

## ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DUMA MISTURA PMMA/Si

J. M. Ferreira , J. D. Costa e C. Capela

Departamento de Engenharia Mecânica  
FCTUC, Universidade de Coimbra, 3000 Coimbra, Portugal

**Resumo.** O PMMA/Si é uma mistura acrílica cuja base é o polimetilmetacrilato aditivado com uma dispersão fina, de 60% em volume, de sílica. É utilizado correntemente em equipamentos sanitários e de cozinha em que fica sujeito a variações térmicas elevadas originadas pelas descargas sucessivas de água quente e fria. Por vezes, surgem roturas em serviço dos lava louças fabricados nestes materiais, geralmente a partir dos furos de saída das águas residuais. O modo de rotura aparenta tratar-se de um modo de rotura frágil resultante das tensões de origem térmica. Neste trabalho apresentam-se os resultados da primeira fase do estudo das condições de rotura na zona dos furos. Nesta fase determinaram-se as propriedades mecânicas (tensão de cedência e módulo de elasticidade),  $K_C$  e  $G_C$  para temperaturas entre 20 e 100°C para duas composições químicas do material.

**Abstract.** The PMMA/Si is a acrylic casting dispersion based on the poli-methyl methacrylate aided with a fine dispersion of 60 % by volume silica. Currently, this material is used in sanitary ware and kitchen sinks where are submitted with severe temperature variations originated by the alternated flows of cold and hot water. Sometimes, occur fracture in service on the kitchen sinks manufactured with these materials. These fractures seems to be originated by thermal stresses and occur generally at the holes. In this work are presented the results of the first phase of one project where are studied the fracture conditions in the region of the holes. The results presented are the mechanical properties (yield stress and the Young's modulus) and the fracture mechanical parameters  $K_C$  e  $G_C$  calculated for the range of temperatures between 20 e 100°C for two chemical compositions of the material.

## 1. INTRODUÇÃO

A mistura PMMA/Si substitui os cerâmicos e o ferro fundido ou o aço inoxidável em diversas aplicações, designadamente em lava-louças para cozinhas, louça de sanitários e mobiliário de casa de banho. A utilização em lava-louças procura combinar as propriedades do MMA enquanto monómero passível de ser processado por injeção antes da sua polimerização com a sílica cujo principal contributo para o material é aumentar a sua resistência ao desgaste. Consegue-se, assim, um material com rigidez, dureza e resistência ao desgaste adequadas a esta aplicação.

A tenacidade à fractura do material parece, porém, ser demasiado baixa para evitar algumas roturas que se têm observado em serviço. As alterações súbitas de temperatura que se verificam aquando da descarga alternada de água a uma temperatura próxima do ponto de evaporação (cerca de 95°) e à temperatura ambiente, que se estima em cerca de 15°, parecem estar na origem dessas ruínas que se verificam, invariavelmente, a partir de fronteira do furo de

descarga das águas residuais, localizado na bacia do lava-louças.

Apesar da taxa de roturas observada ser muito reduzida (inferior a 0,1%), achou-se conveniente encetar um estudo que visasse a compreensão, o mais completa possível, do fenómeno.

Este estudo envolve, além da caracterização mecânica do material (resistência à tracção, constantes elásticas) e da tenacidade à fractura do material na gama de temperaturas -20° a +100°C, também a determinação da evolução de temperaturas na região envolvente ao furo com vista ao cálculo da distribuição de tensões e da sua variação. O objectivo final é a verificação do modo de rotura frágil e do nível de defeitos toleráveis.

Neste trabalho apresentam-se os resultados da primeira fase deste estudo que corresponde à determinação das propriedades mecânicas (tensão de cedência e módulo de elasticidade), e dos parâmetros de tenacidade à fractura,  $K_C$  e  $G_C$ , na gama de temperaturas compreendida entre 20 e 100 °C para duas

composições químicas do material normalmente utilizadas no fabrico de lava-louças..

2. MATERIAL E TÉCNICAS EXPERIMENTAIS

Os materiais estudados no presente trabalho são misturas cuja composição se distingue somente pela percentagem dos elementos constituintes e pela granulometria da dispersão de sílica. Na tabela 1 apresenta-se a composição dos dois materiais.

Nos ensaios realizados utilizaram-se provetes cuja geometria se indica na figura 1.

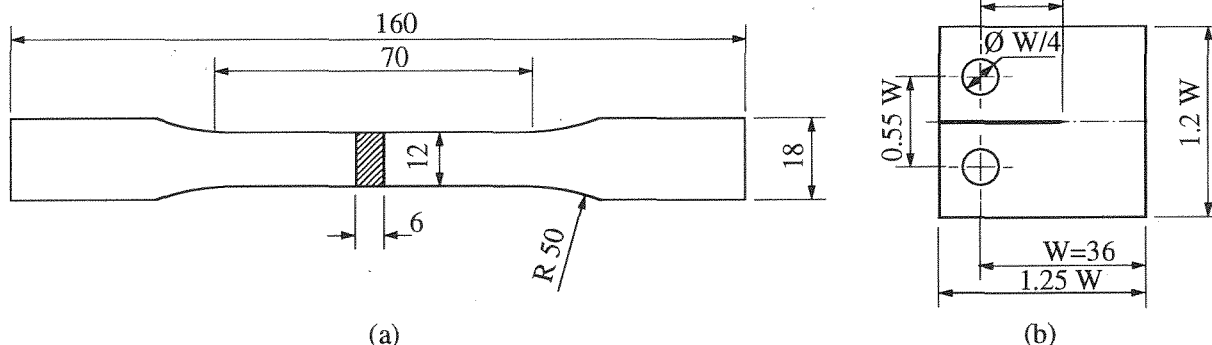


Fig. 1. Geometria dos provetes (dimensões em mm): a) ensaios de tracção; b) ensaios de tenacidade à fractura

Os provetes cuja geometria é representada na figura 1a) foram utilizados nos ensaios de tracção enquanto que aqueles cuja geometria está representada na figura 1b) foram usados nos ensaios para a determinação da tenacidade à fractura.

Nos ensaios utilizou-se uma máquina servo-mecânica INSTRON, controlada por computador. A velocidade de carregamento utilizada em todos os ensaios foi de 1 mm/minuto. Usou-se um extensómetro axial nos ensaios de tracção e um extensómetro de lâminas nos ensaios de determinação de  $K_{IC}/G_C$ .

No controlo da temperatura de ensaio usou-se uma câmara ambiental ATS com controlador do tipo PID- "Proportional Integral Derivative". Definiu-se um perfil de variação da temperatura, caracterizado por uma rampa linear de aquecimento durante 5 minutos, seguido de um período de estágio de 20 minutos a temperatura constante. Os ensaios foram realizados nos últimos 5 minutos desse estágio, procurando garantir a homogeneidade de temperatura no seio dos provetes

Nos provetes CT, usados para a determinação de  $K_{IC}$  ou  $G_C$ , foi criada uma fenda, pressionando uma pequena lâmina de barbear sobre a extremidade de um entalhe previamente aberto com um disco abrasivo de 0,2 mm de espessura. Este procedimento, é o recomendado

Tabela 1. Composição química dos materiais ensaiados

Material	Composição Química [%volume]		Granulometria da Sílica [µm]
	PMMA	Sílica	
A	40	60	10
B	50	50	350

Os provetes foram colhidos do fundo da bacia de lava-louças retirados da linha de fabrico. Em virtude da natureza abrasiva deste material, os provetes foram maquinados por fresagem utilizando ferramentas de carboneto de tungsténio.

para polímeros cuja tenacidade seja inferior a  $2 \text{ MPa} \sqrt{\text{mm}}$ .

Os ensaios de tracção foram realizados seguindo as prescrições da norma ASTM D638 [1]. Nos ensaios de determinação da tenacidade à fractura seguiram-se as directivas do "Testing Protocol EGF Task Group on Polymers and Composites-Protocol for  $K_{IC}/G_C$  Standard" [2].

Os ensaios de tracção foram realizados a cinco temperaturas distintas: 20°, 40°, 60°, 80° e 95°C. Nos ensaios de  $K_{IC}$  usaram-se apenas quatro valores de temperaturas: 20°, 40°, 60°, e 95°C. Os ensaios na gama -20° a +20°C irão ser realizados num futuro próximo.

Após os ensaios, as superfícies de fractura dos provetes CT foram observadas num microscópio óptico com base micrométrica com vista à medição rigorosa do comprimento da fenda.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

3.1. Propriedades Mecânicas

Nas tabelas 2 e 3 apresentam-se todos os resultados obtidos nos ensaios de tracção para as cinco temperaturas analisadas. A tabela 2 refere-se ao

material A, enquanto que a tabela 3 se refere ao material B.

**Tabela 2.** Propriedades mecânicas do material A na gama de temperaturas 20-95°C.

Temp. T [°C]	Ref. <sup>a</sup> Prov.	$\sigma_v$ [MPa]	E [MPa]	$\epsilon_{p\text{máx}}$ [%]
20	A20/1	64.45	10480	0.932
20	A20/2	65.35	9716	1.048
40	A40/1	57.05	8003	1.303
40	A40/2	53.85	7624	1.105
40	A40/3	44.36	7861	0.793
40	A40/4	49.68	6610	1.048
60	A60/1	40.74	5648	1.393
60	A60/2	38.79	4998	1.398
60	A60/3	41.44	6080	0.874
80	A80/1	17.15	4754	1.684
95	A95/1	10.52	2144	1.608

**Tabela 3.** Propriedades mecânicas do material B na gama de temperaturas 20-95°C.

Temp. T [°C]	Ref. <sup>a</sup> Prov.	$\sigma_v$ [MPa]	E [MPa]	$\epsilon_{p\text{máx}}$ [%]
20	B20/1	36,88	8146	0,734
20	B20/2	38,29	6320	1,166
40	B40/1	32,29	6293	0,934
40	B40/2	32,18	6160	0,957
40	B40/3	31,21	5320	0,913
60	B60/1	24,93	4431	1,347
60	B60/2	24,73	4614	1,795
60	B60/3	24,54	3855	1,471
80	B80/1	17,54	3241	1,844
95	B95/1	10,55	1864	1,776

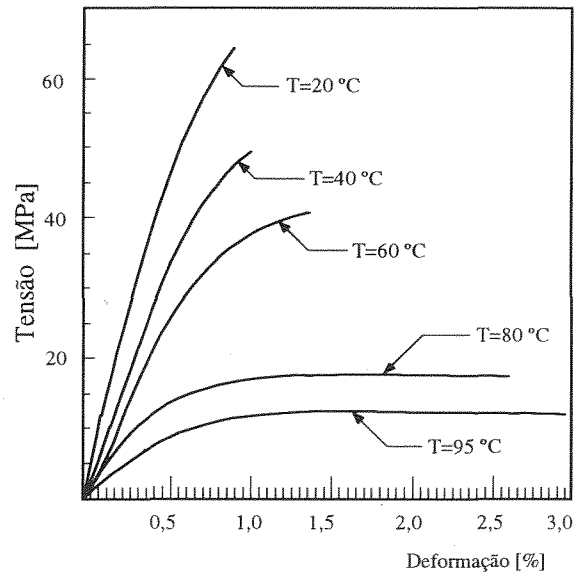
Polímeros tais como o PMMA com um valor elevado de E à temperatura ambiente pertencem à categoria dos materiais frágeis os quais quebram antes de ocorrer deformação plástica significativa.

Na figura 2 apresentam-se curvas típicas das obtidas nos ensaios de tracção às diversas temperaturas. As curvas obtidas para o material B apresentam um comportamento semelhante, ainda que com valores inferiores.

Pode observar-se que o efeito da temperatura na forma característica da curva  $\sigma$ - $\epsilon$  é significativa: à medida que se aumenta a temperatura, tanto a rigidez como a tensão de cedência diminuem enquanto que o alongamento aumenta

O comportamento frágil mantém-se até à temperatura de 60°C(\*). O PMMA, à semelhança de outros termoplásticos, não apresenta um ponto de amolecimento brusco, antes mostra um amolecimento

gradual com a temperatura.



**Fig. 2.** Curvas tensão de deformação obtidas nos ensaios de tracção no material A.

A temperatura de serviço recomendada para este material é cerca de 50°C, que se encontra muito abaixo da temperatura de amolecimento que é cerca de 100°C, determinada segundo a ASTM D648 para uma tensão  $\sigma=0,45$  MPa [3].

As figuras 3 e 4 mostram a variação de tensão de cedência e do módulo de elasticidade, respectivamente, em função da temperatura para os dois materiais ensaiados.

O material A apresenta uma maior resistência que o material B em toda a gama de temperaturas analisadas. Porém, a sua sensibilidade ao aumento de temperatura é também muito superior fazendo com que, a partir de 80°C ambos os materiais apresentam sensivelmente a mesma resistência expressa pela tensão de cedência  $\sigma_y$

A interpretação deste comportamento pode ser feita com base no efeito da sílica para uma alteração de resistência do material. À medida que se aumenta a temperatura esse efeito varia de forma muito importante e para temperaturas elevadas a resistência fica mais dependente do elemento aglutinador (PMMA). Tanto a percentagem como a granulometria da sílica parecem ter um influência decisiva nas propriedades do material.

A curva da tensão de cedência  $\sigma_y$  em função da temperatura, colhida da literatura para o PMMA [4] e que se representa também na figura 3 situa-se abaixo dos resultados obtidos neste trabalho para o material A, mas acima dos resultados obtidos para o material B.

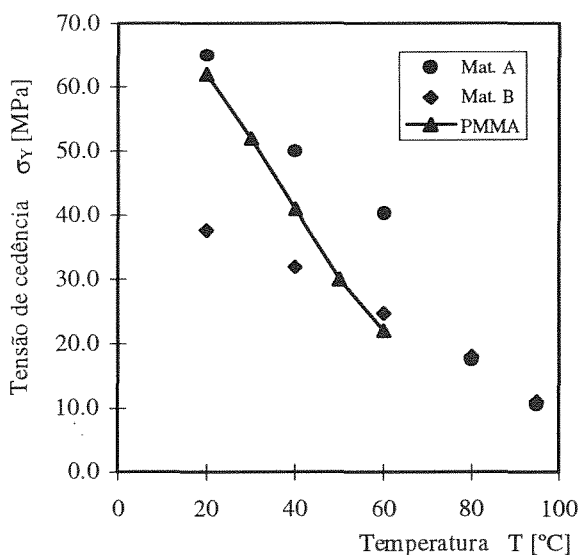


Fig. 3. Variação da tensão de cedência  $\sigma_y$  com a temperatura

Pode, assim, concluir-se que a adição de sílica ao PMMA pode contribuir para um aumento ou perda de resistência dependendo da sua quantidade e da granulometria da dispersão adicionada.

Também o módulo de elasticidade E tem uma variação relativa nos dois materiais com a temperatura semelhante à que foi observada para a resistência à tração. Assim, o material A apresenta uma maior rigidez, ou seja, valores superiores do módulo de elasticidade do que o material B e ambos os materiais apresentam diminuição de E com o aumento da temperatura.

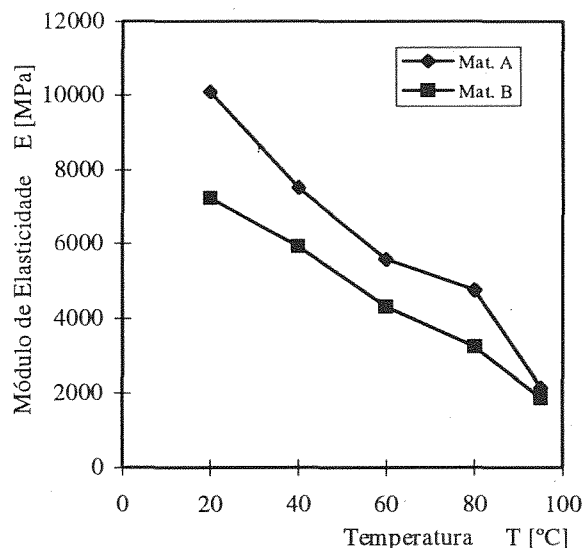


Fig. 4. Variação do módulo de elasticidade E com a temperatura

Para T=95°C o módulo da elasticidade é praticamente igual para os dois materiais

3.2. Resultados de  $K_c/G_c$

As tabelas 4 e 5 apresentam os resultados obtidos nos ensaios de determinação da tenacidade à fractura usando provetes CT. A espessura dos provetes revelou-se ser insuficiente para permitir obter valores válidos de  $K_c$  na maioria dos ensaios realizados no material B. No caso do material A obtiveram-se valores válidos de  $K_c$  para todas as temperaturas com excepção para os ensaios realizados a 95°C.

Tabela 4. Valores de  $K_c$  e  $G_c$  a várias temperaturas. Material A

Temp. T [°C]	Ref. Prov.	Esp. B [mm]	P <sub>0</sub> [kN]	$K_{01}/K_c$ [MPa.√mm]	$G_c$ [J/mm <sup>2</sup> ]
20	A20/2	6,62	0,3684	38,34**	0,2799
20	A20/3	7,33	0,4403	41,76**	0,287
20	A20/4	7,34	0,4591	44,37**	0,312
40	A40/1	7,30	0,5423	51,36**	0,460
40	A40/2	7,30	0,5772	57,12**	0,506
40	A40/3	7,33	0,4603	41,01**	0,335
60	A60/1	7,14	0,5396	51,48**	0,5402
60	A60/2	7,20	0,5476	49,78**	0,4855
60	A60/3	7,14	0,4859	47,10**	0,5
95	A95/1	7,16	0,5167+	61,89*	0,7246
95	A95/2	7,15	0,4865+	59,92*	0,8271
95	A95/3	7,15	0,5407	51,93*	0,8973

Tabela 5. Valores de  $K_Q$  e  $G_c$  a várias temperaturas. Material B

Temp. $T$ [°C]	Ref. Prov.	Esp. B [mm]	$P_Q$ [kN]	$K_Q/K_C$ [MPa $\sqrt{mm}$ ]	$G_c$ [J/mm $^2$ ]
20	B20/1	7,2	0,8079	77,42**	1,344
20	B20/3	7,12	0,8276	82,12**	1,384
20	B20/4	7,6	0,829+	71,1*	1,2596
40	B40/1	7,11	0,7381+	71,57*	1,2155
40	B40/2	7,19	0,8333+	79,73*	1,799
40	B40/3	6,99	0,8661+	86,02*	1,9687
60	B60/2	6,19	0,5266+	60,51*	1,039
60	B60/3	6,34	0,7128+	77,25*	1,79
60	B60/5	6,24	0,6197+	67,9*	1,295
95	B95/1	7,23	0,5659+	55,1*	1,183
95	B95/2	7,27	0,5879+	52,5*	1,38

\* - valores de  $K_Q$ \*\* - valores de  $K_C$ + -  $P_{m\acute{a}x}/P_{5\%} > 1,1$ 

O valor de  $P_Q$  usado no cálculo de  $K_Q$  está também indicado nestas tabelas. O critério de invalidação dos ensaios realizados no material foi  $P_{m\acute{a}x}/P_{5\%} > 1,1$ . Em alguns casos verificou-se também a não observância do critério  $B > 2,5(K_C/\sigma_y)$  em virtude de a espessura disponível na peça de onde foram retirados os provetes ser cerca de 7 mm, valor bastante inferior ao recomendado em [2] para cumprir a relação  $B=W/2$  com  $W=36$  mm. Porém, uma vez que o objectivo deste estudo é a verificação dos modos de ruína frágil nos lava-louças, interessa, sobretudo, obter os valores da tenacidade à fractura para a espessura utilizada naquela aplicação, independentemente de serem ou não valores críticos.

Na figura 5 apresentam-se as curvas à temperatura ambiente da carga em função do deslocamento dos pontos de aplicação da carga para os dois materiais ensaiados.

Pode observar-se que o material A apresenta um comportamento muito mais frágil que o material B e valores de tenacidade significativamente inferiores. Assim, a dispersão de sílica de granulometria inferior conduz a uma redução muito importante da tenacidade. A variação da tenacidade  $K_C$  em função da temperatura encontra-se representada na figura 6.

Enquanto o material A apresenta um ligeiro aumento de tenacidade com a temperatura, o material B, pelo contrário, apresenta uma forte redução daquele parâmetro com o aumento da temperatura. Para  $T=95^\circ\text{C}$ , ambos os materiais apresentam sensivelmente o mesmo valor da tenacidade.

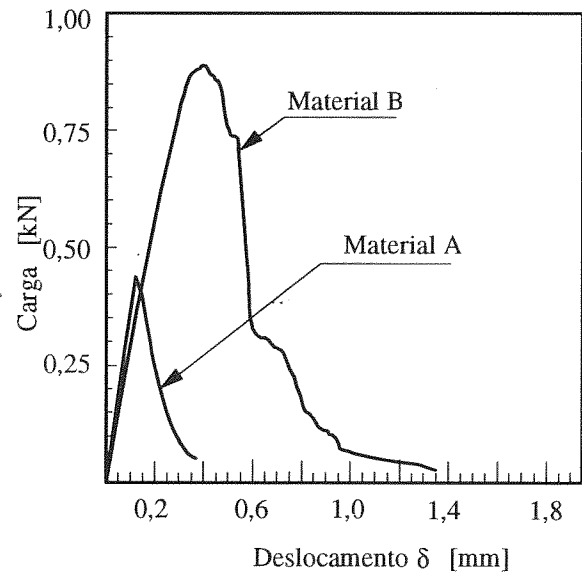


Fig. 5. Curva carga versus deslocamento dos pontos de aplicação da carga.  $T=20^\circ\text{C}$ .

Pode observar-se que o material B apresenta valores de tenacidade muito superiores aos verificados no material A em toda a gama de temperaturas.

Não se obteve na literatura a curva de variação da tenacidade com a temperatura para o PMMA para a poder comparar com os resultados obtidos neste trabalho para os dois materiais com carga de sílica. Dessa comparação poder-se-ia concluir do papel desempenhado pela sílica, através dos parâmetros granulometria e teor em volume, na tenacidade à fractura da mistura.

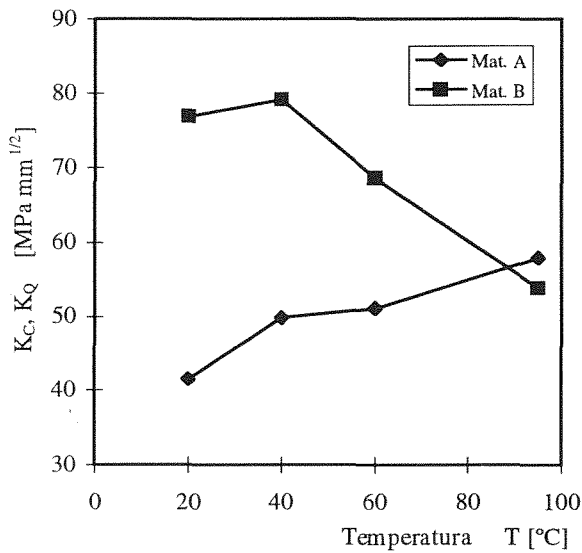


Fig. 6. Variação de  $K_c(K_Q)$  com a temperatura.

A tenacidade à fractura expressa pelo parâmetro  $G_c$  foi calculada a partir da energia  $U$  estimada a partir da área abaixo de uma curva carga versus deslocamento dos pontos de aplicação da carga, através da expressão

$$G = \eta U / B(W-a) \quad (1)$$

onde  $\eta$  é um coeficiente adimensional de correcção da componente de tracção na carga aplicada, tal como é definido na norma para o cálculo do integral  $J$  [5].  $B$ ,  $W$  e  $a$  são os parâmetros geométricos indicados na figura 1b.

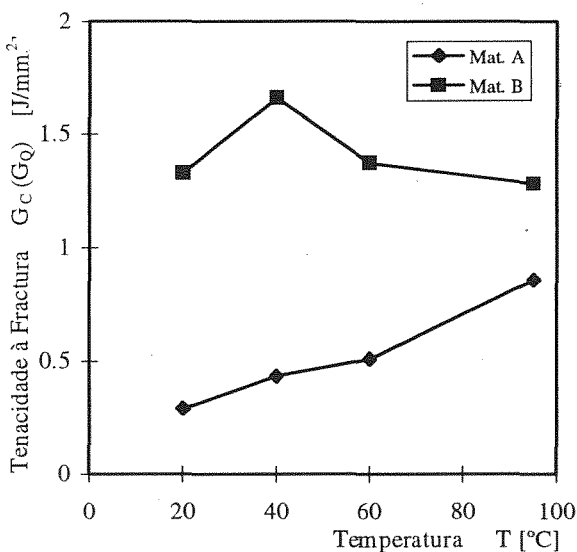


Fig. 7. Variação de  $G_c(G_Q)$  com a temperatura.

A figura 7 apresenta a variação de  $G_c(G_Q)$  com a temperatura para os dois materiais ensaiados. As tendências que se podem observar são as mesmas que já se haviam referido para  $K_c$ .

#### 4. CONCLUSÕES

1 - São apresentados resultados obtidos em ensaios de tracção em dois materiais constituídos pelo polímero PMMA ao qual lhe foram adicionadas cargas de sílica com teores e granulometrias distintas. Observou-se que o material com maior teor de sílica e com grão mais fino (material A) apresenta propriedades mecânicas (tensão de cedência e módulo de elasticidade) mais elevados do que o outro material com menor teor de sílica e com grão mais grosso (material B).

2 - A temperatura apresentou um efeito sobre a curva  $\sigma$ - $\epsilon$  é significativa: à medida que a temperatura aumenta, tanto a rigidez  $E$  como a tensão de cedência  $\sigma_y$  diminuem enquanto que o alongamento aumenta.

3 - A tenacidade à fractura do material A é significativamente inferior à do material B. Enquanto que no material A a tenacidade diminui fortemente com o aumento de temperatura, o material B apresenta um ligeiro melhoramento desta propriedade com o aumento da temperatura.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem à empresa SANITANA - Sanitários de Anadia, por lhes ter facultado amostras dos dois materiais para a confecção dos provetes ensaiados.

#### 6. REFERÊNCIAS

- [1] American Society for Testing and Materials, "Standard Test for Tensile Properties of Plastics" Annual Book of ASTM, Part 35, ASTM D638, 1980.
- [2] EGF Task Group on Polymers and Composites, "A linear Elastic Fracture Mechanics (CEFM) Standard for determining  $K_c$  and  $G_c$  for Plastics" - Testing protocol for  $K_c/G_c$  Standard. May 1988.
- [3] American Society for Testing and Materials, "Standard Test for Deflection Temperature of Plastics under Flexure Load" Annual Book of ASTM, Part 35, ASTM D648, 1978.
- [4] Waterman, N.A. and Ashby, M.F., "Elsevier Materials Selector", Elsevier Applied Science Ed., Vol.3, London, 1991.
- [5] American Society for Testing and Materials, "Standard test for  $J_c$ , a measure of Fracture Toughness" Annual Book of ASTM, Part 10, ASTM E813, 1981.