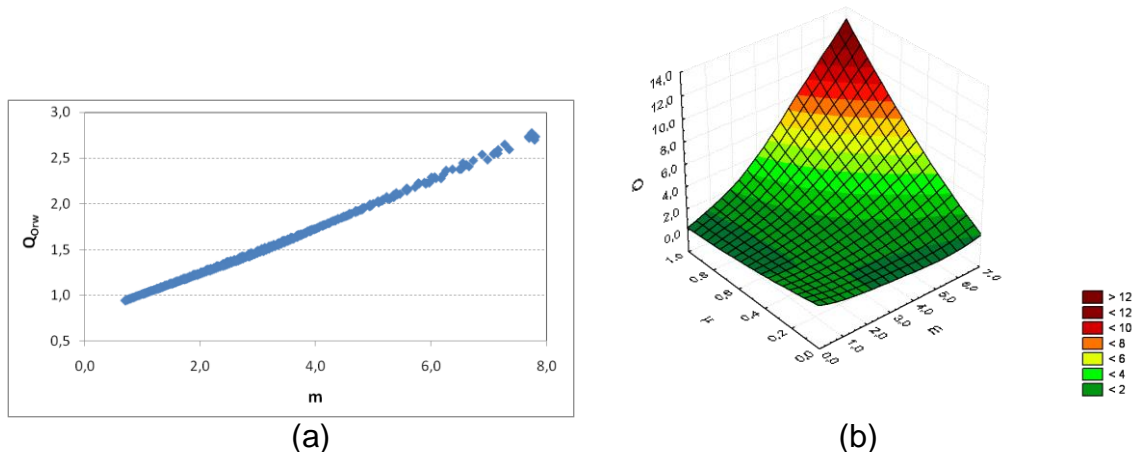


Figura 2: a) Relação Q_{ORW} x m determinada a partir dos valores de carga de laminação calculados pelo modelo de Orowan assumindo atrito de agarramento; b) Relação Q^{μ}_{ORW} x m x μ determinada a partir dos valores de carga de laminação calculados pelo modelo de Orowan assumindo atrito misto.

Tabela 1: Nível de precisão conseguido pelas funções usadas para se modelar Q_{ORW} em função de m no caso de atrito por agarramento.

Modelo	r^2	EPE	
		Absoluto	%
Função Linear	0,998	0,0191	1,24
Polinômio 2° Grau	0,999	0,0111	0,72
Polinômio 3° Grau	0,999	0,0107	0,70
Polinômio 4° Grau	0,999	0,0105	0,68
Rede Neural 1-5-1	0,999	0,0109	0,70

Já a figura 2b apresenta a relação obtida entre Q^{μ}_{ORW} , m e μ correspondente ao cálculo do modelo de carga de Orowan assumindo atrito misto. Neste caso foi constatado que Q^{μ}_{ORW} pode ser calculado através de um polinômio interpolador com a seguinte forma:

$$Q^{\mu}_{ORW} = m^{a\mu} + m^{b\mu} + c \quad (4)$$

onde a , b e c são constantes de ajuste determinadas através de regressão não-linear. Esta abordagem apresentou r^2 igual a 0,931 e erro padrão da estimativa igual a 0,2018 (13,1% da média). Já uma rede neural com configuração 2-6-1 apresentou melhor nível de ajuste, com r^2 igual a 0,987 e erro padrão da estimativa de 0,0891 (5,8% da média).

A tabela 3 mostra os níveis de precisão obtidos para o cálculo de cargas relativas à cadeira F1 do Trem Acabador do Laminador de Tiras a Quente conseguidos para os modelos de Orowan, original e simplificado, quando se considerou atrito misto. Em primeiro lugar, é interessante notar que, de forma geral, os níveis de precisão de cálculo foram melhores do que quando se assumiu atrito de agarramento, o que sinaliza que o atrito misto foi o mais representativo neste caso. Também aqui foi observado que a calibração dos valores calculados através da regressão linear entre eles e os valores reais melhorou a precisão dos modelos, como já era esperado.

Tabela 2: Erro padrão da estimativa e fração de registros com erro abaixo de $\pm 10\%$ para os valores de carga calculados pelos modelos de Orowan original e simplificado, assumindo-se atrito de agarramento. São apresentados os resultados da comparação entre resultados reais e calculados, e entre resultados reais e calculados com calibração através de regressão linear com os resultados reais.

Orowan Atrito por Agarramento		Aplicação Direta		Calibração Linear	
		EPE [t]	Erro $\leq \pm 10\%$ [%]	EPE [t]	Erro $\leq \pm 10\%$ [%]
Original		118	83	97	89
Q _{ORW}	Pol. 4º Grau	120	82	101	88
	Rede Neural	119	82	100	88

Tabela 3: Erro padrão da estimativa e fração de registros com erro abaixo de $\pm 10\%$ para os valores de carga calculados pelos modelos de Orowan original e simplificado, assumindo-se atrito misto. São apresentados os resultados da comparação entre resultados reais e calculados, e entre resultados reais e calculados com calibração através de regressão linear com os resultados reais.

Orowan Atrito Misto		Aplicação Direta		Calibração Linear	
		EPE [t]	Erro $\leq \pm 10\%$ [%]	EPE [t]	Erro $\leq \pm 10\%$ [%]
Original		104	88	90	92
Q ^μ _{ORW}	Pol. Interpol.	74	96	69	98
	Rede Neural	91	92	83	93

Neste caso pode ser feita uma constatação à primeira vista surpreendente: os desempenhos dos modelos simplificados de Orowan assumindo atrito misto foram melhores do que o verificado para o original. O que parece ter ocorrido aqui é que o erro dessas versões simplificadas de Orowan em relação ao modelo original pode, por mero acaso, ter aproximado seus resultados dos valores reais de carga de laminação. Essa constatação parece ser confirmada pelo fato de que a versão do modelo simplificado onde se calculou o fator geométrico Q^μ_{ORW} com maior precisão, usando a rede neural, apresentou desempenho intermediário em termos de precisão em termos do cálculo de carga. De toda forma, constatações desconcertantes como essa não são totalmente inesperadas no modelamento da carga de laminação a

quente. Como se sabe, neste caso, os erros decorrentes de fatores de processo cujo modelamento ainda não se encontra totalmente aperfeiçoado, tais como a condição tribológica no arco de contato, perfil de temperatura ao longo da espessura do esboço e resistência à deformação a quente, podem gerar erros bem superiores aos associados com os algoritmos usados para cálculo de carga⁶.

4. CONCLUSÕES

Foi apresentado neste trabalho um procedimento simplificado para o cálculo de cargas de laminação a quente baseado no complexo modelo de Orowan. A abordagem proposta consistiu da dedução de fórmulas interpoladoras para o fator geométrico Q , permitindo o cálculo da carga de laminação através da fórmula geral simplificada proposta inicialmente por Ekelund. Essas fórmulas de Q , em função do fator de forma m (no caso de atrito por agarramento) e também do coeficiente de atrito μ (no caso de atrito misto), foram ajustadas a partir de valores de carga de laminação calculados pelo modelo de Orowan original para a faixa típica de parâmetros de processo da cadeira F1 do trem acabador do laminador de tiras a quente da usina de Cubatão da Usiminas.

Os resultados obtidos foram muito bons. As cargas de laminação calculadas pelas diversas versões do modelo simplificado de Orowan considerando atrito de agarramento apresentaram nível de precisão muito semelhante ao do modelo original. Por sua vez, ao se adotar atrito de misto, observou-se que os níveis de precisão obtidos pelas várias versões do modelo simplificado de Orowan foram significativamente melhores do que o do modelo original. Aparentemente o erro sistemático associado ao modelamento do fator geométrico Q_{ORW}^{μ} resultou fortuitamente numa aproximação dos valores calculados pelos modelos simplificados aos reais. Esse fato aparentemente contraditório não chega a ser inesperado quando se considera que as fontes de erro associadas ao modelamento da temperatura do esboço, tribologia no arco de contato e resistência à deformação a quente são bem maiores do que a imprecisão matemática dos modelos para cálculo de carga de laminação.

5. REFERÊNCIAS

1. OROWAN, E. The Calculation of Roll Pressure in Hot and Cold Rolling. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, v. 150, 140-167, 1943.
2. WUSATOWSKI, Z. **Fundamentals of Rolling**, Pergamon Press, Oxford, 1969, 679 p.
3. SIMON, S. e outros. Geometric Factors for Fast Calculation of Roll Force in Plate Rolling. 10th International Conference on Steel Rolling. **Proceedings...** Chinese Society for Metals, Beijing, p. 134-141, 2010.
4. SICILIANO JR., F. et al. Mathematical Modeling of the Mean Flow Stress, Fractional Softening and Grain Size During the Hot Strip Rolling of C-Mn Steels. **ISIJ International**, v. 26, n. 12, p. 1500-1006, December 1996.

5. GORNI, A.A. & SILVA, M.R.S. Characterization of the Friction Conditions in the Finishing Stands of a Hot Strip Mill. In: 1st International Brazilian Conference on Tribology – Tribo-BR 2010. **Proceedings...** Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, Rio de Janeiro, p. 680-689, 2010.
6. SELLARS, C.M. Modelling – An Interdisciplinary Activity. In: Mathematical Modelling of Hot Rolling of Steel. **Proceedings...** Canadian Institute of Mining and Metallurgy, Hamilton, p. 1-18, Aug. 1990.