

APLICAÇÃO DE MÉTODOS ANALÍTICOS PARA VALIDAÇÃO DE ENSAIO DE TORÇÃO REALIZADO EM AISI 1045, 4340 E 8640

Rafael Citadin

Faculdade SATC, Rua Pascoal Meller, 73, Criciúma, SC.

rafa.ctn14@gmail.com

Fernando Michelin Marques

Felipe Gubert Rohenkohl

Mateus Marcon Simionato

Mateus André Hilgert

Instituto Federal de Santa Catarina - IFSC, Avenida Nereu Ramos 3450D, Chapecó, SC

fernando.marques@ifsc.edu.br; felipe.gr1999@aluno.ifsc.edu.br;

Rodrigo Cardoso Costa

Instituto Federal Catarinense - IFC, Av. Frei João, 550, Luzerna, SC

rodrigo.costa@ifc.edu.br

Resumo. Como o ensaio mecânico de torção é essencial para a aquisição das propriedades mecânicas dos materiais, este trabalho foi desenvolvido para encontrar o momento torçor máximo e outras propriedades mecânicas dos aços AISI 1045, 4340 e 8640. A escolha destes materiais foi em relação aos seus níveis de utilização nas indústrias. Para o desenvolvimento dos ensaios e dos cálculos analíticos foi necessário o conhecimento de algumas grandezas físicas e equações de resistência dos materiais. Após a usinagem dos corpos de prova, realizou-se testes de dureza Brinell e os testes de torção. Também foi realizada uma análise química para a descrição correta de cada material. Os resultados obtidos nos ensaios foram correlacionados com as equações e transformados em tabelas e gráficos para comparação dos valores e validação dos ensaios.

Palavras-chave: Ensaio de torção, máquina, resistência dos materiais.

1. INTRODUÇÃO

O Ensaio de torção não é comumente utilizado para a especificação de materiais, mas proporciona informações fundamentais sobre as suas propriedades mecânicas. O ensaio de torção mesmo não sendo o mais utilizado, é o que obtém resultados mais significativos. Porém, devido à complexidade do mecanismo e desenvolvimento das equações, não é mais utilizado que o ensaio de tração.

Os corpos de prova podem ser recolhidos dos componentes que serão fabricados ou as vezes são o próprio material. Nas peças que na prática irão submeter-se à esforços de torção, como molas em espiral, barras de torção, ou eixos de transmissão utilizados para transmitir potência de um ponto à outro, o ensaio de torção é o mais indicado.

Por isso, ensaiam-se diretamente hastes, brocas e eixos, pois ao que tudo indica, este ensaio é muito empregado em pesquisas e em aplicações específicas da engenharia e da tecnologia.[1,2,3].

Definir o momento torçor máximo (força x distância) necessários para romper eixos de aço carbono 1045, 4340 e 8640 com dimensões normalizadas pelo padrão ASTM em uma máquina de ensaio de torção será o problema a ser resolvido, tanto quanto a averiguação de resultados referentes à aplicação de diferentes tipos de cargas (torque) nos eixos normalizados, analisando desta forma se os materiais sofrerão alterações nas suas propriedades mecânicas, tensões de escoamento e ruptura.

Conforme havia a necessidade de ensaios mecânicos de torção, pois, a faculdade SATC não possuía este tipo de ensaio (devido ao fato da SATC não possuir uma máquina para este propósito), foi planejada e analisada a possibilidade do desenvolvimento do projeto destes ensaios. Com estes testes pode-se desenvolver novos estudos no campo da mecânica dos sólidos, tanto nas instituições de ensino quanto na indústria em geral. Pois, testes de torção são fundamentais para o estudo de eixos de transmissão em maquinários cuja sua finalidade é a transmissão de potência aliada ao equilíbrio dinâmico e estático.

Os testes com os corpos de prova serão realizados em uma máquina de ensaio de torção. As barras serão usinadas, desta forma serão produzidos cinco corpos de prova de cada material (AISI 1045, 4340 e 8640). Por intermédio de um transferidor de grau industrial (goniômetro) e uma célula de carga, ambos acoplados na máquina, serão analisados os ângulos de torção no rompimento dos corpos, como também o momento torçor máximo aplicado no ensaio. Desta forma serão comparados os cálculos de resistência dos materiais com os resultados obtidos pela análise destes ângulos e momentos torçores, tendo como referência os gráficos de momento torçor *versus* ângulo de torção e as propriedades mecânicas de cada material.

MATERIAIS E MÉTODOS

Durante a execução do trabalho foi necessário a utilização de alguns equipamentos, que auxiliaram na metodologia para que tornasse válido os resultados futuramente encontrados.

Para a fabricação dos corpos de prova, foi necessário a aquisição de barras redondas de aço AISI 1045, 4340 e 8640, todos no estado laminado e recozido, com dimensões de 25,4 mm de diâmetro e comprimento de 1000 mm. Foram usinados cinco corpos de prova para cada tipo de material, porém foram utilizados apenas três corpos de prova, deixando dois sobressalentes de cada material.

Os corpos de prova foram desenvolvidos de acordo com a norma ASTM E-8M, norma que refere-se à ensaios de tração, pois não foi encontrado nenhuma norma que determinasse as dimensões dos corpos de prova para torção em máquina.

A figura 1 mostra as dimensões determinadas para confecção dos corpos de prova.



Figura 1. Corpo de prova adaptado [16].

Para a realização do ensaio de torção, houve a necessidade de obter os valores do módulo de ruptura à torção de cada corpo de prova. Como o módulo de ruptura equivale ao limite de resistência à tração, buscou-se este valor por intermédio de um ensaio de dureza Brinnell (HB), onde existe relação entre essas grandezas.

Os parâmetros utilizados para medição de dureza foram a carga de 187,5 kgf com esfera de 2,5 mm, e foram determinados de acordo com a capacidade do equipamento em questão, seguido das normas ASTM que definem os parâmetros para a medição de dureza dos corpos de prova e suas dimensões.

A tabela 1 representa os valores obtidos pelo ensaio de dureza e convertidos em tensão máxima de ruptura à tração dos materiais, onde posteriormente serão convertidos, novamente em módulo de ruptura à torção.

Tabela 1- Conversão de dureza HB para resistência máxima à tração

Material	HB [kgf/mm ²]	σ_{max} [Mpa]
1045 CP1	243	874,8
1045 CP2	213	766,8
1045 CP3	227	817,2
8640 CP1	249	896,4
8640 CP2	267	961,2
8640 CP3	274	986,4
4340 CP1	261	939,6
4340 CP2	296	1065,6
4340 CP3	255	918

A aquisição do sinal de torção aplicada foi obtida com uma célula de carga modelo ZSL- com capacidade para 500 kg, conforme figura 2, onde ela possui um *display* digital da marca NOVUS, e seus dados são N1500 –LC, 10DC + RT 4- 20 mA., tornando possível a leitura instantânea do valor de carga aplicada.

A célula de carga foi montada à uma distância do centro de rotação do corpo de prova de 300 mm, onde por intermédio de um braço de alavanca foi possível a determinação do torque aplicado durante o ensaio de torção.

A figura 2 indica como foi montado o dispositivo de aquisição de valores de torção.

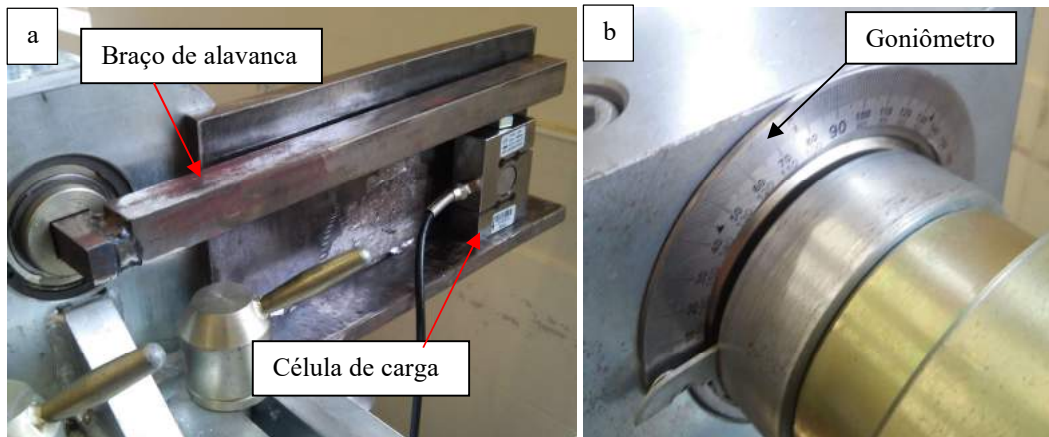


Figura 2. (a) Posição da célula de carga e (b) Transferidor de grau industrial, 180°.

Para a aquisição dos valores de ângulo de torção foi utilizado um goniômetro analógico fixado em torno do eixo de rotação do corpo de prova, sendo assim possível a visualização dos valores de deformação em graus do ensaio realizado. Figura 2 (b).

A figura 3 representa a máquina de torção com o corpo de prova montado e o *display* indicando a carga aplicada durante um instante do ensaio.

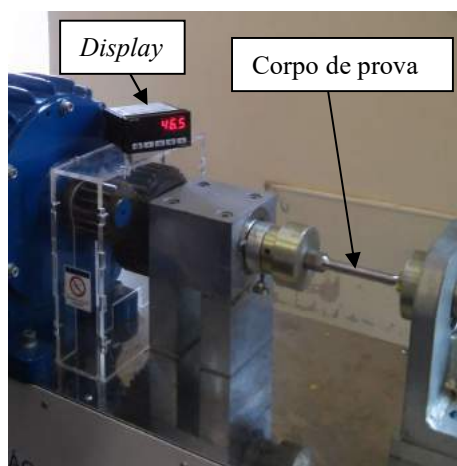


Figura 3. Ensaio de torção.

Com o intuito de analisar a microestrutura do aço após a realização dos ensaios, e atestar se ocorreu mudança de estrutura foi utilizado um microscópio ótico modelo BX 51, após preparação de polimento e ataque químico com Nital 2% foram realizadas as imagens.

O polimento da amostra teve início com a utilização de lixas com granas de 120, 220, 400, 600, 1200 mesh, seguido de polimento com pasta de diamante.

Para a medição de composição química foi utilizado um espectrômetro de difração modelo *Espectromax*, onde foi obtido os valores de composição química dos aços.

Após a utilização dos corpos de prova dos diferentes tipos de materiais, foi realizada a aquisição dos dados de momento torçor máximo no regime plástico, obtidos pelo display e de maneira simultânea o ângulo referente à distorção máxima, obtido pelo goniômetro.

A tabela 2 indica os valores obtidos após a realização dos ensaios de torção, onde são necessários estes valores para a aquisição do ângulo de distorção e a comprovação da tensão máxima de ruptura, obtida pelo ensaio de dureza.

Tabela 2- Resultados obtidos após ensaios de torção

Material	Mt _{max} (Nm)	Θ _{max} (rad.)
1045 CP1	273	14,2593
1045 CP2	270,6	13,5787
1045 CP3	270,6	14,1023
4340 CP1	312,9	13,0202
4340 CP2	313,5	14,137
4340 CP3	311,4	12,8282
8640 CP1	328,5	16,0919
8640 CP2	334,2	15,9698
8640 CP3	323,4	15,6207

Os corpos de prova denominados como 1045 CP1 para o ensaio de torção possuíam dureza de 243 HB onde será descrita a metodologia de desenvolvimento dos cálculos que posteriormente serão aplicados aos outros materiais.

$$\begin{aligned}\sigma &= \alpha \cdot HB \\ \sigma &= 3,6 \cdot 243 \\ \sigma &= 874,8 MPa \cdot 0,8 \\ \sigma &= 699,84 MPa\end{aligned}$$

A determinação de Mt_{máx} segue a sequência de:

$$\begin{aligned}\tau_{rmáx} &= \frac{16 \cdot Mt}{\pi \cdot D^3} \rightarrow 699,84 = \frac{16 \cdot Mt}{3,14 \cdot 0,0127^3} \\ Mt_{máx} &= 281,33 N \cdot m \rightarrow 28,13 Kgf \cdot m\end{aligned}$$

Determinação de g_{max}:

$$\begin{aligned}\theta_{total} &= 817^\circ \rightarrow 14,2593 rad \\ \gamma &= \frac{R \cdot \theta}{L} \rightarrow \gamma = \frac{0,00635 \cdot 14,2593}{0,075} \\ \gamma &= 1,207 rad \rightarrow 69,156^\circ\end{aligned}$$

Determinação da tensão de ruptura máxima:

$$\begin{aligned}\tau &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R^3} \cdot \left(\frac{\theta \cdot d \cdot Mt}{\theta \cdot Mt} + 3Mt \right) \\ \tau &= 699,751 MPa\end{aligned}$$

A tabela 3 representa os valores encontrados após a realização dos cálculos dos materiais AISI 1045, 4340 e 8640.

Tabela 3- Resultados dos cálculos analíticos

Material	Mt _{máx} (Nm)	Θ _{max} (rad.)	g _{max} (rad)	τ _{rmáx} (MPa)
1045 CP1	281,33	14,2593	1,207	699,751
1045 CP2	246,602	13,5787	1,149	613,799
1045 CP3	262,811	14,1023	1,193	653,973
4340 CP1	302,17	13,0202	1,102	752,093
4340 CP2	342,69	14,137	1,196	852,621
4340 CP3	295,22	12,8282	1,086	735,555
8640 CP1	288,28	16,0919	1,086	717,074
8640 CP2	309,12	15,9698	1,352	769,869
8640 CP3	317,22	15,6207	1,322	789,631

IV. RESULTADOS

A caracterização fez-se necessária para a determinação real das propriedades mecânicas dos materiais utilizados, onde a composição química referente a tabela 4 segue:

Tabela 4 – composição química dos corpos de prova

AISI	C %	Si %	M%	P %	S %	Cr %	Ni %	Mo%
1045	0,37	0,18	0,63	0,02	0,002	0,03	0,003	0,01
8640	0,34	0,18	0,62	0,017	0,000	0,80	1,684	0,22
4340	0,37	0,23	0,88	0,025	0,009	0,44	0,511	0,17

As figuras 4 (a) (b) e (c) são referentes aos corpos de prova utilizados nos ensaios com ampliação de 100X.

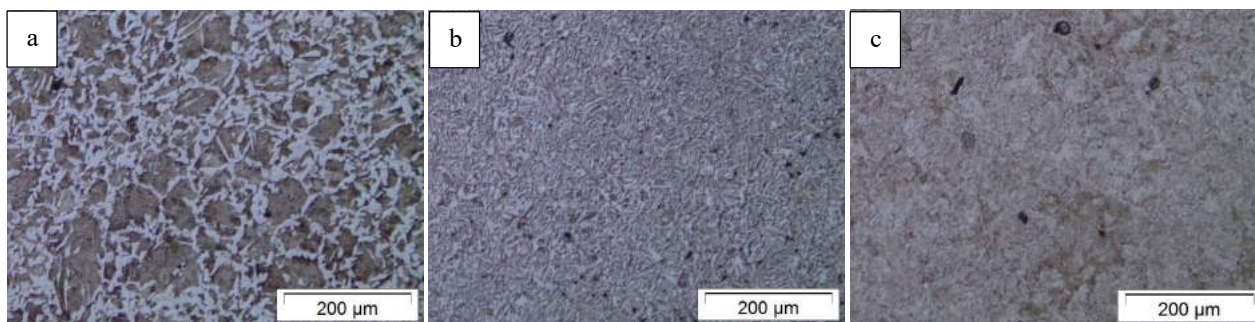


Figura 4 (a) (b) e (c) Micrografias dos aços AISI 1045, 4340 e 8640 laminados, respectivamente.

Após a realização das análises de microestrutura é verificado que as imagens correspondem aos materiais especificados pela norma ASTM E-8M. Não se estenderá mais nos comentários pois, essas imagens não são o objeto principal de estudo do trabalho

As figuras 5 (a) (b) e (c) representam os tipos de fraturas que foram obtidas durante os ensaios de torção realizados.

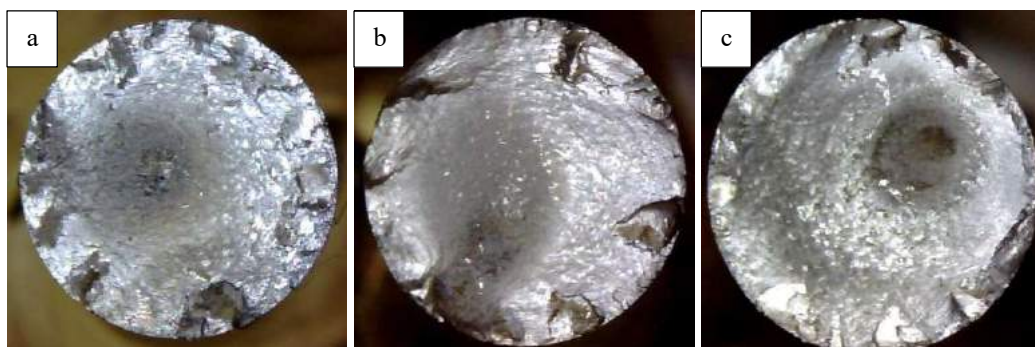


Figura 5 (a) (b) e (c) Corpo de prova 1045, 4340 e 8640 após rompimento.

Todos os corpos de prova que foram rompidos no ensaio de torção apresentaram fraturas dúcteis, comprovando assim que os três materiais envolvidos no processo possuem uma boa ductilidade. É possível observar também o início e fim das rupturas pela diferença de textura das suas superfícies apresentadas.

A figura 6 mostra os resultados obtidos por meio do ensaio de torção apresentados a seguir, correlacionam os valores obtidos nos cálculos analíticos com os valores encontrados no ensaio. Estes resultados estão descritos em forma de gráfico e tabela que seguem.

A figura 6 mostra o momento torçor *versus* ângulo de torção, representando, nitidamente, por meio dos resultados obtidos no ensaio de torção alguns valores das propriedades mecânicas dos três materiais. Os limites de proporcionalidade e o início do regime plástico estão bem detalhados pelas retas proporcionais que são frequentes e constantes nas três linhas.

O início do limite de escoamento e o momento torçor máximo nesse limite variam em decorrência dos valores obtidos em função dos ângulos de torção, mas obedecem a uma linearidade similar em relação aos três materiais, sendo que o aço 8640 apresentou o menor fluxo de valores no limite de escoamento, iniciando sua deformação plástica antes dos dois materiais, 4340 e 1045.

Mas, em relação ao regime plástico, o aço 8640 apresentou um número maior de valores e um tempo maior de deformação em relação ao aço 1045 e 4340. E consequentemente o aço 8640 foi o que apresentou o maior valor de momento torçor máximo e momento de torçor de ruptura, superando o aço 4340. Desta forma é possível afirmar que o aço 8640 apresenta maior ductilidade e resistência mecânica a torção em relação aos outros dois aços, mesmo o aço 4340 apresentando em um valor de dureza Brinell maior que o do aço 8640.

O aço 1045 apresentou os menores índices de ductilidade e resistência mecânica à torção durante os ensaios conforme mostra o gráfico. Sendo possível visualizar perfeitamente e comparar entre ambos os valores de momento torçor máximo no regime plástico, onde o torque aplicado aos corpos de prova alcançou seus valores máximos no ensaio. É possível também, perceber os valores de momento torçor no momento de ruptura de cada material. Todos esses momentos torçores, seguem a linearidade em função dos ângulos de torção que foram obtidos durante o ensaio e visualizados no goniômetro.

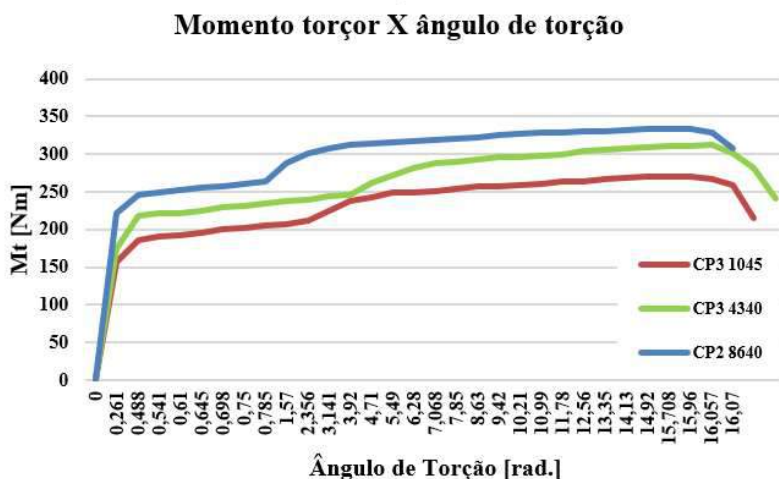


Figura 6. Gráfico de momento torçor versus ângulo de torção dos materiais

Por opção os valores de momento torçor no limite de proporcionalidade e os valores de momentos torçores no início do escoamento e no limite máximo de escoamento não foram detalhados em números reais, pois seus valores foram registrados na máquina, mas seus cálculos para comparação e validação são de difícil entendimento real devido às literaturas indicarem que são valores empíricos de dedução, devido ao grande número de valores apresentados no regime elástico e durante o escoamento do material. Mas como o gráfico mostra, suas linhas estão em conformidade com os valores apresentados no ensaio.

Em relação as tensões máximas ocorridas no regime plástico, e as tensões máximas de ruptura, os gráficos também apresentam uma linearidade entre ambos. Mais uma vez, os valores das tensões máximas no limite de proporcionalidade e no início e limite de escoamento também não foram descritas em números reais, mas os gráficos apresentam suas linhas bem detalhadas.

Comparando as linhas da figura 7, possível perceber que o aço 8640, mais uma vez, apresentou o menor fluxo de valores no limite de escoamento, mas foi o material que apresentou o maior valor de módulo de ruptura máximo a torção e o maior valor de tensão de ruptura máxima entre os três aços. Possibilitando mais uma vez afirmar, que o aço 8640 apresenta maior ductilidade e resistência mecânica à torção em relação aos outros materiais.

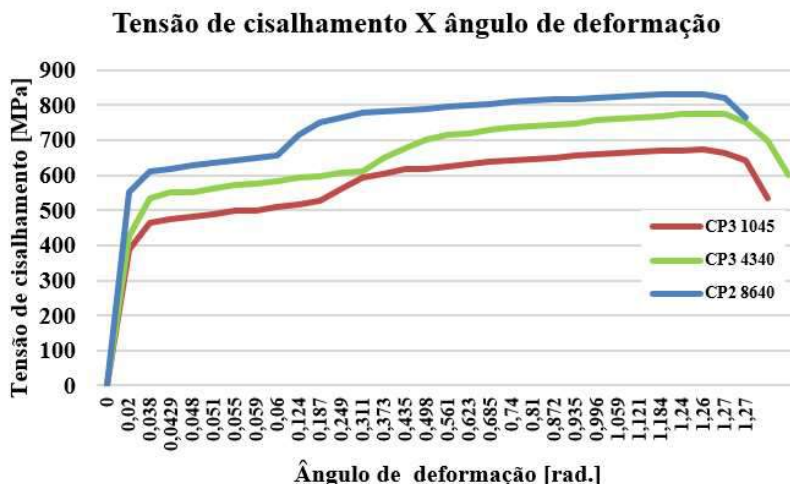


Figura 7- tensão de cisalhamento versus ângulo de deformação

A tabela 5 a seguir apresenta detalhadamente os valores obtidos pelos cálculos analíticos e os valores obtidos nos ensaios. Todos os valores de momento torçor máximo, momento torçor de ruptura, módulo de ruptura a torção máximo, tensão de ruptura, ângulos de torção, ângulos de deformação estão relacionados entre si, para melhor compreensão.

Materiais	M _t ^{máx} (Nm)		M _t ^{rup} (Nm)	τ _{máx} (MPa)		τ _{máx} (MPa)	τ _r (MPa)	Θ _{max.} (rad.)	g _{max} (rad.)
	Ensaio de torção	Cálculo analítico	Ensaio de torção	Cálculo analítico	Fator 0,8 σ	Ensaio de torção	Ensaio de torção	Ensaio de torção	Cálculo analítico
1045 CP1	273	281,33	219	699,751	699,84	674,104	544,776	14,25	1,207
1045 CP2	270,6	246,602	223,2	613,799	613,44	673,134	555,223	13,57	1,149
1045 CP3	270,6	262,811	214,5	653,973	653,76	673,134	533,582	14,1	1,193
4340 CP1	312,9	302,17	240,9	752,093	751,68	778,358	599,253	13,02	1,102
4340 CP2	313,5	342,69	267	852,621	852,48	779,85	664,179	14,154	1,196
4340 CP3	311,4	295,22	241,8	735,555	734,4	776,119	601,492	12,82	1,086
8640 CP1	328,5	288,28	262,2	717,074	717,12	817,164	652,238	16,09	1,086
8640 CP2	334,2	309,12	307,2	769,869	768,96	831,343	764,179	15,96	1,352
8640 CP3	323,4	317,22	266,7	789,631	789,12	804,477	663,432	15,62	1,322

A tabela comprova que os valores calculados foram próximos aos resultados práticos na máquina, atestando que os cálculos foram desenvolvidos de maneira ideal, em relação aos ensaios realizados.

CONCLUSÕES

Após a realização dos ensaios e comparação com os cálculos realizados é possível tomar as seguintes conclusões:

- Observando as figuras adquiridas pela análise das microestruturas e a tabela com as composições químicas, conclui-se que os aços utilizados realmente são os aços especificados em norma para a realização dos ensaios, sendo eles laminados e recozidos.
- Ao visualizar a figura. 5, infere-se que as fraturas em materiais dúcteis nos ensaios de torção diferem-se totalmente das fraturas nos ensaios de tração, pois as fraturas na torção não apresentam estricção, que é uma característica da tração além disso, os materiais e suas fraturas começam na periferia e seguem no plano transversal até seu total rompimento no núcleo.
- Ao término da comparação entre ambos os gráficos de momento torção *versus* ângulo de torção e tensão *versus* ângulo de deformação, constata-se que há uma similaridade entre ambos, pois todos eles apresentam, uma reta de proporcionalidade, um fluxo de escoamento, um regime plástico de deformação, e uma linha que identifica a ruptura de cada material.

Estes ensaios demonstraram a aplicabilidade que os ensaios mecânicos de torção podem fruir em diversos tipos de materiais, com aplicação tanto industrial, quanto à novos estudos na área acadêmica no intuito de utilizar ao máximo as propriedades mecânicas apresentadas nestes ensaios. Sendo estes ensaios mais realistas que os ensaios de tração em elementos de transmissão circular.

REFERÊNCIAS

- [1] SOUZA, Sérgio Augusto de. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos**. 5.ed. São Paulo (SP): Edgard Blücher, 2000. 286 p. ISBN 8521200129.
- [2] GARCIA, Amauri; SANTOS, Carlos Alexandre dos. SPIN, Jaime Alvares. **Ensaio dos materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 247 p. ISBN 978-85-216-1221-6.
- [3] BEER, Ferdinand Pierre; JOHNSTON, E. Russell. **Resistência dos materiais**. 3. ed. São Paulo (SP): Pearson Education do Brasil, 2006, xx, 1255p. ISBN 8534603448.
- [4] ALVES, Patricia. **Ensaio e conformação mecânica**. (Apostila de Resistência dos Materiais) – Pitágoras Faculdade. [S. l.], apostila
- [5] MELCONIAM, Sarkis. **Mecânica técnica e resistência dos materiais**. 15. ed. São Paulo (SP): Érica, 2005 360, [1] p. ISBN 8571946663.
- [6] MELCONIAM, Sarkis, **Elementos de Máquinas**. 9. ed. São Paulo (SP): Érica. Disponível em: <http://pt.slideshare.net/alexfabianobueno1/elementos-de-mquinas-sarkis-melconian-32426060>.
- [7] NASH, William A. **Resistência dos materiais**. São Paulo: Ed. McGraw-Hill, 1977. 384p.
- [8] STEPIN, P. **Strength of materials**. 2 ed. Moscou: Peace, [19--]. 401 p.

- [9] BOTELHO, Manoel Henrique Campos,. **Resistência dos materiais para entender e gostar: um texto curricular**. São Paulo: Studio Nobel, 1998. 301 p. ISBN 85-85445-70-X
- [10] BEER, Ferdinand p. **Mecânica dos materiais**. 5.ed. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011.
- [11] WILLEMS, Nicholas; EASLEY, John T.; ROLFE, Stanley T. **Resistência dos materiais**. São Paulo: Ed. McGraw-Hill, 1983. 497 p.
- [12] HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 5ed. São Paulo (SP): Pearson Education do Brasil, 2006. Xi, 670p. ISBN 8587918672.
- [13] CAETANO, Daniel. **Torção**. (Apostila de Resistência dos Materiais). – [S. l].
- [14] GOOGLE Imagens. Disponível em: <http://www.mspc.eng.br/matr/resmat0310.shtml>.
- [15] Apostila de Ensaios de Dureza. Disponível em: <http://pt.slideshare.net/alexfabianobueno1/elementos-de-mquinas-sarkis-melconian-32426060>.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

O(s) autor(es) é (são) o(s) único(s) responsável(is) pelas informações incluídas neste trabalho.

APPLICATION OF ANALYTICAL METHODS FOR VALIDATION OF TORSION TEST PERFORMED IN AISI 1045, 4340 AND 8640

Abstract—As the mechanical torsion test is essential for the acquisition of mechanical properties of materials, this project was developed to find the maximum torsional moment and other mechanical properties of the AISI steel 1045, 4340 and 8640. The choice of these materials was in accordance with their use in industries. For the development of the tests and the analytical calculations was necessary the knowledge of some physical quantities and strength of materials equations. After the specimen machining, it was accomplished the Brinell hardness test and the torsion test. It was also accomplished a chemical analysis for the correct description of each material. The obtained results on the tests was correlated with the equations and transformed in charts and graphs to the results comparison and the validation of the tests

Keywords—Torsion test, machine, strength of materials

RESPONSIBILITY NOTICE

The author(s) is (are) the only responsible for the printed material included in this paper.