

INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA E ACABAMENTO SUPERFICIAL DO CORPO DE PROVA NA AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CHAPAS DE AÇO

Ravilson A. Chemin Filho (bolsista PIBIC/UFPR)¹, Erik Jackson de Camargo (bolsa trabalho UFPR)², Paulo Victor P. Marcondes (Prof. Adjunto II)³

^{1,2,3}Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Mecânica
Caixa Postal 19011

Curitiba, Paraná – CEP: 81531-990

ravilson@demec.ufpr.br, ejc@demec.ufpr.br, marcondes@demec.ufpr.br

Resumo - Atualmente, procura-se desenvolver novos procedimentos de fabricação visando um melhor aproveitamento dos produtos laminados e dessa forma possibilitar uma maior qualidade no produto final manufaturado. Com a finalidade de otimizar tais procedimentos, estudos empíricos foram feitos para analisar a influência do acabamento superficial da aresta de corte e geometria de corpos de prova retirados de chapas metálicas oriundas da laminação. Na avaliação das propriedades mecânicas das chapas de aço, foram realizados ensaios de tração em corpos de prova retangulares retificados e não retificados, assim como corpos de prova usinados em forma de gravata. Inicialmente, determinou-se a anisotropia (R) nas direções: 0°, 45° e 90° segundo norma específica. Em seguida, determinou-se o limite de resistência à tração dos diferentes corpos de prova para cada direção. Mediu-se, ainda, a deformação máxima alcançada nos ensaios. Após a coleta dos dados realizou-se uma análise visando comparar a influência nas propriedades mecânicas obtidas pela utilização de corpos de prova retangulares estampados a frio e retificados, estampados a frio e não retificados e os corpos de prova fresados em forma de gravata. Desta maneira, estudou-se as influências nas propriedades mecânicas ocasionadas pelo acabamento superficial e a forma geométrica do corpo de prova.

Palavras-chave: Chapas metálicas, Geometria do corpo de prova, Acabamento superficial.

Abstract – Nowadays, in order to improve the formed product quality the sheet manufacturing processes are in great development. Uniaxial tensile tests is one of the principal methods to estimate mechanical properties of sheet metals. Furthermore, the body geometry and the surface condition are important characteristics of this test. In the present work, it was studied the geometry and surface condition influence in the anisotropy factor (R), in the strain hardness coefficient (n), in the tensile strength (TS), in the yield stress (YS) and in the total elongation (A) of a NBR 5915 medium drawing steel. The tests showed the variation of the results obtained with the different geometry and surface condition used for each kind of sheet-type specimen analysed.

Key-words: Sheet Metal, Body Geometry, Surface Condition.

INTRODUÇÃO

Com a evolução dos processos de fabricação, faz-se necessário um avanço na forma de obtenção de medidas em relação às propriedades mecânicas dos materiais. As medidas devem-se tornar mais precisas e obtidas de forma mais simplificada. Com a finalidade de otimizar os resultados já existentes, estudou-se a influência do acabamento da superfície lateral e da geometria de corpos de prova oriundos de chapas de aço laminadas a frio.

Determinou-se a anisotropia (R), o limite de resistência à tração e ainda, a elongação máxima alcançada pelos corpos de prova confeccionados a 0°, 45° e 90° do sentido de laminação da chapa. Tais corpos foram preparados com geometrias segundo norma específica: retangulares, retificados e não-retificados e fresados em forma de gravata.

Pela análise dos resultados práticos, pode-se avaliar se a geometria e a qualidade de acabamento da superfície lateral dos corpos de prova exercem influência significativa nas propriedades mecânicas avaliadas. Com isto pode-se, ainda, obter informações prévias da real necessidade de se retificar as superfícies laterais e confeccionar corpos de provas com geometrias complexas.

METODOLOGIA

Ensaio proposto. O teste de tração é o ensaio mecânico mais utilizado na determinação das propriedades mecânicas de chapas metálicas. Este permite obter o limite de resistência, o limite de escoamento, o grau de encruamento, o índice de anisotropia e o alongamento do material [1, 9], sendo estes os fatores básicos que caracterizam o material com relação ao seu grau de estampabilidade.

O ensaio de tração é um teste uniaxial e sem atrito, efetuado em máquinas de ensaios que têm uma garra fixa e uma garra móvel para prender e esticar um corpo de prova normalizado. Estes corpos de prova, normalmente, são retirados da chapa formando ângulos de 0°, 45° e 90° em relação à direção de laminação do material, sendo realizados três ensaios para cada direção, tomando-se então a média dos valores obtidos.

As principais normas técnicas que regulamentam o ensaio de tração [4, 7] indicam dois tipos principais de corpos de prova que podem ser utilizados para os testes. O primeiro modelo de corpo de prova, considerado padrão, apresenta o formato “gravata” (figura 1-a), com extremidades (cabeças) mais largas, onde são presos nas garras da máquina, e uma porção intermediária mais estreita (região útil). É este o local responsável pelas propriedades obtidas ao final do ensaio. O segundo modelo de corpo de prova descrito pelas normas, prevê um formato simplificado para o mesmo, sendo este retangular (figura 1-c, 1d), ou seja, a região de fixação nas garras e a região útil do corpo de prova possuem a mesma largura. Este último formato facilita a confecção dos corpos de prova, uma vez que, pela maior dificuldade de se obter os corpos de prova no formato “gravata”, a opção pelo formato retangular acaba sendo mais atraente. Esta segunda opção porém, gera dúvidas com relação à precisão e confiabilidade dos resultados devido ao seu formato diferenciado, além de que, dependendo do processo utilizado para o recorte do corpo de prova, o acabamento da seção lateral resultante do corte, pode influir diretamente nos resultados dos testes. Isto ocorre devido ao fato de que as microfissuras resultantes do cisalhamento promovido, podem ocasionar rompimento prematuro do CP ensaiado, mascarando o resultado obtido. A fim de se evitar este problema é previsto por norma [8] um passe de

acabamento desta seção em corpos de prova estampados, de forma que fique nas mesmas condições de CP's usinados.

Materiais e equipamentos utilizados. Para realização dos ensaios de tração foi utilizada uma máquina da marca EMIC, com capacidade para 10 toneladas. Foram utilizados ainda, ligados a máquina de tração, uma célula de carga com capacidade para 2000 kgf, além de um extensômetro (EMIC) com abertura máxima de 25 mm. Através da célula de carga foi obtida força durante cada ensaio, enquanto que o extensômetro preso ao corpo de prova media a deformação sofrida pelo material. Todo o sistema de aquisição de dados estava ligado a um microcomputador, o qual continha o programa Tesc versão 1.06, com método desenvolvido pela própria EMIC para realização de toda operação de cálculo e apresentação dos resultados numérico bem como os gráficos dos ensaios de anisotropia, encruamento, limite de resistência, tensão de escoamento e alongamento [2, 3, 4, 7, 8].

A chapa metálica utilizada corresponde a classe EM (Estampabilidade Média) da norma NBR 5915 [6], que descreve as propriedades mecânicas para chapas finas laminadas a frio, destinadas para a aplicação de estampagem. A chapa utilizada possuía espessura de 1,5 mm.

Desenvolvimento experimental. Para avaliação da influência do formato e do acabamento da aresta de corte dos corpos de prova, realizaram-se sucessivos ensaios de tração, a fim de verificar o nível de variação dos resultados devido a estes fatores.

Desta forma foram confeccionados um total de 15 corpos de prova (5 para cada direção) no formato “gravata” (modelo 1), usinados num centro de usinagem CNC e outros 15 retangulares (modelo 2), recortados em guilhotina e retificados, estes com a mesma largura da região útil dos corpos de prova do modelo 1 (12,5 mm). A partir destes dois modelos pretendeu-se avaliar a influência da forma do corpo de prova na condição do fator de anisotropia (R), coeficiente de encruamento (n), limite de resistência (LR), alongamento percentual (A) e tensão de escoamento (TE). Para isso foram ensaiados três corpos de prova para cada direção de laminação, donde tomou-se a média de R, n e TE. Avaliou-se, também, outros três (um para cada direção de laminação) onde se obteve o valor médio de LR e de A.

Para a avaliação da influência do acabamento da aresta de corte dos corpos de prova, foram confeccionados outros 30 CP's retangulares, com 20 mm de largura e 200 mm de comprimento. Destes 30 corpos de prova, apenas 15 (5 para cada direção de laminação) foram retificados após serem cortados na guilhotina (modelo 3), de forma que os outros 15 permaneceram com o acabamento resultante do cisalhamento promovido pela reação de corte na guilhotina (modelo 4). Desta forma, pretendeu-se comparar os resultados obtidos para os mesmos fatores descritos anteriormente (R, n, LR, A e TE) e assim verificar a influência do acabamento resultante pela variação das propriedades obtidas. O procedimento de ensaio foi o mesmo utilizado na primeira seção de testes, para os CP's modelo 1 e 2.

RESULTADOS

A tabela 1 apresenta o resultado detalhado dos ensaios de tração realizados para os quatro tipos de corpos de prova testados (figura 1), onde estão os valores médios obtidos para cada direção de laminação. Para o limite de resistência (LR) e alongamento (A) estão

apresentados apenas um valor médio, uma vez que para estas propriedades a média obtida é resultante do ensaio de um corpo de prova para cada direção de laminação (0°, 45° e 90°) e, destes três ensaios calculou-se diretamente o resultado final apresentado.

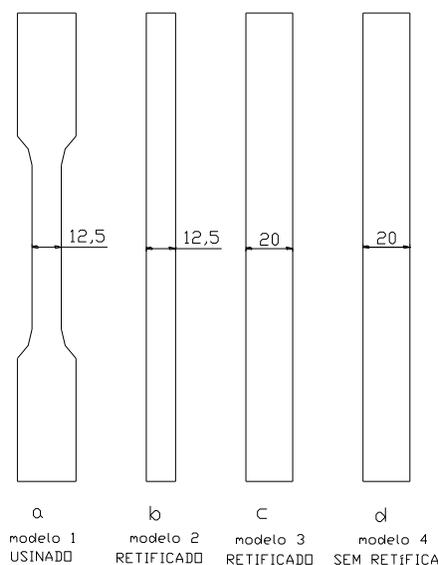


Figura 1. Modelos de corpos de prova utilizados nos ensaios.

Tabela 1. Propriedades mecânicas obtidas nos ensaios de tração.

	CP MODELO 1	CP MODELO 2	CP MODELO 3	CP MODELO 4
R0	1.8686	1.6429	1.7593	1.8119
R45	1.1981	1.2253	1.1224	1.2296
R90	1.9623	1.9882	2.0188	2.0290
Rm	1.5568	1.5204	1.5057	1.5750
n0	0.2146	0.2137	0.2317	0.2113
n45	0.2300	0.2022	0.2388	0.2054
n90	0.2238	0.2156	0.2400	0.2093
nm	0.2246	0.2084	0.2373	0.2079
LR (MPa)	327.4	323.6	318.7	319.5
A (%)	39.5	41.2	46.1	43.7
TE0 (MPa)	187.3	191.0	181.3	186.6
TE45 (MPa)	198.7	209.0	192.6	196.0
TE90 (MPa)	190.0	194.6	179.6	191.0
TEm (MPa)	192.0	198.2	184.5	191.2

A partir dos valores de anisotropia para cada direção de laminação (R0, R45 e R90) e coeficiente de encruamento (n0, n45 e n90) calculou-se ainda o valor da média ponderada (Rm e nm) para estas duas propriedades. Estes valores (da média ponderada) estão melhor apresentados nos gráficos das figuras 2 e 3, de forma que servirão de parâmetro na análise final da influência que cada tipo de corpo de prova exerce na anisotropia e no coeficiente de encruamento respectivamente.

A média ponderada para anisotropia (R_m) e coeficiente de encruamento (nm) são calculados em função dos valores de R e n resultantes para cada direção de laminação, de acordo com as equações abaixo:

$$R_m = \frac{R_0 + 2.R_{45} + R_{90}}{4} \quad (1)$$

$$nm = \frac{n_0 + 2.n_{45} + n_{90}}{4} \quad (2)$$

Os gráficos a seguir apresentam uma curva que representa o comportamento (variação dos valores finais obtidos) para os quatro modelos de corpos de prova ensaiados. Desta forma foi construído um gráfico para cada propriedade analisada, anisotropia (figura 2), coeficiente de encruamento (figura 3), limite de resistência (figura 4), alongamento (figura 5) e tensão de escoamento (figura 6).

A figura 2 mostra que a variação da média ponderada para o fator de anisotropia foi inferior a 0,1, situando-se entre 1,5 e 1,6 para os 4 modelos de corpos de prova ensaiados. Isto nos permite concluir que, tanto a variação do formato do CP (“gravata” e retangular) como o acabamento da aresta de corte dos CP’s (retificado e sem retífica), não influenciaram de forma significativa o resultado final do fator de anisotropia médio (R_m).

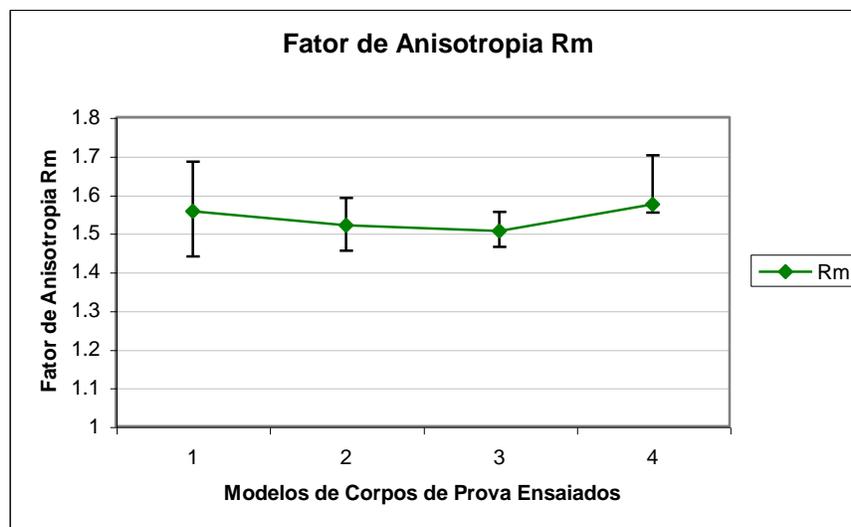


Figura 2. Variação da média ponderada do fator de anisotropia

O gráfico mostrado na figura 3 apresenta a média ponderada para o coeficiente de encruamento dos diferentes modelos de corpos de prova ensaiados. De acordo com a curva obtida, nota-se que do corpo de prova do modelo 1 (gravata) para o modelo 2 (retangular com largura de 12,5 mm) a variação do coeficiente de encruamento foi muito pequena, variando de 0,2246 para 0,2084, o que não representa uma grande variação desta propriedade devido a forma do corpo de prova. Em contrapartida, ao analisarmos a variação do coeficiente de encruamento para os CP’s do modelo 3 e 4 (retificados e sem retífica), notamos uma maior variação, o que pode indicar uma leve influência, ou seja, a influência do acabamento da aresta de corte dos corpos de prova parece ter maior influência no encruamento do que na geometria do CP.

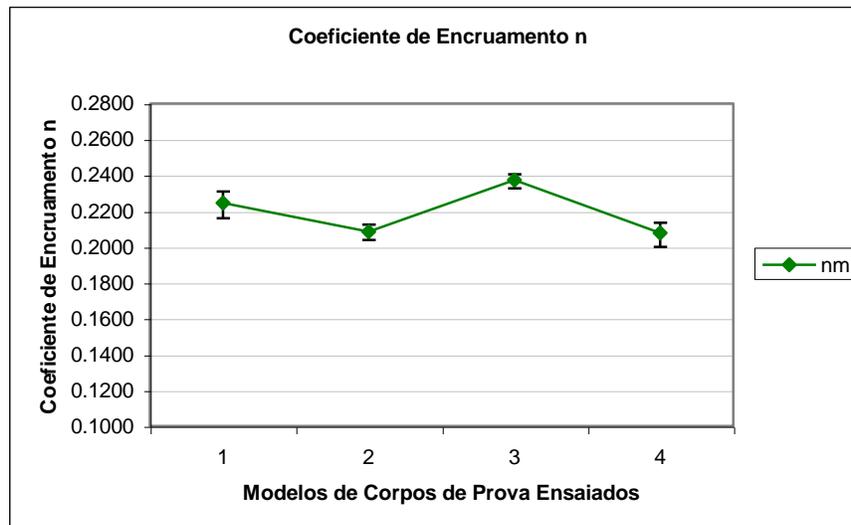


Figura 3. Variação da média ponderada do coeficiente de encruamento.

O limite de resistência, propriedade analisada na figura 4, apresenta uma queda de aproximadamente 4 MPa, do corpo de prova modelo 1 para o modelo 2. A diferença no LR entre os CP's modelo 3 e 4 foi inferior a 1 MPa, sendo que a máxima variação foi de 8,7 MPa do CP modelo 1 para o CP modelo 3, que apresentaram o maior e o menor valor de LR respectivamente. Se analisarmos estes valores segundo a norma do aço investigado [NBR 5915], concluímos que o LR não sofreu influência significativa nem pela variação do formato do CP, nem pelo acabamento da aresta de corte. Isto se deve ao fato de que esta norma delimita apenas um valor máximo para especificação deste aço (390 MPa), não oferecendo uma faixa precisa de valores para avaliação dos resultados.

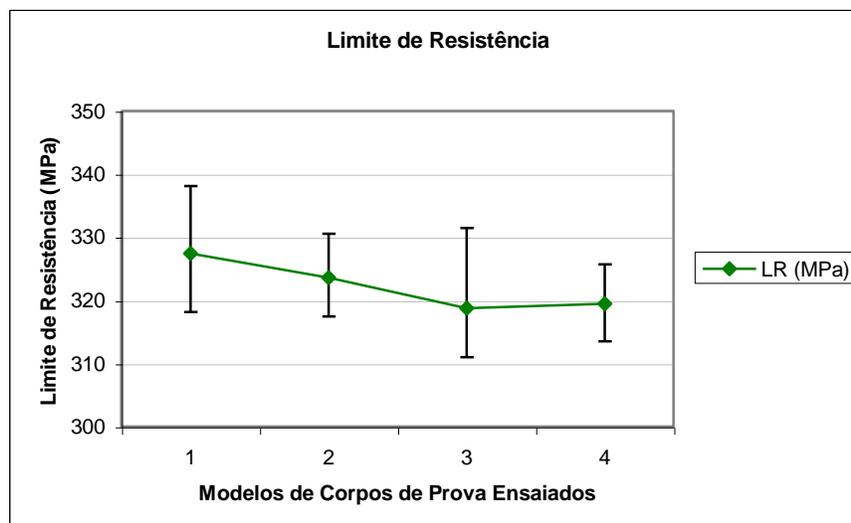


Figura 4. Variação do limite de resistência para os quatro modelos de corpos de prova ensaiados.

Ao analisarmos a figura 5, que corresponde ao alongamento percentual máximo (A) atingido pelos corpos de prova até o instante da ruptura, notamos uma coerência nos ensaios realizados, uma vez que o alongamento varia inversamente proporcional ao limite de resistência, visto gráfico 4. Assim verificamos uma variação inferior a 2% do modelo 1 para o modelo 2, e uma variação inferior a 3% do modelo 3 para o modelo 4. Analisando-se separadamente os modelos 1 e 2, para identificação da influência da geometria e dos modelos 3 e 4, para verificação da influência do acabamento da aresta de corte, pode-se concluir que o alongamento não foi diretamente afetado pela geometria dos corpos de prova. Porém, para a condição de acabamento da aresta de corte observa-se uma queda de 2,4% no alongamento do corpo de prova do modelo 3 (retificado) para o modelo 4 (sem retífica). Esta queda pode ser atribuída a pior condição de acabamento.

De modo geral, podemos dizer que a condição de acabamento da aresta de corte tem maior influência no alongamento do que no limite de resistência, uma vez que uma variação de 2,4% em A é muito mais significativa, em termos técnicos, do que uma variação de 0,8 MPa em LR.

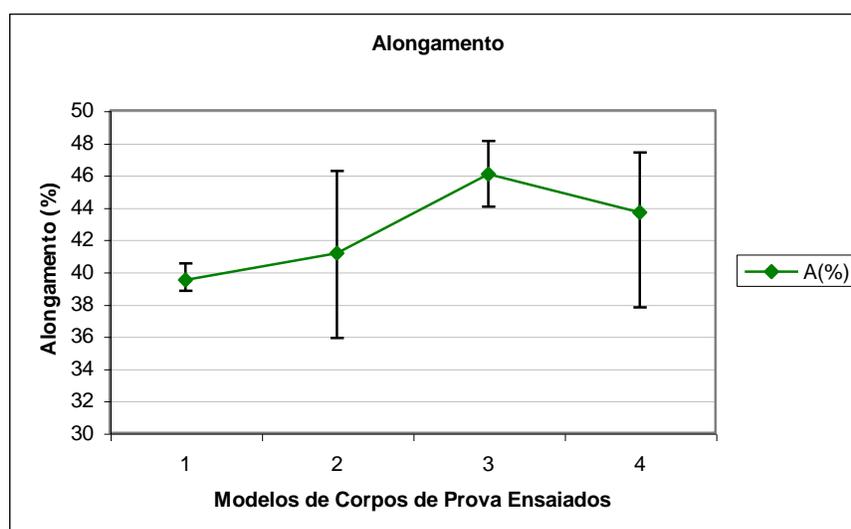


Figura 5. Variação do alongamento para os quatro modelos de corpos de prova ensaiados.

A figura 6 mostra o gráfico referente à tensão de escoamento obtida nos ensaios para os quatro tipos de corpos de prova ensaiados. Da mesma forma que o limite de resistência, uma variação máxima de aproximadamente 10 MPa não é muito significativa se comparada à faixa de valores estabelecidos pela norma para esta propriedade do aço em questão.

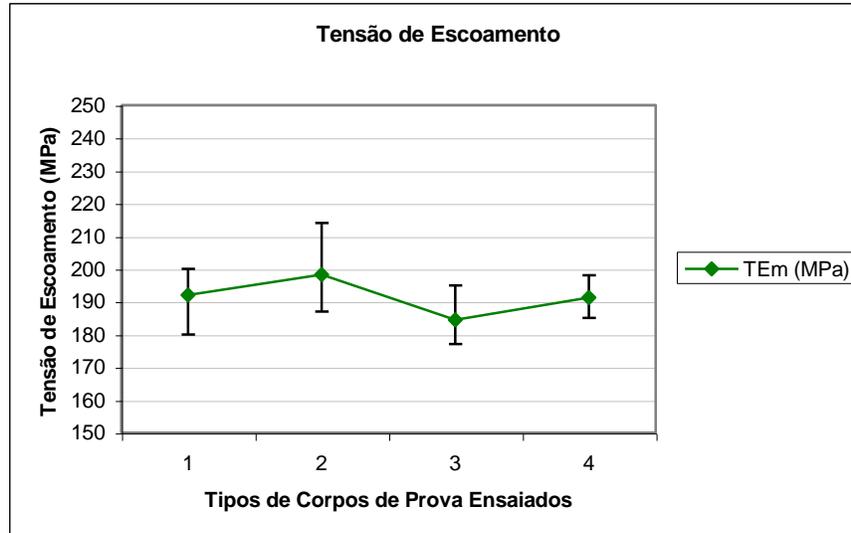


Figura 6. Variação da tensão de escoamento para os quatro modelos de corpos de prova ensaiados.

DISCUSSÃO E ANÁLISES

Durante a realização dos ensaios com os corpos de prova do modelo 4, sem acabamento de retífica da aresta de corte, dois corpos de prova romperam antes do limite esperado para este material, o que nos levou a desconsiderar o resultado destes ensaios. Assim, dentre os resultados apresentados e analisados para este modelo e CP, só estão considerados os ensaios realizados com sucesso.

Apesar da variação de resultados apresentar-se relativamente pequena de modo geral, em alguns casos nota-se certa influência no resultado final obtido por parte do acabamento da aresta de corte, como no alongamento por exemplo. Porém, esta influência pode ser desconsiderada ao compararmos os resultados finais dos ensaios com a norma NBR 5915 que especifica o material investigado. Esta norma prevê, para o limite de resistência e para o alongamento, apenas um limite máximo e um limite mínimo, dentro dos quais o aço atende a classe EM.

Se observarmos o limite máximo de 390 MPa para o limite de resistência e o limite mínimo de 31% para o alongamento, podemos afirmar que todos os resultados estão perfeitamente enquadrados na norma, e não se aproximaram em demasia dos limites estabelecidos.

CONCLUSÕES

Existe uma variação muito pequena nos resultados devido ao formato dos corpos de prova, principalmente se compararmos à norma do aço investigado, a qual nos permite concluir que CP's retangulares podem ser utilizados satisfatoriamente no lugar dos CP's "gravata", mais trabalhosos de serem confeccionados.

Com relação a condição de acabamento da aresta de corte, a variação dos resultados mostrou-se pequena, o que nos permite dizer que, a princípio, esta condição não influencia os resultados (se comparados à norma). É importante notar que dois CP's romperam

prematuramente devido a fissuras oriundas do cisalhamento provocado durante o corte do material.

Em resumo podemos afirmar que a geometria do corpo de prova não influi significativamente no resultado dos testes, logo, tanto a utilização de CP's "gravata" como retangulares oferecem boa precisão nos resultados dos ensaios de tração. Já quanto ao acabamento da aresta de corte, a recomendação é a não utilização de corpos de prova sem retífica após o corte, uma vez que, para 12 ensaios programados, 2 CP's foram eliminados por falha, nos obrigando a descartá-los e utilizar corpos de prova reserva, totalizando 14 ensaios. Desta forma a orientação é utilizar CP's sem retífica somente quando se quer ter uma idéia prévia das propriedades do material, pois quando se precisa de confiabilidade dos resultados a influência do acabamento superficial do CP pode ser decisiva.

O intervalo de erros apresentado nos gráficos permite, ainda, reafirmar a influência não significativa da geometria e pequena influência do acabamento superficial dos corpos de prova. Pode-se observar que a variação dos resultados entre os diferentes modelos de CP foi, em muitos casos, menor que o intervalo de valores observados para um mesmo lote de corpos de prova (do mesmo modelo).

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e Universidade Federal do Paraná pela bolsa PIBIC. À empresa Magius, pelo fornecimento gratuito das chapas metálicas. Ao Laboratório de Materiais do DEMEC/UFPR pela utilização das facilidades laboratoriais.

REFERÊNCIAS

- [1] ALTAN, T., OH, S., GEGEL, H. L., 1999, "Conformação de Metais: Fundamentos e Aplicações", Publicação EESC-USP, São Carlos, SP, Brasil.
- [2] ASTM E 517, "Standard Test Method for Plastic Strain Ratio r for Sheet Metal".
- [3] ASTM E 646 – 78, 1984, "Standard Test Method for Tensile Strain-Hardening Exponents (n -Values) of Metallic Sheet Metals".
- [4] ASTM E 8M, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials".
- [5] LORENTZ, R., GILAPA, G. M., 1998, "Avaliação da Conformabilidade de Chapas de Aço Plano", I Conferência Nacional de Conformação de Chapas / Porto Alegre/RS, Brasil, pp.141-150.
- [6] NBR 5915, 1984, "Chapas Finas a Frio de Aço Carbono para Estampagem".
- [7] NBR 6673, 1981, "Produtos Planos de Aço - Determinação das Propriedades Mecânicas 'a Tração'".
- [8] NBR 8164, 1983, "Folhas e Chapas de Aço de Baixo Carbono – Determinação da Anisotropia Plástica e do Expoente de Encruamento".
- [9] SCHAEFFER, L., 1999, "Conformação Mecânica", Ed. Imprensa Livre, Porto Alegre, Brasil, 167 p.
- [10] SCHULER, 1998, "Metal Forming Handbook", Springer-Verlag Berlin Heidelberg.