



## DESENVOLVIMENTO DE VIDRO METÁLICO UTILIZANDO FERRO-GUSA COMO PRECURSOR

Caio L. G. P. Martins<sup>1\*</sup>, Guilherme Y. Koga<sup>1,2</sup>, Carlos A. C. Souza<sup>3</sup>, Claudemiro Bolfarini<sup>1,2</sup>, Cláudio S. Kiminami<sup>1,2</sup> e Walter J. Botta<sup>1,2</sup>

1 - Universidade Federal de São Carlos, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Rodovia Washington Luiz, Km 235, São Carlos, CEP: 13565-905, SP.

2 - Departamento de Engenharia de Materiais (DEMa), Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). Rodovia Washington Luís, km 235, São Carlos, CEP 13565-905, SP.

3 - Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais - DCTM, Universidade Federal da Bahia (UFBA), Salvador, BA.

caiolgpm@estudante.ufscar.br

### RESUMO

Os vidros metálicos apresentam excelentes combinações de propriedade, como alta resistência mecânica e estabilidade térmica, além de excelentes propriedades magnéticas. Entretanto, as pesquisas nesta classe de ligas metálicas são realizadas utilizando precursores de elevada pureza e alto custo. Dessa forma, existe interesse no desenvolvimento de vidros metálicos obtidos a partir de materiais de baixo valor agregado. O objetivo desse estudo é o desenvolvimento de um vidro metálico a partir do ferro gusa, uma liga ferrosa com elevado teor de impureza e de baixo valor agregado. Dessa forma, inicialmente uma liga composta por ferro gusa acrescido com Cr e Fe-B foi produzida em forno a arco elétrico, e em seguida processada através das seguintes rotas: por fundição em coquilha de cobre por centrifugação para produção de placas de 1 mm de espessura. Na sequência as ligas foram caracterizadas por difração de raios-x (DRX), calorimetria exploratória de varredura (DSC) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Em suma, foi constatado que a taxa de resfriamento empregada não foi suficiente para suprimir a cristalização do material, entretanto, foi possível obter materiais com dureza elevada (1197 HV), possuindo um potencial para aplicações como revestimentos duros.

**Palavras-chave:** Vidros metálicos, Ferro-gusa, Dureza.

### INTRODUÇÃO

Os materiais metálicos são comumente cristalinos, ou seja, seus átomos apresentam um ordenamento de longo e curto alcance, isto é, são ordenados de forma periódica tridimensionalmente. No final dos anos 50, um grupo de pesquisadores da Caltech conseguiu suprimir a nucleação e cristalização de uma liga Au-Si através de uma alta taxa de resfriamento ( $10^6$  K/s) a partir da liga fundida <sup>(1)</sup>. Diante dessa descoberta, no final da década de 80, foram divulgados estudos relatando a obtenção de vidros metálicos com espessuras acima de 1 milímetro, por meio da solidificação em moldes metálicos, com taxa de solidificação entre 10 e 100 K/s <sup>(2)</sup>. Os vidros metálicos se destacam por apresentarem excelentes combinações de propriedades, como alta resistência mecânica, excelente propriedade magnética, elevada resistência à corrosão e ao desgaste, em virtude da ausência de defeitos cristalinos e de sua estrutura herdada de seu líquido parental super-resfriado <sup>(3-5)</sup>. Tais materiais encontraram

aplicações em núcleos de transformadores, sensores, micro engrenagens e equipamentos esportivos, como taco de golfe. A produção de vidros metálico é largamente realizada partindo de elementos de alta pureza, pois, a presença de impurezas pode facilitar a cristalização da liga <sup>(6)</sup>. Portanto, faz-se necessário o desenvolvimento de ligas vítreas partindo de elementos de pureza comercial ou até mesmo precursores com alto teor de impureza e abundantes, como é o caso do ferro-gusa. O desenvolvimento do presente estudo utilizará o ferro-gusa como precursor, uma liga ferrosa com alto teor de impureza, a qual é obtida em alto-forno via processo de redução do minério de ferro. Portanto, partindo do ferro-gusa como liga mestra, pretende-se criar uma liga  $Fe_{68}Cr_8(C,B)_{24}$  com elevada formação de fase vítrea a partir de adição de elementos de liga como Cr e B com intuito de aumentar a facilidade de formação de fase vítrea. A liga será processada por meio de solidificação rápida através de fundição por centrifugação visando obter peças com espessura de 1 milímetro. Serão realizadas caracterizações de fases, térmica e microestrutural. Por fim, pretende-se avaliar o potencial de obtenção de ligas com elevada fração de fase vítrea partindo-se do ferro-gusa, modificado com pequenas adições de ligas economicamente acessíveis, que resultem em microestruturas capazes de conferir elevada resistência ao desgaste.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A liga  $Fe_{68}Cr_8(C,B)_{24}$  foi produzida por meio da fusão dos elementos de purezas comerciais, como o ferro-gusa, Fe-B e Cr (composição apresentada na Tabela 1), no forno à arco elétrico da marca Edmund Bühler, modelo MAM1, sob atmosfera de argônio e homogeneidade assegurada por seguidas refusões.

Tabela 1: Composição das matérias-primas utilizadas para produção da liga

	C	Si	Mn	Cr	B	Fe
Ferro-gusa	4,18	0,29	0,31	0,02	-	Bal
Fe-B	0,33	0,57	-	-	16,54	Bal
Cr	-	0,83	-	98	-	-
Grafite	99	-	-	-	-	-

Em seguida, a liga produzida, bem como o ferro-gusa bruto foram processados por meio fundição centrífuga, visando obter fase vítrea em sua microestrutura devido alta taxa de resfriamento durante a solidificação do material. Desse modo, através dessa técnica pretende-se obter uma chapa com as seguintes dimensões: 33 x 45 x 1 mm<sup>3</sup>.

Por fim, foram realizadas caracterizações de fases, térmica, microestrutural e mecânica das chapas obtidas. A caracterização por difração de raios-x foi realizada com parâmetro de varredura de  $30^\circ \leq 2\theta \leq 90^\circ$  com passo de 2 °/min utilizando um difratômetro Bruker, modelo D8 advance ECO com radiação Cu-K $\alpha$  cuja emissão característica localiza-se na faixa de 1,54 Å. A caracterização térmica do material visando obter as temperaturas de transformações, como a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) foi realizada por calorimetria de varredura diferencial (DSC) com taxa de aquecimento de 40 K/min utilizando o equipamento Netzsch, modelo 404. A microestrutura do ferro-gusa, bem como do ferro-gusa processado e da liga  $Fe_{68}Cr_8(C,B)_{24}$  foram avaliadas por microscopia ótica e eletrônica, utilizando microscópio Olympus BX41M – LED equipado com câmera digital e MEV-FEG Phillips, modelo XL-30, respectivamente. A determinação da resistência mecânica das amostras produzidas foi avaliada por meio do ensaio de microdureza Vickers, utilizando o microdurômetro Vickers da Shimadzu, e o procedimento experimental foi baseado na norma ASTM-E92.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base no difratograma dos ferro-gusa processado e da liga  $\text{Fe}_{68}\text{Cr}_8(\text{C},\text{B})_{24}$  (Fig.1) é possível observar que a taxa de resfriamento não foi suficiente para formação da estrutura vítrea, não sendo formado halo não-cristalino no difratograma. O alargamento dos picos nos materiais processados, indicam a ocorrência de refinamento de grão, em virtude da rápida solidificação do material. Além disso, houve a formação de boretos ( $\text{M}_2\text{B}$ ) e carbonetos, como  $\text{M}_7\text{C}_3$  na liga  $\text{Fe}_{68}\text{Cr}_8(\text{C},\text{B})_{24}$ .

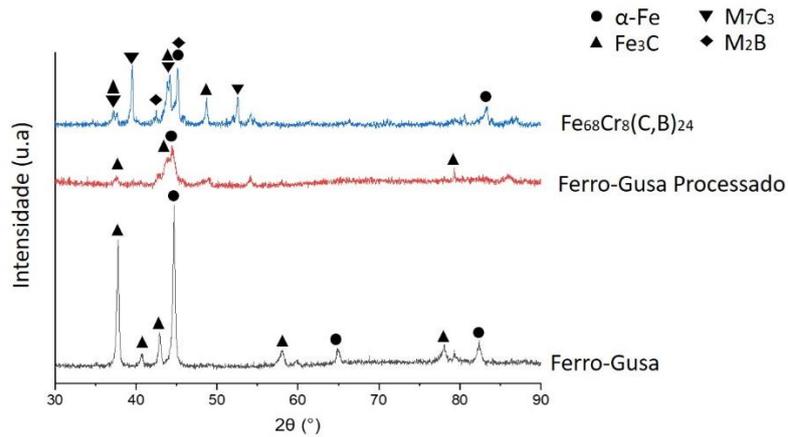


Figura 1: DRX do ferro-gusa bruto, ferro-gusa processado e  $\text{Fe}_{68}\text{Cr}_8(\text{C},\text{B})_{24}$  processado

A figura 2 apresenta as curvas de DSC dos materiais processados, onde é possível observar que ambos os materiais não apresentam temperatura de transição vítrea, outro indicativo da ausência de fração vítrea na microestrutura do material.

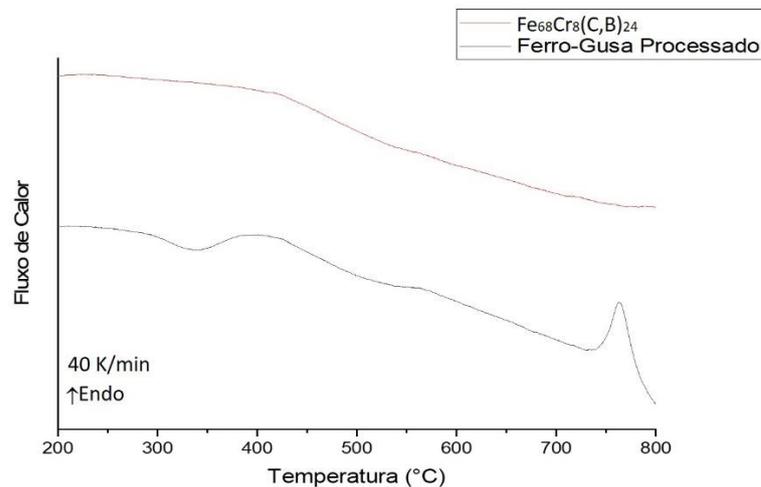


Figura 2: DSC do ferro-gusa processado e  $\text{Fe}_{68}\text{Cr}_8(\text{C},\text{B})_{24}$  processado

O ferro-gusa apresentou uma microestrutura refinada (Fig.3) com grãos alongados devido o processamento, além disso, apresenta regiões ledeburíticas, típicas de eutéticos do ferro fundido, sendo composta por glóbulos de perlita em matriz de cementita.

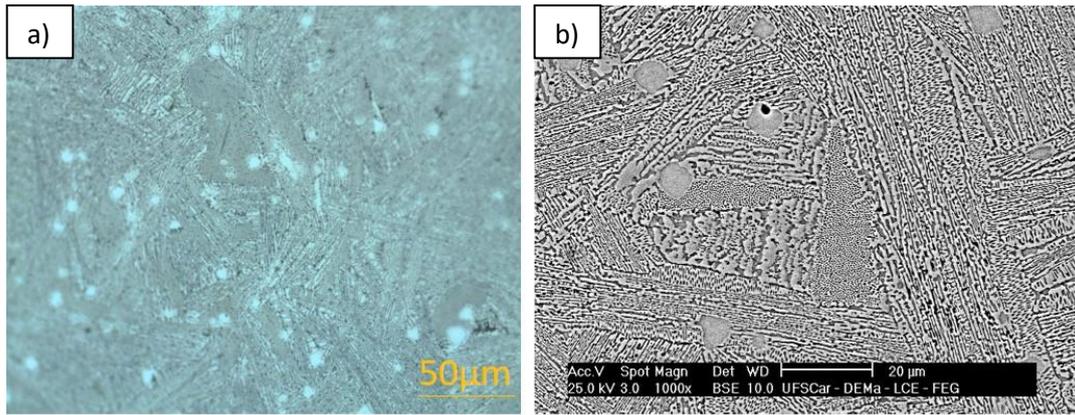


Figura 3 a) microscopia ótica do ferro-gusa processado, b) micrografia por mev do ferro-gusa processado.

A liga  $\text{Fe}_{68}\text{Cr}_8(\text{C},\text{B})_{24}$  também apresentou um refinamento de grão, sendo composta por grãos de cementita alternados por regiões perliticas, como demonstrado na micrografia obtida por microscopia eletrônica de varredura.

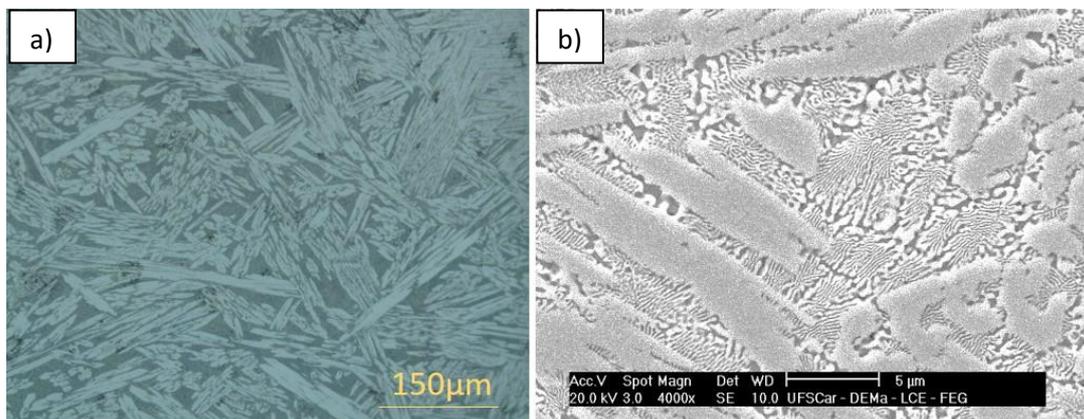


Figura 4 a) microscopia ótica do  $\text{Fe}_{68}\text{Cr}_8(\text{C},\text{B})_{24}$  processado, b) micrografia por mev do  $\text{Fe}_{68}\text{Cr}_8(\text{C},\text{B})_{24}$  processado.

O refinamento de grão dos materiais processados, além da presença de boretos e carbonetos, influenciou a dureza do material (Fig. 5). O ferro-gusa bruto apresentou uma microdureza Vickers média de 646 HV, após o processamento houve um aumento para 988 HV, devido o refinamento microestrutural. A liga  $\text{Fe}_{68}\text{Cr}_8(\text{C},\text{B})_{24}$  devido a formação de boretos, carbonetos e o refinamento microestrutural apresentou uma microdureza Vickers média de 1197 HV. Portanto, mesmo sem apresentar frações vítreas, o processamento do ferro-gusa causou um aumento na microdureza do material, apresentando um campo de aplicação como revestimentos metálicos, sendo superior ao cromo duro (1000 HV).

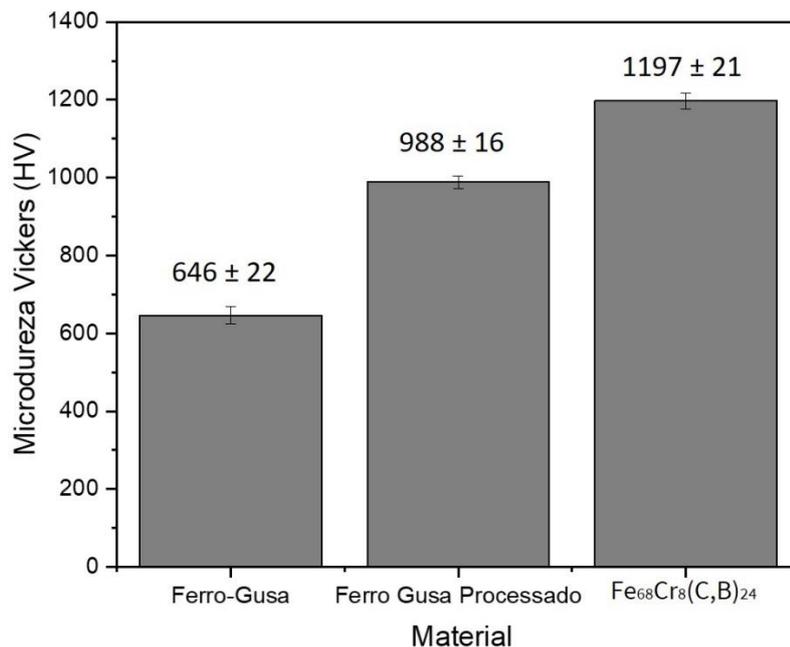


Figura 5 microdureza vickers do ferro-gusa bruto, ferro-gusa processado e Fe<sub>68</sub>Cr<sub>8</sub>(C,B)<sub>24</sub> processado.

## CONCLUSÕES

Com base nas caracterizações de fases, térmica e microscópica foi possível analisar que não houve a formação de fase vítrea, devido a baixa taxa de resfriamento aplicada no processamento, não sendo suficiente para evitar a cristalização. Entretanto, o ferro-gusa, bem como o ferro-gusa modificado com cromo e boro processados na centrifuga apresentaram uma elevada microdureza, podendo serem aplicados como revestimentos duros.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil.

## REFERÊNCIAS

1. KLEMENT, Willens; WILLENS, R. H.; DUWEZ, P. O. L. Non-crystalline structure in solidified gold-silicon alloys. **Nature**, v. 187, n. 4740, p. 869-870, 1960.
2. CHEN, H. S.; TURNBULL, D. Formation, stability and structure of palladium-silicon based alloy glasses. **Acta metallurgica**, v. 17, n. 8, p. 1021-1031, 1969.
3. INOUE, Akihisa et al. Cobalt-based bulk glassy alloy with ultrahigh strength and soft magnetic properties. **Nature materials**, v. 2, n. 10, p. 661-663, 2003.
4. SURYANARAYANA, C.; INOUE, A. Iron-based bulk metallic glasses. **International Materials Reviews**, v. 58, n. 3, p. 131-166, 2013.
5. GREER, A. L.; RUTHERFORD, K. L.; HUTCHINGS, I. M. Wear resistance of amorphous alloys and related materials. **International Materials Reviews**, v. 47, n. 2, p. 87-112, 2002.
6. STOICA, Mihai. Fe-based bulk metallic glasses. **J. Mater. Sci.(Wiesbaden)**, 2017.

## DEVELOPMENT OF METALLIC GLASS USING PIG IRON AS A PRECURSOR

### ABSTRACT

*Metallic glasses have excellent property combinations, such as high mechanical strength and thermal stability, as well as excellent magnetic properties. However, research in this class of metal alloys is carried out using precursors of high purity and high cost. Thus, there is interest in the development of metallic glasses obtained from materials with low added value. The objective of this study is the development of a metallic glass from pig iron, a ferrous alloy with high impurity content and low added value. Thus, initially an alloy composed of pig iron plus Cr and Fe-B was produced in an electric arc furnace, and then processed through the following routes: thickness. Next, the alloys were characterized by x-ray diffraction (XRD), scanning calorimetry (DSC) and scanning electron microscopy (SEM). In short, it was found that the cooling rate used was not enough to suppress the crystallization of the material, however, it was possible to obtain materials with very high hardness (1197 HV), having a potential for applications such as hard coatings.*

**Keywords:** *Metallic glasses, Pig iron, Hardness.*