

DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA ENSAIO HPT (HIGH-PRESSURE TORSION) ADAPTADO A UMA MÁQUINA DE ENSAIO DE COMPRESSÃO DE 200 T

Marcell Filho da Silva Ferreira, eng.marcellferreira@gmail.com¹
Douglas Matias Araújo Alvarenga, douglas.alvarenga@hotmail.com¹
Fábio Aguilar da Silva, fabioag@oi.com.br¹
Paulo Roberto Cetlin, pcetlin@demec.ufmg.br¹
Antônio Eustáquio de Melo Pertence, pertence@demec.ufmg.br¹

¹Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antonio Carlos 6627, Campus da Pampulha, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 31270-901

Resumo: As técnicas de ensaio de Deformação Plástica Severa ou SPD (*Severe Plastic Deformation*) tem se tornado numa importante linha de pesquisa em Engenharia de Materiais nos últimos anos. O grande interesse nessa área se deve às características especiais que são obtidas pelas amostras processadas pelos ensaios que não seriam obtidas em processos convencionais de fabricação. O processamento Alta Pressão Aplicada à Torção ou HPT (*High Pressure Torsion*) é um tipo de ensaio SPD e é considerado o mais efetivo de todos, pois podem ser obtidos grãos ultrafinos e nano cristalinos através desta técnica. No presente artigo indica-se o desenvolvimento de um equipamento para ensaio HPT, adaptado a uma máquina de ensaio de compressão de capacidade de 200 t. A máquina de ensaio de compressão recebeu adaptações mecânicas para o ensaio HPT, com a instalação de sistemas de transmissão e elementos estruturais para a aplicação simultânea de esforços de torção e compressão. O projeto do equipamento adaptado sobre a máquina de ensaio permite que esta possa realizar tanto os ensaios de compressão convencionais quanto os ensaios de HPT a partir da montagem e desmontagem do equipamento. Além disso, o desenvolvimento do equipamento para ensaio de HPT considerou as restrições de espaços impostas pela máquina de ensaio de compressão de 200 t.

Palavras-chave: HPT, Deformação Plástica Severa, Projeto de Componentes Mecânicos

1. INTRODUÇÃO

1.1. Deformação Plástica Severa HPT

No processamento de materiais pelas técnicas de Deformação Plástica Severa ou SPD (*Severe Plastic Deformation*) há uma ampla variedade de ensaios cujo interesse de estudo está na obtenção de características ímpares se comparado aos processos de fabricação atuais. Com a aplicação das técnicas SPD os materiais policristalinos são capazes de atingir uma microestrutura de Granulação Ultra-Fina ou UFG (*Ultrafine-Grained*) cujo tamanho pode alcançar a escala de micro ou até nanômetros. Zhilyaev *et al.* (2008) mostram que os materiais policristalinos de granulação fina têm um limite de resistência mecânica e dureza maiores que os materiais de granulação grosseira, tendo ainda, ampliada a sua capacidade de deformação superplástica em elevadas temperaturas. O fenômeno da Superplasticidade (Hosford *et al.*, 2007) é definido como sendo o fenômeno de deformação plástica com alongamentos extremamente altos e com baixas tensões de escoamento sob a condição de temperatura elevada. Dentre os tipos de Ensaios SPD o que apresenta a maior efetividade em termos de tamanho de grão, podendo chegar a nanômetros, é o ensaio de Alta Pressão Aplicada à Torção ou HPT (*High Pressure Torsion*). O ensaio HPT teve sua idealização em meados da década de 1940 por Bridgman *et al.* (1943) o qual sujeitou uma amostra de metal específica à aplicação simultânea de esforços de compressão e torção. Bridgman observou que sob essa condição de processamento o material poderia ser deformado sob torção contínuas vezes sem ocorrer a fratura do mesmo. As técnicas do ensaio HPT que conhecemos hoje só foram aprimoradas mais tarde após vários estudos realizados. A Figura 1 ilustra esquematicamente o procedimento do ensaio HPT, onde uma pequena amostra de metal de formato cilíndrico é posicionada em uma cavidade de uma matriz inferior cujo alinhamento de precisão se dá à matriz superior, ambas de elevada resistência mecânica. Neste caso, a matriz superior avança em sentido axial exercendo a compressão enquanto a matriz inferior é rotacionada exercendo o momento de torção na amostra. O diâmetro utilizado geralmente está na faixa de 10 mm e a altura de 1 mm sendo que a pressão

aplicada à amostra está da faixa de 1 a 7 GPa dependendo do metal ou liga processados. A rotação ideal imposta ao ensaio é de no máximo 1 rpm e o torque aplicado é proporcional ao diâmetro da amostra e deve ser suficiente para provocar a deformação torcional no regime plástico e estado de encruamento. Há outras variantes do ensaio no que tange ao formato do corpo de prova, onde os trabalhos foram conduzidos utilizando amostras em anel cilíndrico (Edalati *et al.*, 2009).

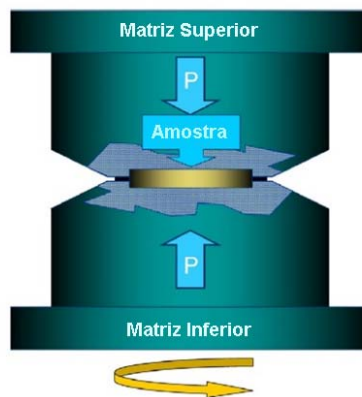


Figura 1. Ilustração esquemática mostrando os princípios do Ensaio HPT onde uma pequena amostra em formato de disco é submetida à pressão P e torção aplicadas simultaneamente. Adaptado de Kawasaki, Figueiredo e Langdon (2011)

Em termos gerais, o Ensaio HPT ideal tem como premissa básica o fato de que a amostra é submetida a um esforço de cisalhamento simples onde a deformação pode ser avaliada pelas Eq. (1) e Eq. (2) mostrada por Zhilyaev *et al.* (2008). A aplicação da equação é válida desde que nenhuma mudança na espessura do disco seja considerada, ou seja, a sua aplicação serve para se ter valores aproximados da deformação real que ocorre durante o ensaio.

$$\gamma = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{t} \times n \quad (1)$$

Na equação acima γ é a deformação por cisalhamento, r é o raio da amostra, n o número de revoluções à qual foi imposta à amostra e t representa a espessura. Para fazer uma analogia com outros processos envolvendo deformação, como o ensaio de tração, é utilizado o critério de von Mises conforme a Eq. (2). A partir daí o termo utilizado é o de deformação equivalente

$$e = \frac{\gamma}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

1.2. Parâmetro para o Desenvolvimento do Equipamento de Ensaio HPT

Para o desenvolvimento do equipamento para ensaio HPT (*High Pressure Torsion*), alguns parâmetros de entrada do projeto foram inicialmente delineados. Estes parâmetros de foram baseados em informações da literatura e serviram de base para o projeto dos componentes do dispositivo proposto.

Vários parâmetros utilizados no ensaio HPT de um dado material, tais como: pressão aplicada, diâmetro das amostras, torque requerido. O que se encontra em alguns trabalhos são teorias que propõem regras básicas que definem a correlação entre certos parâmetros. De maneira geral, cada trabalho é conduzido conforme objetivos de investigações específicas e estabelece estas informações como ponto de referência para definição da capacidade e ou desenvolvimento de um equipamento HPT.

A pressão aplicada no ensaio HPT deve ser o suficiente para evitar o deslizamento relativo entre as matrizes e a amostra do material durante a aplicação do torque e pode ser considerada teoricamente como hidrostática. Zehetbauer *et al.* (2009) mostra que deve haver um valor mínimo em magnitude de pressão aplicada à amostra para se evitar o fenômeno da fricção, o qual a pressão mínima necessária deve ser de pelo menos 3 vezes o limite de escoamento do material. Geralmente a pressão máxima aplicada ao ensaio HPT não ultrapassa o limite de 10 GPa. O trabalho de Hohenwarter *et al.* (2009) mostra que a pressão máxima deve ser estabelecida pela resistência mecânica das matrizes, neste caso o limite máximo seria entre 8 a 9 GPa. Conforme mostrado em Edalati *et al.* (2010) a aplicação de maiores pressões combinadas a elevadas deformações equivalentes para cada tipo de material surge ainda o fenômeno de saturação da dureza. Zehetbauer *et al.* (2009) cita que para materiais tipicamente processados no HPT como o aço, por exemplo, a pressão necessária para a deformação é de 5 GPa na temperatura ambiente.

Algumas informações dispostas no parágrafo anterior servem apenas como ponto de partida. Assim sendo, o valor da pressão mínima necessária para amostra HPT pode variar para mais ou para menos em relação ao valor de referência

dependendo ainda do valor do número de revoluções imposta em rpm. Como referência pode se utilizar ainda de valores de entrada de pressão mais frequentemente para determinação dos valores de diâmetro do disco (Zehetbauer *et al.*, 2009).

Considerando a amostra como sendo uma barra de espessura infinitesimal engastada em um dos lados, e a pressão aplicada à mesma como sendo puramente hidrostática, a amostra se deformará sob torção pura. A teoria utilizada tem por base o modelo de torção inelástica de materiais que é válida para seções circulares e eixos maciços como indica a Eq. (3) (Hibbeler, 2010).

$$M_t = 2\pi\tau_u \int_0^{\frac{D}{2}} r^2 dr \quad (3)$$

Na equação, M_t é o torque plástico máximo, τ_u é o limite de resistência ao cisalhamento e r representa o raio do centro à periferia do disco. Em Garcia *et al.* (2015) é mencionado que a tensão máxima de cisalhamento é equivalente a 80 % tensão de limite de resistência do um material submetido ao ensaio de tração ($\tau_u \cong 0.8 \cdot \sigma_u$). Para materiais frágeis essa faixa varia de 1.0 a 1.3 vezes a tensão de limite de resistência do material ($\tau_u \cong 1.0$ a $1.3 \cdot \sigma_u$).

No caso do ensaio de materiais dúcteis, normalmente o valor τ_u considerado é igual ao limite de resistência de resistência a tração do material, pois quando deformados plasticamente estes sofrem processo de encruamento se tornam mais resistentes mecanicamente e com aumento da dureza.

Na literatura há uma vasta gama de materiais que são submetidos ao ensaio HPT, sendo que estes variam de materiais puros como Fe, Al, Cu, Ni e Ti à ligas metálicas mais resistentes como a liga de titânio Ti-6Al-7Nb (Hohenwarter *et al.*, 2009). A Tabela 1 indica os principais parâmetros para o ensaio de HPT para vários materiais para as condições estabelecidas anteriormente.

Tabela 1. Parâmetros para o ensaio HPT

Tipo do Material	Especificação	Condição de Fabricação	Pressão (GPa)		Diâmetro (mm)		σ_u (Mpa)	Torque (N.m)
			Mín.	Max.	Mín.	Max.		
Aço Inoxidável	F 53 Super Duplex	Laminado	4,0	6,0	20	25	760	3109
Ligas de Titânio	Ti -6Al -7Nb	Laminado	4,0	6,0	20	25	1000	4091
	Ti- 6Al -4V	Recozido	6,0	6,0	20	20	900	1885
Ligas de Magnésio	ZK 60A	Barra extrudada	6,0	6,0	20	20	338	708
	AZ 31	Laminado	6,0	6,0	20	20	290	607
	AZ 61	Barra extrudada	3,0	6,0	20	30	280	1979
Ligas de Alumínio	Al 7075	Barra extrudada	6,0	6,0	20	20	228	478
	Al 6061	Recozido	4,0	6,0	20	25	124	507
Ligas de Cobre	Cu 151	Barra extrudada	6,0	6,0	20	20	295	618
Metais Puros	Fe puro (99,96%)	X	2,0	6,0	20	35	540	6061
	Al (99,99%)	Laminado a frio	2,0	6,0	20	35	113	1268
	Cu (99,99%)	Trefilado	2,0	6,0	20	35	390	4378
	Ni (99,99%)	X	2,0	6,0	20	35	45	505
	Ti (99,40) -	X	2,0	6,0	20	35	398	4467
	Mg (99,9%)	Recozido	6,0	6,0	20	20	196	411
	Mo (99,9%)	Recozido	6,0	6,0	20	20	350	733
Ligas de Fe-C (baixo e médio carbono)	1010	Laminado a frio	5,0	6,0	20	22	365	1017
	1020	Laminado a frio	5,0	6,0	20	22	469	1307
	1030	Laminado a frio	5,0	6,0	20	22	524	1461
	1040 *	Laminado a frio	5,0	6,0	20	22	586	1634
	1045	Laminado a frio	5,0	6,0	20	22	627	1748

2. DESENVOLVIMENTO DO EQUIPAMENTO PARA ENSAIO HPT

Para realização do ensaio HPT é necessário a atuação simultânea de dois módulos integrados: um gerador da força de compressão e outro do esforço de torção. A máquina de ensaio de compressão vista na Fig. 2 (a) está instalada fisicamente em laboratório onde são integrados os componentes do módulo de torção. O cilindro hidráulico (A) com capacidade máxima de 200 t. está instalado na parte inferior da máquina de compressão e a força aplicada é ajustada conforme operação do sistema de controle externo (B). Na Figura 2 (b) tem-se a vista da máquina de ensaio de compressão e na Fig. 2 (c) são indicadas, no detalhe, as medidas internas máximas disponíveis para a montagem do equipamento para o ensaio HPT.

Foi considerado que os ensaios de HPT seriam realizados a temperatura ambiente e a rotação aplicada à amostra seria de 1 rpm. Para manter a homogeneidade da deformação axial no ensaio HPT, a espessura da amostra foi definida em 1 mm.

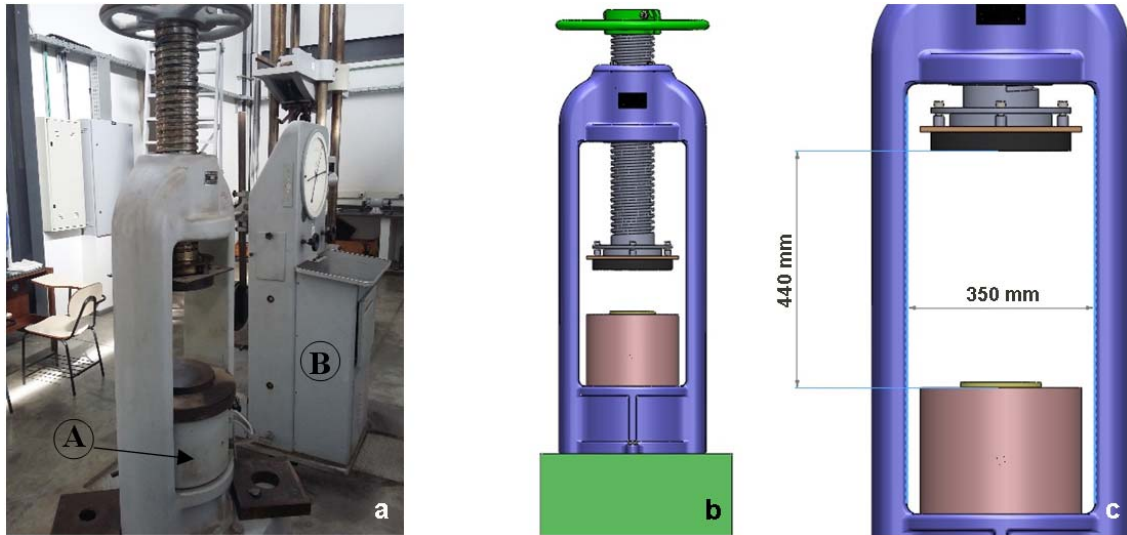


Figura 2. (a) Equipamento de ensaio de compressão com capacidade de 200 t. (b) Vista da máquina de ensaio de compressão (c) Detalhe com as medidas internas máximas disponíveis para a montagem do equipamento para o ensaio HPT.

A Figura 3 mostra esquematicamente a vista lateral em corte, com os seus principais elementos mecânicos. Basicamente o sistema é constituído por um sistema de transmissão de engrenagens cilíndricas de dentes retos (A) e motoredutor com freio cuja rotação é controlada por inversor de frequência (B), o qual é responsável por transferir o momento torçor necessário à deformação para cada tipo de amostra. Para garantir as sollicitações radiais impostas na estrutura, mancais de rolamento radiais (C) estão dispostos em pares em cada eixo do sistema de transmissão. A engrenagem de saída deverá ter capacidade de suportar um torque de aproximadamente 6100 Nm, que é o torque máximo encontrado na Tab. 1. Esta engrenagem está acoplada a um eixo (D) que apoiado em um rolamento de mancal axial auto-compensador (E) sofre uma força de compressão máxima de 2000 kN. Este mancal está acomodado em um elemento de encosto de mancal (F) que está montado na base superior (G) que compõe a máquina de ensaio de compressão. O cilindro hidráulico (H) movimenta-se pressionando axialmente o sistema de cubo estriado (I) que fixo à estrutura metálica (J) impede a transferência do esforço de torção ao cilindro. As matriz inferior (K) e a matriz superior (L) que são fixadas respectivamente são ao eixo (D) e a estrutura metálica (I) alojam o corpo de prova do material (disco em vermelho) a ser ensaiado. A Figura 4 mostra vistas da montagem do equipamento de ensaio HPT / máquina de ensaio de tração.

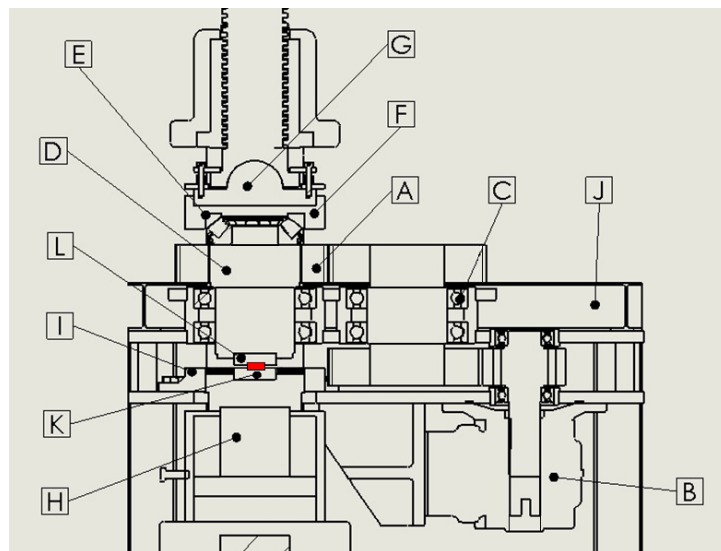


Figura 3. Esquema da vista lateral em corte do equipamento de ensaio HPT

O dimensionamento dos elementos mecânicos instalados na parte interna da máquina de ensaio de compressão foi feita de acordo com a literatura (Norton, 2013; Budynas *et al.*, 2011; Melconian, 2009), considerando-se as medidas internas máximas disponíveis e o torque máximo de 6100 Nm para uma amostra de ferro puro com diâmetro máximo de 35 mm. A pressão máxima de trabalho no ensaio HPT adotada foi de 6 GPa e a rotação de saída do conjunto de transmissão de 1 rpm.

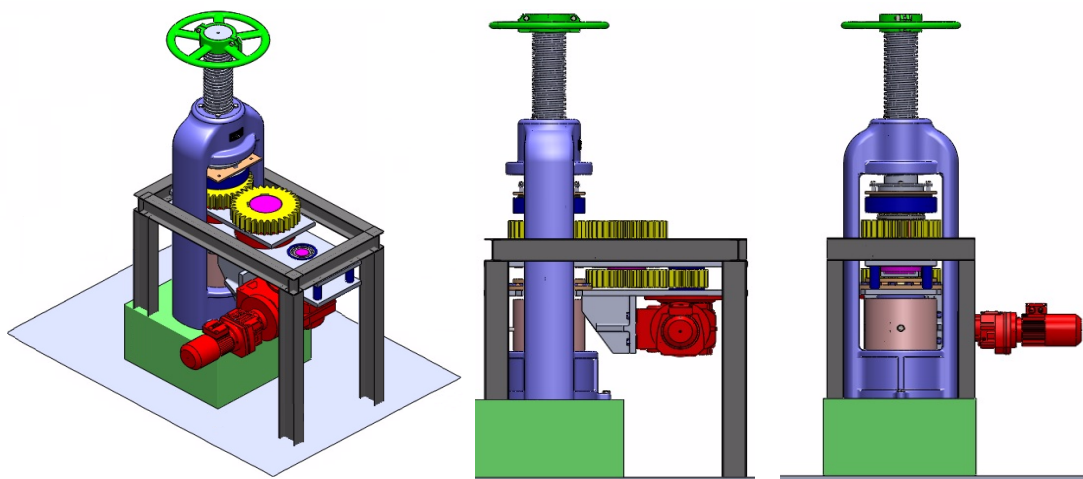


Figura 4. Vistas da montagem do equipamento de ensaio HPT / máquina de ensaio de tração.

Foi adotado um mancal de rolamento axial autocompensador de rolos cônicos (Fig. 3E) devido à possibilidade de desalinhamentos entre a parte superior e inferior da máquina de ensaio de compressão, do esforço de compressão máximo de 200 t, além dos espaços internos limitados da máquina de ensaio de compressão. Para os esforços dinâmicos de compressão e torção atuantes, selecionou-se o mancal 29420E (SKF) de diâmetro 100 mm, para uma vida de 1550 horas (Norton, 2013).

Optou-se por um sistema de transmissão constituído com dois trens de engrenagens cilíndricas de dentes retos (Fig. 3A) acoplado a um motoredutor de eixo de saída vazado na posição perpendicular (Fig. 3B) no sentido de facilitar a montagem do equipamento de ensaio de HPT.

Considerando-se o espaço disponível para montagem na máquina de ensaio de compressão adotou-se uma engrenagem cilíndrica de saída com 30 dentes, módulo 10 mm e altura de 80 mm. Para um torque máximo de saída de 6100 Nm, foi feita a simulação dos esforços de flexão nesta engrenagem de saída pelo método de elementos finitos considerando o critério de Von Mises, obtendo-se tensões atuantes de 415 MPa, especificando-se para esta engrenagem o aço ligado 4340 (limite de escoamento 700 MPa) (Melconian, 2009). A Figura 5 ilustra o exposto acima.

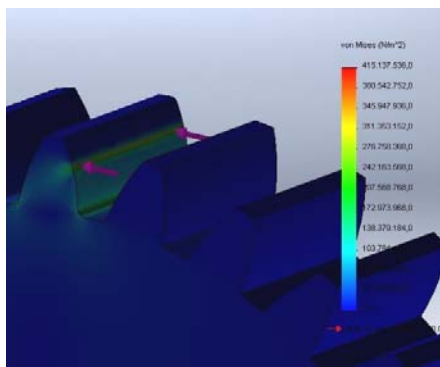


Figura 5. Simulação por elementos finitos da engrenagem cilíndrica de saída do sistema de transmissão

Considerando-se que os dois trens de engrenagens tinham uma relação de redução de 1:3, o motoredutor deveria possuir um torque de saída mínimo de 2040 Nm e rotação mínima de 3 rpm. O valor calculado para potência foi de 638 W (Melconian, 2009). Foi escolhido o motoredutor com freio com potência nominal de 0.75 KW (SEW-KAF87R57DZ80N4)

3. CONCLUSÃO

O equipamento de ensaio HPT a ser adaptado à máquina de ensaio de compressão está em fase de detalhamento. O projeto permite que se possam realizar tanto os ensaios de compressão convencionais quanto os ensaios de HPT a partir da montagem e desmontagem do equipamento.

Hohenwarter *et al* (2009) cita a existência de equipamento para ensaio HPT com capacidade de compressão de 4000 kN, com processamento de materiais com diâmetros do corpo de prova na faixa de 30 a 40 mm requerendo torque máximo de 13000 Nm.

Com relação à vida obtida para o mancal de rolamento axial autocompensador de rolos cônicos, em trabalhos de Margiela *et al.* (2013) foram considerados um rolamento axial de rolos cilíndricos, cuja aplicação é semelhante ao anterior, com carga axial de 2500 kN e vida útil calculada de 457 horas.

Margiela *et al.* (2013) indica o uso de um sistema de transmissão por correntes de rolo pelo baixo custo, entretanto tal procedimento não foi possível no nosso caso devido as restrições de espaço da máquina de ensaio de compressão.

Considera-se que a utilização do equipamento para ensaio HPT possibilitará a expansão das pesquisas nesta área, trabalhando-se com materiais mais resistentes e amostras de diâmetros maiores

4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da CAPES, CNPq, FAPEMIG e Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da UFMG pelo suporte para a concretização deste trabalho.

5. REFERÊNCIAS

- Bridgman, PW, 1943, "On Torsion Combined with Compression", J. Appl. Phys., Vol. 14, pp. 273-283
- Budynas, R.G., Nisbett, J. K., 2011, "Elementos de Máquinas de Shigley – Projeto de Engenharia Mecânica", Bookman, 8ed., Porto Alegre, Brasil, 1084 p.
- Edalati, K., Horita Z., 2009, "Scaling-Up of High Pressure Torsion Using Ring Shape" Materials Transactions, Vol. 50, No. 1, pp. 92-95
- Edalati, K., Horita Z., 2010, "Universal Plot for Hardness Variation in Pure Metals Processed by High-Pressure Torsion", Materials Transactions, Vol. 51, No. 5, pp. 1051-1054.
- Garcia, A., Spim, J. A., Santos, C. A., 2015, "Ensaio de Materias", LTC, 2ed., Rio de Janeiro, Brasil, 364 p.
- Hibbeler, R. C., 2010, "Resistência dos Materiais", Ed. Pearson, 7ed., São Paulo, Brasil, 637 p.
- Hohenwarter, A., Bachmaier, A., 2009, "Technical parameters affecting grain refinement by high pressure torsion", Int. J. Mat. Res., Vol. 100, pp. 1653-1661
- Hosford, W. F., 2007, "Metal Forming", Ed. Cambridge, São Paulo, Brazil, 312 p.
- Kawasaki, M., Figueiredo, R.B., Langdon, T.G., 2011, "An investigation of hardness homogeneity throughout disks processed by high-pressure torsion", Acta Materialia, Vol. 59, pp. 308-316.
- Margiela, D., Neyt, T., 2013, "Development of High-Pressure Torsion Device", Master Thesis, Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur, Universiteit Gent, Belgium.
- Melconian, S., 2009, "Elementos de Máquinas", Editora Érica, 9ed., São Paulo, Brasil, 375 p.
- Norton, R. L., 2013, "Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada", Bookman, 4ed., Porto Alegre, Brasil, 1028 p.
- Zehetbauer, M. J., Zhu, Y. T., "Bulk Nanostructured Materials edited", 2009, Ed. Wiley VCH, Germany
- Zhilyaev, A.P., Langdon, T.G., 2008, "Using high-pressure torsion for metal processing: Fundamentals and applications", Progress in Materials Science, Vol. 53, pp. 893-979.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

DEVELOPMENT OF HIGH PRESSURE TORSION TESTING DEVICE ADAPTED TO COMPRESSION TESTING MACHINE OF 200 T

Marcell Filho da Silva Ferreira, eng.marcellferreira@gmail.com¹
Douglas Matias Araújo Alvarenga, douglas.alvarenga@hotmail.com¹
Fábio Aguilár da Silva, fabioag@oi.com.br¹
Paulo Roberto Cetlin, pccetlin@demec.ufmg.br¹
Antônio Eustáquio de Melo Pertence, pertence@demec.ufmg.br¹

¹Federal University of Minas Gerais, Av. Antonio Carlos 6627, Campus da Pampulha, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil, 31270-901

Abstract. The Severe Plastic Deformation or SPD has become an important research theme in materials engineering in recent years. It can be explained by the special properties obtained by processing SPD's samples comparable to the traditional manufacturing industrial processes. The High Pressure Torsion procedure is a type of SPD technique and it is considered the most effective due the capability of producing ultrafine and nanocrystalline grains. In this paper is indicated the development of high pressure torsion testing device for HPT testing, adapted to compression testing machine of 200 t. The compression testing machine received some mechanics adaptations to become capable of processing HPT testing with the installation of structural members and transmission system to apply simultaneously torsion and compression efforts. The project adapted equipment on the compression testing machine allows it to make both conventional compression tests as HPT tests from the assembly and disassembly of the equipment. Furthermore, the development of equipment for HPT test considered restrictions imposed by space compression testing machine of 200 t.

Keywords: HPT, Severe Plastic Deformation, Mechanical Design of Components